



Kragten Design

Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
Nederland

*Gespecialiseerd in het ontwerpen van elektriciteit
opwekkende windmolens en PM-generatoren*

ing. Adriaan Kragten

telefoon: 0413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl
bank nr. : NL 72 INGB 0002062399
BTW nr.: 064460447B01
Kamer van Koophandel nr. : 17241478

Adriaan Kragten, Sint-Oedenrode 13-2-2015, herzien 30-10-2016

De Quadrofoon, een nieuw blaasinstrument met vier ventielen

1 Inleiding

De quadrofoon werd al eerder beschreven in een KD-notitie van 28-9-2007. Bij deze versie is het instrument uitgevoerd met vier normale ventielen die in lijn staan en waarbij er een extra grote ruimte zit tussen ventiel 2 en ventiel 3 voor de duim van de linkerhand. Recentelijk ontstond het idee om de ventielen in twee blokken van twee naast elkaar te plaatsen en om een geheel nieuw soort ventielen te gebruiken. Deze nieuwe versie van de quadrofoon wordt hierbij beschreven en berekend.

Op koperinstrumenten kunnen zonder de ventielen te gebruiken, alleen hogere harmonischen van de grondtoon geproduceerd worden. Deze tonen, maar ook alle tonen waarvoor ventielen nodig zijn, kunnen worden aangeduid door het rangnummer van de harmonische gevolgd door de naam van de toon. Het normale bereik van een koperinstrument loopt tot de achtste harmonische maar zeer goede blazers komen tot de twaalfde of zelfs wel hoger. De tonen zijn dan: (1C), 2C, 3G, 4C, 5E, 6G, (7Bes), 8C, 9D, 10E, (11Fis) en 12G. De grondtoon 1C is erg laag en moeilijk te spelen en wordt daarom niet gebruikt. De 7Bes is te laag en de 11Fis is veel te hoog. De te vermijden tonen staan daarom tussen haakjes.

Bij de gebruikelijke aanduiding van de tonen van een ventielinstrument staat er een nummer achter de naam van de toon. Een 2C komt overeen met een C1. Een 4C komt overeen met een C2. Een 8C komt overeen met een C3. Het voordeel van mijn aanduiding is dat gelijk klinkende tonen met verschillende vingerzetting een verschillende naam hebben. Een G1 kan los gespeeld worden maar ook met 1 + 4. Los noem ik deze toon een 3G. Met 1 + 3 noem ik deze toon een 4G.

Het is opmerkelijk dat alle moderne koperinstrumenten, uitgezonderd de trombone, gebruik maken van drie schuif- of drie draaiventielen om de zes tonen die liggen tussen de 2C en de 3G te kunnen spelen. Ventiel 1, 2 en 3 worden bediend door respectievelijk de wijsvinger, de middelvinger en de ringvinger van de rechterhand (met uitzondering van de hoorn die linkshandig bespeeld wordt). Een ingedrukt ventiel voegt een stukje ventielbuis toe aan de hoofdbuislengte waardoor de toon lager wordt. De volgende verlagingen worden veroorzaakt door een ingedrukt ventiel en door combinaties van ingedrukte ventielen: Ventiel 1 verlaagt een hele toon. Ventiel 2 verlaagt een halve toon. Ventiel 3 verlaagt anderhalve toon als de ventielstembuis geheel ingedrukt is. Bij een optimaal afgestelde ventielstembuis wordt de toon echter te laag en ventiel 3 wordt daarom normaal niet alléén gebruikt. Ventiel 1 + 2 verlaagt anderhalve toon. Ventiel 2 + 3 verlaagt twee tonen. Ventiel 1 + 3 verlaagt twee-en-een-halve toon. Ventiel 1 + 2 + 3 verlaagt drie tonen.

Een gevolg van het gebruik van slechts drie ventielen en een onzuiver derde ventiel is dat er dus twee of drie ventielen gecombineerd moeten worden voor een verlaging van meer dan twee halve tonen. Dit heeft twee belangrijke nadelen:

- 1 Een combinatie van ventielen kan niet zuiver zijn als alle ventielen op zich zuiver zijn. Immers, de door een bepaald ventiel toegevoegde lengte die correct is met betrekking tot de hoofdbuislengte is te kort als de hoofdbuislengte al door een ander ventiel verlengd is. Om de onzuiverheid voor de lage tonen te minimaliseren worden de ventielstembuizen van drieventielsinstrumenten zonder triggers normaal zodanig afgesteld dat 1 zuiver is, 2 zuiver is en 1 + 3 zuiver is. Dit heeft echter als gevolg dat 1 + 2, 0,6 % te hoog is, 2 + 3, 0,9 % te laag is en dat 1 + 2 + 3, 1,4 % te hoog is. Een afwijking van 6 % komt overeen met een halve toon dus een afwijking van 1,4 % komt overeen met ongeveer een kwart van een halve toon wat behoorlijk veel is. Een te hoge toon is met de embouchure gemakkelijker te verlagen dan dat een te lage toon te verhogen is. Het 0,6 % te hoog zijn van de combinatie 1 + 2 is daarom zeer gemakkelijk met de embouchure te compenseren. Het 0,9 % te laag zijn van de combinatie 2 + 3 is ongeveer even moeilijk met de embouchure te compenseren als het 1,4 % te hoog zijn van de combinatie 1 + 2 + 3 waardoor de gegeven afstelling optimaal is voor een instrument zonder triggers.
- 2 Het is speeltechnisch lastig om snelle wisselingen te maken voor wisselingen waarbij de ringvinger betrokken is. De wijsvinger kan het gemakkelijkst onafhankelijk van de andere vingers bewogen worden. De lastigste wisseling is van 2 naar 1 + 3, zoals nodig om na een 2B een 3D te spelen. Ook de wisseling van 2 naar 1 + 2 + 3, zoals nodig om na een 2B een 3Cis te spelen, is lastig.

De quadrofoon heeft deze beide nadelen niet omdat hij uitgevoerd is met vier ventielen. De ventielen worden genummerