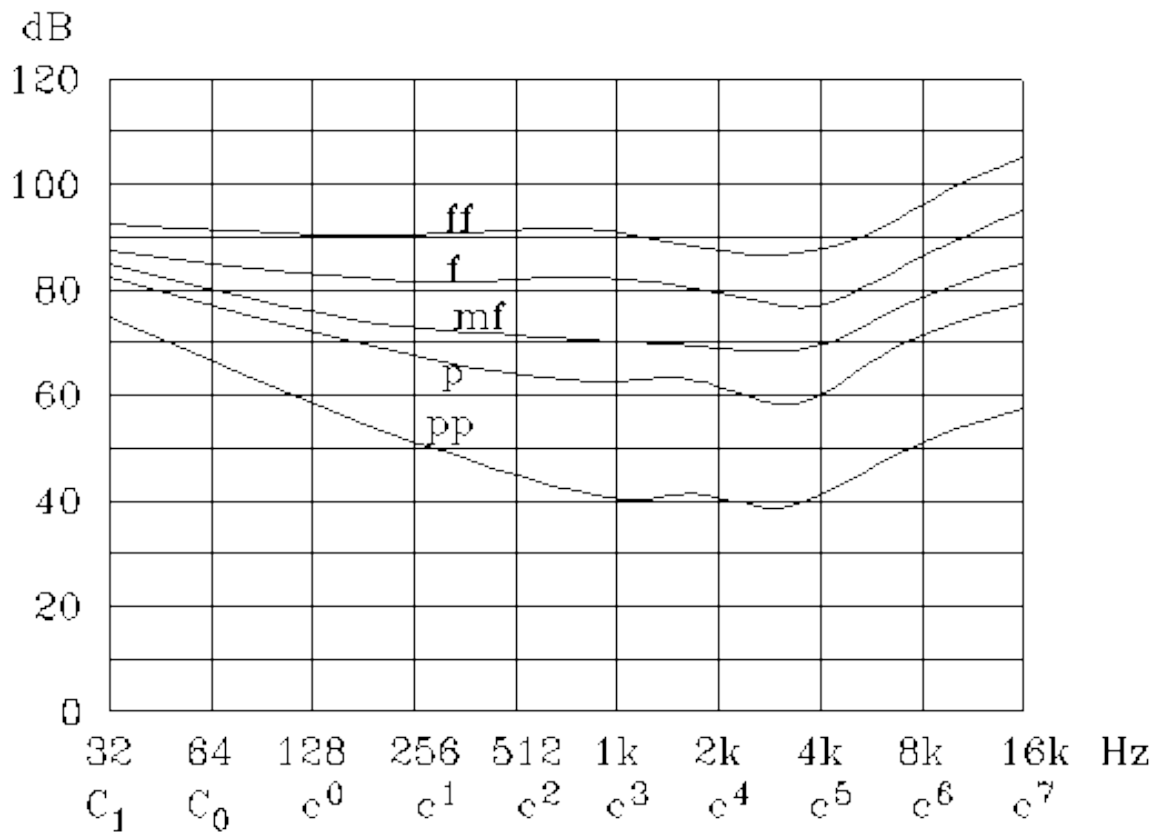


Gehoor en Mensuren

Het menselijk oor is een gevoelig instrument met een verfijnd analyse systeem. Ruim genomen is een jong menselijk oor gevoelig voor frequenties tussen 20 en 20.000 Hz. De bovenste gehoor grens daalt met het klimmen der jaren; op 40-jarige leeftijd ligt deze op 16.000 Hz om daarna vrij snel te dalen naar 8000 Hz. Het menselijk oor heeft niet dezelfde gevoeligheid voor elke frequentie maar heeft een zeer kromme frequentie karakteristiek (*1). Het gehoor is het meest gevoelig voor geluiden met frequenties van 2 tot 4 kilohertz (kHz) en het minst gevoelig voor extreem lage en extreem hoge frequenties. Om het nog wat ingewikkelder te maken is dit verschijnsel sterker bij zachte geluiden en minder sterk bij harde geluiden.

Van een geluid wordt de luidheid meestal aangeduid in de logaritmische eenheid decibel (dB). Tonen met een gelijk aantal dB's, maar met een verschillende frequentie worden door ons gehoor dus niet als even luid waargenomen. Dat kan men ook omkeren: tonen met verschillende frequenties, die we als even luid waarnemen, moeten een verschillende geluidsterkte hebben.



Figuur 1. Gehoorgevoeligheidskromme voor verschillende 'muzikale' geluidsterkten.

In figuur 1 is een aantal gevoeligheidscurven weergegeven voor geluidsterkten die in de muziek voorkomen, zoals ff, f, enz. (Adelung (*2)). Langs de horizontale as staat de frequentie en de daarbij de ongeveer overeenkomende C-waarde. Langs de verticale as staat de geluidsterkte in dB. Bekijken we hierin de curve voor tonen die we op mf-sterkte als even luid waarnemen, dan zien we dat de luidsterkte van bijvoorbeeld een orgelpijp C₀ (8 vt) 10 dB luider moet zijn als de orgelpijp c₃ van hetzelfde register om voor ons gehoor als even luid te worden waargenomen (de inbreng van boventonen buiten beschouwing gelaten).

Verantwoordelijk voor de luidheid van een pijp is de diamettermensuur. Het verschil van 10 dB tussen C_0 en c^3 moet dus in de diamettermensuur gecompenseerd worden. Met deze kennis gewapend bekijken we de mensuur van orgelpijpen.

Mensuur

Alle klankbepalende parameters van orgelpijpen, zoals de lengte, diameter, labiumbreedte en opsneehoogte van een pijp, worden in de *Mensuur* (lat. mensura, maatrij) vastgelegd. Misschien zou je moeten spreken van mensuurverloop omdat de mensuur juist aangeeft hoe de soortgelijke parameters van de verschillende orgelpijpen uit één register veranderen bij afnemende of toenemende toonhoogte. Dat parameters als diameter, labiumbreedte en opsneehoogte veranderen bij verschillende toonhoogten is noodzakelijk voor het gelijkmaken van het klankbeeld van de verschillende orgelpijpen binnen een register. Dat is geen eenvoudige zaak, want er zijn heel wat factoren die het klankbeeld van een orgelpijp voor ons gehoor beïnvloeden. Behalve de gevoeligheidskromme van ons gehoor is dat bijvoorbeeld ook de ruimte waarin het orgel staat. Is deze gunstig voor hoge tonen, dan zullen deze luider worden waargenomen. Of begunstigd bijvoorbeeld een kerkruimte de lage tonen, dan worden deze juist luider waargenomen. De mensuur van de pijpen moet er nu voor zorgen dat er toch een evenwichtig klankbeeld van het hele register wordt waargenomen.

Diamettermensuur

De belangrijkste mensuur bij het maken van een pijp is de diamettermensuur en daarom vaak afgekort tot alleen: de mensuur. De diamettermensuur is de verhouding tussen de diameter en de lengte van een pijp, deze is bepalend voor het klankvolume (draagkracht en luidheid) van de pijp. Naarmate de diameter -bij gelijkblijvende pijplengte- groter wordt, treedt de grondtoon sterker naar voren ten koste van de boventonen en wordt de klank voller. Zo'n pijp heeft dan 'een *wijde mensuur*'. Voorbeelden van registers met een wijde mensuur zijn: Bourdon, Holpijp, Fluit-registers. Wordt de diamettermensuur kleiner dan treden de boventonen meer naar voren en krijgt men een zwakke, heldere tot scherpe klank. We spreken dan van een '*enge mensuur*'. Voorbeelden van registers met een enge mensuur zijn: Salicionaal, Gamba, Voix Celeste.

Labiummensuur

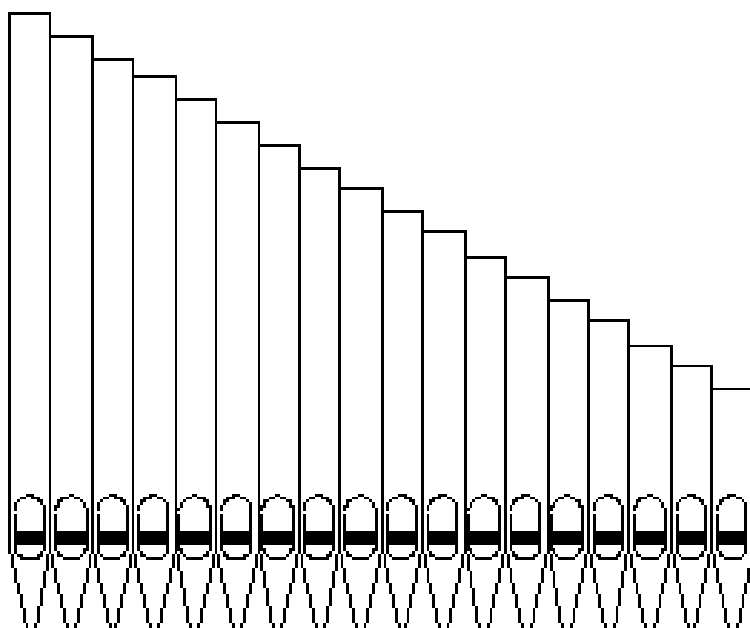
De labiummensuur is de verhouding tussen de labiumbreedte en de omtrek of ook wel de diameter van de pijp. De labiumbreedte beweegt zich om een gemiddelde van 1/4 van de omtrek of 78% van de diameter. Wordt het labium breder bij gelijkblijvende diameter van de pijp, dan wordt de klank krachtig en boventoonrijk. Bij een smaller labium wordt de klank zwak en fluitachtig. Bij vierkante (houten-) pijpen wordt deze mensuur gegeven door verhouding van de breedte en de diepte van de pijp.

De overige klankbepalende mensuren van de pijp zoals de opsneehoogte, kernspleetwijdte en voetopening zijn -hoewel eveneens van grote invloed op de klank- minder van belang bij het maken van een pijp en kunnen bij intonatie nog nader worden bepaald.

Ontstaan van de Mensuur

In de middeleeuwen maakte men zich nog niet druk over de mensuur van orgelpijpen. Een orgel had toen niet meer dan één register met maar weinig pijpen die allemaal de dezelfde diameter kregen. Als de omvang niet groter was dan twee octaven is dit voor het gehoor nog acceptabel. De doorsnede van een duivenei nam men als maat, ongeveer 24 tot 30 millimeter. De enige maat die veranderde was de lengte van de pijp. Dit geeft een starre diamettermensuur met de mensuurverhouding 1:1 (zie fig. 2). Als gevolg van de volledig gelijke diameters waren de pijpen in verhouding tot hun lengte in de bas zeer eng gemensureerd en naar de diskant toe steeds wijder, hetgeen leidde tot een zeer verschillend klankbeeld van de verschillende tonen. De bastonen klonken zwak en helder en de diskanttonen luid en vol. Bij het uitbreiden van het

register tot meer dan twee octaven moest deze manier van mensureren verlaten worden omdat de pijpen in de bas te eng werden en de pijpen in de diskant veel te wijd. Dat klankbeeld was niet meer acceptabel voor onze oren. Het bracht de vroege orgelbouwers er toe om de baspijpen wijder en de diskantpijpen enger te mensureren.



Figuur 2. Middeleeuws register pijpen met starre diametersensuur.

Het lag voor de hand een goede mensuurverhouding te zoeken die het verband vastlegde tussen de pijp diameter en de pijplengte en die voor het gehoor een homogeen klankbeeld gaf. Omdat de lengtemensuur van pijpen die een octaaf verschillen een verhouding heeft van 1:2, kreeg de diameter ook die verhouding. Aanvankelijk werd in de middeleeuwen voor de diameter 1/12de van de lengte van een pijp genomen. Bij deze manier van mensureren is het verhoudingsgetal van de diameter en de lengte van de pijp voor alle pijpen volledig gelijk. Dit was geen gekke gedachte, want natuurkundig gezien zijn nu alle pijpen klankhomogeen, dat wil zeggen: wordt van een dergelijke register pijpen het frequentiespectrum gemeten, dan heeft iedere pijp precies de zelfde boventonen, gelijk in aantal en in amplitude. Toch was al gauw te horen dat een dergelijke mensurering niet voldeed: de diskant klonk in verhouding tot de baskant veel te zwak en te scherp. Met als extra moeilijkheid dat de kleinste pijpjes met deze mensurering niet meer te maken waren. Thans weten we waarom deze mensurering niet voldeed: het verloop van de menselijke gehoorkromme komt niet overeen met een rechte lijn.

Mensuurverloop

In de middeleeuwen werd dus proefondervindelijk al vastgesteld dat bij een mensuurverhouding van 1:1 de pijpen naar de diskant toe veel te wijd en dus te luid waren, maar ook dat bij een diameterverhouding van de octaafpijpen van 1:2, de pijpen in de diskant te eng en dus te zacht waren. Een goede mensuur moest men dus tussen 1:1 en 1:2 zoeken. De orgelbouwers uit de Baroktijd vonden daarvoor verschillende mogelijkheden die ze als een bijzonder geheim bewaarden en die van bepaalde getalsverhoudingen uitging. Pas aan het begin van deze eeuw lukte het de predikant *Christhard Mahrenholz* (*3) om zo'n geheim te verklaren. Hij onderzocht in het bijzonder de mensuren van *Dom Bédos de Celles* (*4). Op grond van mathematisch-geometrische berekeningen, zeg maar op grafische wijze, ontdekte hij dat men weliswaar uitging van de verhouding 1:2, maar hierbij een constant getal optelden.

Deze constante, in het Duits Festwert, werd ook wel het *arcanum* (lat. geheim) van de orgelbouwer genoemd.

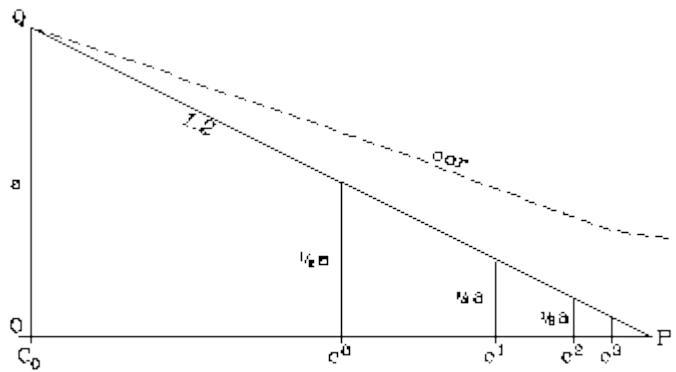
Voor een goed inzicht verplaatsen we ons naar de tijd dat orgelbouwers nog geen rekenmachine, laat staan een computer, ter beschikking hadden. Alle maten van de orgelpijpen werden geometrisch verkregen met behulp van een *mensuurdriehoek* (fig. 3).

De basis van de driehoek is de lijn O-P, in O ligt het voetpunt van C_0 . Het voetpunt van c^0 ligt precies op de helft van de lijn O-P. Het voetpunt van c^1 ligt dan precies op de helft van de lijn c^0 -P, enz.. Ook de voetpunten van de tonen binnen het octaaf kunnen op geometrische wijze bepaald worden, de beschrijving daarvan laten we hier achterwege.

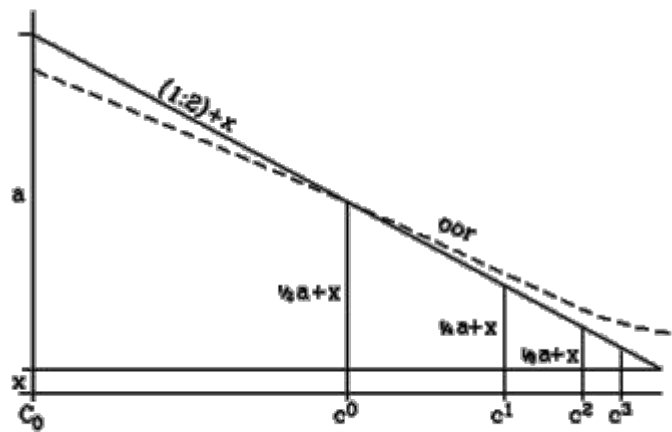
De hypotenusa van de driehoek is de lijn Q-P. Heeft de lijn O-Q de waarde a , dan worden de ordinaten van c^0, c^1, c^2, c^3 precies gesneden volgens de mensuurverhouding van 1:2, zodat de ordinaten van $c^0 = 1/2a, c^1 = 1/4a, c^2 = 1/8a, c^3 = 1/16a$, enz.. De mensuurdriehoek wordt vaak op ware grootte getekend zodat daaruit rechtstreeks de maten overgenomen kunnen worden.

In figuur 3 is ook een lijn voor gevoeligheid van het gehoor getekend. De curve heeft een verval van 10 dB tussen C_0 en c^3 volgens de curve voor tonen op mf-sterkte. Vergelijken we deze curve met de lijn voor het mensuurverloop van 1:2, dan zien we duidelijk waarom deze mensuurverhouding niet voldeed: is de luidsterkte van C_0 goed, dan zijn de pijpen naar de diskant toe te eng en dus voor het gehoor te zwak. De zwakke diskant bij deze mensuur was juist ook het probleem van de oude orgelbouwers.

De ontdekking van Mahrenholz, onder andere op grond van de metingen van Dom Bédos, was dat bij de mensuurverhouding 1:2 steeds een constante werd opgeteld, de geheime waarde x . Als we zo'n optelling voor dit register uitvoeren en het aldus verkregen mensuurverloop in een grafiek tekenen (fig. 4), dan zien we dat gemiddeld de luidsterkte van het register is verbeterd. Weliswaar is de baskant nu wat te wijd (:te luid) en de diskant nog wat te eng (:te zwak), maar gemiddeld genomen is deze mensuurverhouding voor ons gehoor meer klankhomogeen dan met het verloop 1:2.



Figuur 3. Mensuurverloop volgens de verhouding 1:2. De gestippelde lijn is de gevoeligheidskromme van het gehoor voor middelsterke geluiden.



Figuur 4. Mensuurverloop volgens de verhouding (1:2)+X. De gestippelde lijn is de gehoorkromme voor middelsterke geluiden.

In de praktijk gaat de berekening als volgt:

Pijp	C_0	c^0	c^1	c^2	c^3
diamtr. (1:2)	160	80	40	20	10 mm
const.		+ 10	+ 10	+ 10	+ 10
diamtr. (1:2)+X	170	90	50	30	20 mm

Bepalen we van de nieuwe diametermaten de mensuurverhoudingen dan zijn deze niet meer 1:2, maar kleiner.

$$c^0 : C_0 = 90 : 170 = 1 : 1,88$$

$$c^1 : c^0 = 50 : 90 = 1 : 1,8$$

$$c^2 : c^1 = 30 : 50 = 1 : 1,66$$

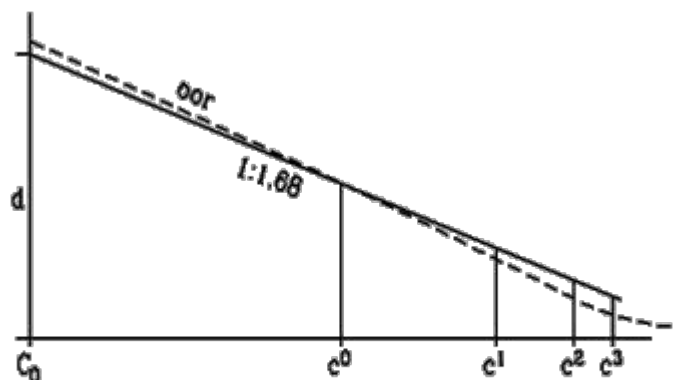
$$c^3 : c^2 = 20 : 30 = 1 : 1,5$$

Het toevoegen van een constante had dus inderdaad als resultaat dat de mensuurverhouding tussen de 1:1 en de 1:2 kwam te liggen. Dit gaf vele nieuwe mogelijkheden. Men kon bijvoorbeeld de constante variabel maken door bij de baskant een andere constante optellen als bij de diskant, of een constante aftrekken. Ook nu nog worden vele diametermensenuren volgens deze methode berekend en uit de mensuurdriehoek geometrisch overgenomen.

Normmensuur

De eerste die zich wetenschappelijk met mensuren bezig hield, was prof. Johan Gottlob Töpfer (1791-1870). Töpfer ging bij zijn berekeningen uit van de pijpoppervlakte, dat in tegenstelling tot de ééndimensionale eenheden als lengte en diameter, een tweedimensionaal vlak is. Ten opzichte van de diameter neemt de oppervlakte dan ook in het kwadraat toe. Hij berekende een mensuur met een oppervlakte verhouding van 1:8. Door proeven met deze mensuur te doen stelde hij vast dat nu alle pijpen van een register hetzelfde klankbeeld gaven.

De oppervlakte mensuurverhouding van 1:8 komt overeen met een diameter mensuurverhouding van $1:\sqrt[4]{8} = 1:1,68$. In figuur 5 is dit mensuurverloop getekend samen met de gevoeligheidscurve van het gehoor voor tonen op mf-sterkte. Het verloop van beide lijnen is praktisch gelijk en we kunnen daaruit concluderen dat de mensuurverhouding van Töpfer een gelukkige greep is geweest, mits het register een middelsterke luidheid heeft. Een mensuurtabel voor een middelwijde (:middelsterke) Prestant gaat uit van een diameter voor de C_0 -pijp van 155,5 mm. Deze maat werd door de *Deutschen Orgelrat* in 1927 als norm vastgesteld en komt overeen met de diameter van de Prestant- C_0 -pijp van Dom Bédos. Uitgaande van de mensuurverhouding van 1:1,68 geeft dit ons de mensuurtabel voor de diametermensuur van de Normprestant, en daarom aangeduid met normmensuur, NM (tabel 1). Wordt een register pijpen volgens deze mensuur gebouwd, dan is het register klankhomogeen, dat wil dus zeggen dat elke pijp voor ons gehoor even luid klinkt.



Figuur 5. Mensuurverloop volgens Töpfer met de verhouding 1:1,68. Volgens deze lijn verloopt de Normmensuur (NM). De gestippelde lijn is de gevoeligheidskromme van het gehoor voor middelsterke geluiden.

Normmensuur en Halftonen (HT)

De afstand tussen de getallen in de tabel is een halve toon van het octaaf en daarom aangeduid met Halftoon (HT). Door een willekeurig ander register te vergelijken met de maten van de normmensuur kunnen we vaststellen of de mensuur wijder of enger is dan de Normprestant en hoeveel HT dit afwijkt.

De pijp c^1 van de Normprestant heeft een diameter van 54,9 mm. Een register, bijvoorbeeld een *Flute*, waarvan de c^1 -pijp een diameter heeft van 68,2 mm, heeft dus een bredere mensuur. De diameter 68,2 mm komt overeen met de g^0 -pijp van de Normprestant (zie tabel). De diameter van de pijp g^0 ligt 5 HT eerder dan c^1 en daarmee hebben we de mensuur voor deze pijp vastgelegd: de pijp is 5 HT wijder gemensureerd als de Normprestant, afgekort +5 HT. Als de diametermensuur van dit register een zelfde verloop heeft als de NM, dus 1:1,68, dan zijn alle pijpen van de Flute 5 HT wijder. De maten van het hele register zijn nu eenvoudig uit de normmensuur over te nemen.

	C ₁	C ₀	c ⁰	c ¹	c ²	c ³	c ⁴	c ⁵	c ⁶
	16'	8'	4'	2'	1'	1/2'	1/4'	1/8'	1/6'
C	261,5	155,5	92,4	54,9	32,6	19,3	11,5	6,8	4,0
Cis	250,4	148,9	88,5	52,6	31,3	18,6	11,0	6,5	3,9
D	239,8	142,6	84,7	50,4	29,9	17,8	10,5	6,3	3,7
Dis	229,6	136,5	81,1	48,2	28,7	16,9	10,1	6,0	3,6
E	219,9	130,7	77,7	46,2	27,4	16,3	9,7	5,7	3,4
F	210,6	125,2	74,4	44,2	26,3	15,6	9,3	5,5	3,3
Fis	201,6	119,9	71,3	42,3	25,2	14,9	8,8	5,2	3,1
G	193,1	114,8	68,2	40,5	24,1	14,3	8,5	5,0	3,0
Gis	184,9	114,8	65,3	38,8	23,1	13,7	8,1	4,8	2,8
A	177,1	105,3	62,6	37,2	22,1	13,1	7,8	4,6	2,7
Ais	169,5	100,8	59,9	35,6	21,1	12,6	7,4	4,4	2,6
B	162,7	96,5	57,4	34,1	20,2	12,0	7,1	4,2	2,5

Tabel 1. Diametermensuur van de 'Norm' Prestant in mm. (Mahrenholz)

Heeft een register niet een mensuurverloop van 1:1,68 dan zou men de maat van elke pijp afzonderlijk in + of - HT kunnen vaststellen door het vergelijken met de normmensuur. In de praktijk beperkt men zich door bijvoorbeeld alle C-pijpen te nemen. De mensuur van het register uit ons eerdere voorbeeld ziet er dan als volgt uit:

Pijp	C ₀	c ⁰	c ¹	c ²	c ³	
diam. 1:2	160	80	40	20	10	mm
HT afwijking	+0,5	-3	-7	-11	-15	HT
diam. (1:2)+x	170	90	50	30	20	mm
HT afwijking	+2	-0,5	-2	-2	+1	HT

De notatie in HT geeft direct inzicht in het mensuurverloop van het register en daarmee ook in het klankkarakter. Bij het gegeven voorbeeld kunnen we uit de HT-aanduiding opmaken dat het register volgens de mensuurverhouding 1:2 in de diskant veel te zwak is. Door toevoegen van de constante wordt het register meer klankhomogeen.

De volgende lijst met diametermaten van hoofdwerk Prestanten 8vt kan in dit verband als stof voor enige studie dienen (tabel 2a).

Pijp	C ⁰	c ₀	c ₁	c ₂	c ₃	
A. Schnitger 1687/96	144	93	48	28	17	mm
J.A. Silbermann 1750	157	97	55	36	22	mm
F. Dom Bédos 1766	156	84	48	30	21	mm
A. Cavallé-Coll 1860/80	144	95	55	32	19	mm
Holland*	144	85	48	28	16	mm

Tabel 2a. Diametermaten van Prestant registers van bekende orgelbouwers.
Bron: Bormann/Bruder (*5)

*Gemiddelde van 305 metingen (Oosterhof-Bouman).

De millimeter maten in tabel 2a geven de geoefende orgelbouwer inzicht in de mensurering van de betreffende orgelbouwers. Als we dezelfde tabel opstellen in HT, dan geeft dit ook zonder oefening inzicht in het gebruikte mensuurverloop. Stellen we daarbij ter vergelijking de diametermensuur van c₁ op 0 HT, dan geeft dit tabel 2b

Pijp	C ⁰	c ₀	c ₁	c ₂	c ₃	
A. Schnitger 1687/96	+1	+3	0	-1	0	HT
J.A. Silbermann 1750	0	+1	0	+2	+3	HT
F. Dom Bédos 1766	+3	+1	0	+1	+5	HT
A. Cavallé-Coll 1860/80	-2	+1	0	0	0	HT
Holland	+1	0	0	-1	-1	HT

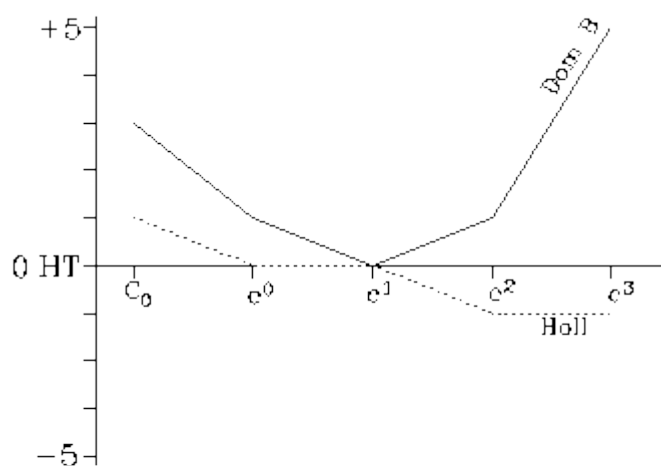
Tabel 2b. De millimetermaten van tabel 2a uitgedrukt in HT, waarbij c¹ op 0 HT is gesteld.

Tabel 2b laat in één oog opslag zien dat Prestant van Silbermann in de diskant wijd gemensureerd is en daar dus luider zal klinken. Dom Bédos neemt zijn Prestant in het hoogste octaaf nog wijder en heeft daarbij ook nog een stevige bas.

De overige mensuren wijken weinig af van de normmensuur. Bormann geeft in zijn boek over Bruder nog een aantal voorbeelden die zich eveneens rond de normmensuur bewegen, een indirect bewijs voor de geldigheid van de laatste. Overigens zullen geleidelijke HT-schommelingen tot 4 HT ($= \pm 1,5$ db) nauwelijks de luidheid beïnvloeden. Ze zullen echter wel bijdragen in de klankkleur-verandering van een register.

De orgelbouwer Klotz (*6) neemt de normmensuur als uitgangspunt, het is de 0-lijn waartegen hij alle afwijkingen in HT-waarden uitzet. *"Die sichtbare Aufzeichnung im Vergleich mit den Normprinzipal auf solchen Mensurdiagramm gibt den besten Aufschluss über die Mensurgestaltung einer Pfeifenreihe."* Vrij vertaald: 'Vergelijken met de normmensuur geeft het beste inzicht in de mensuur van een register'. Passen we dit toe bij een paar voorbeelden uit de getallen van tabel 2b dan krijgen we een grafiek volgens figuur 6.

In deze grafiek zijn grafisch de hoogtepunten (+ HT) of dieptepunten (- HT) van een register zichtbaar. Hierdoor is duidelijk te zien dat de Hollandse orgelbouwers zich goed hielden aan de normmensuur en dus onze gehoorcurve volgden. Dom Bedos wijkt daar ruim vanaf. Het aanbrengen van hoogtepunten of dieptepunten is afhankelijk van de smaak van de orgelbouwer, maar ook in hoe verre de akoestische eigenschappen van de ruimte in de mensuur verwerkt zijn. Begunstigt een kerkruimte bijvoorbeeld de lage tonen, dan moet de orgelbouwer voor de baskant engere mensuren (-HT) kiezen. Is daarentegen de ruimte gunstig voor hoge tonen, dan moet de diskant enger gemensureerd zijn. Het door Klotz voorgestelde grafische HT-diagram maakt dergelijke aanpassingen inzichtelijk.



Figuur 6. HT-diagram naar Klotz voor de prestantregisters van Dom Bedos en Holland (uit tabel 2b).

Zin en onzin van NM en HT

Met behulp van de normmensuur en de afwijking in halftonen kan men de maten van een register vastleggen. Bormann (*7) gebruikt deze methode bijvoorbeeld voor het aangeven van de registers bij een huisorgel. De opgegeven afwijkingen schommelen daarbij van -19 HT tot +6 HT. Zijn de afwijking van bijvoorbeeld alle c-pijpen gegeven, dan geeft dit een indruk van het klankbeeld van dat register. Neemt bijvoorbeeld de afwijking in de diskant in HT toe, dan zal zo'n register in de diskant sterker klinken waardoor de 'sopraanpartij' altijd benadrukt wordt.

Is de HT-afwijking voor alle c-pijpen gelijk, dan is het niet nodig de maten voor elke pijp afzonderlijk uit te rekenen en kan men de maten voor alle pijpen van het register direct uit de normmensuurtabel overnemen. Is de afwijking bijvoorbeeld -10 HT, dan heeft de C^0 -pijp de diameter van $Ais^0 = 100,8$ mm, Cis^0 wordt dan $B^0 = 96,5$ mm, enz.. De labiumbreedte is bij de normmensuur steeds 1/4 van de omtrek.

Is de HT-afwijking voor de c-pijpen verschillend, dan is het niet mogelijk om de maten van de overige pijpen direct uit de normmensuurtabel over te nemen. Immers, is bijvoorbeeld gegeven: $c^0 +1Ht$ en $c^1 -1HT$, dan geeft de normmensuurtabel 13 maten voor de 11 tussenliggende tonen, waarmee de tabel onbruikbaar is geworden. In zo'n geval kan men alleen de maten van de gegeven pijpen uit de normmensuurtabel overnemen. Deze maten worden dan uitgezet op de bijbehorende ordinaten in de mensuurdriehoek. Zijn de gegeven punten met een lijn verbonden, dan is het snijpunt van deze lijn met de andere ordinaten de maat voor de overige pijpen van het register. Het verdient de voorkeur om de mensuurdriehoek in schaal 1:1 te tekenen, zodat alle waarden, bijvoorbeeld met behulp van een passer, direct van de ordinaten overgenomen kunnen worden. Uiteraard kan men ook gebruikmaken van een rekenmachine, c.q. computer.

Verwijzingen vanuit het artikel:

*1 Bouwbrief 54, 1989, Computergebruik en orgelpijpmensuren.

*2 Adelung, Wolfgang, Einführung in den Orgelbau, 4de druk 1979

*3 Mahrenholz, Christhard, Die Berechnung der Orgelpfeifenmensuren vom Mittelalter bis zur Mitte des
19. Jahrhunderts, 1938. (herdruk 1968)

*4 Bédos de Celles, Dom, L'art du facteur d'orgues 1766-78, (herdruk 1963).

*5 Bormann, Karl, Orgel- und Spieluhrenbau, 1968

*6 Klotz, Hans, Das Buch von der Orgel, 7de druk 1965

*7 Bormann, Karl, Heimorgelbau, 1972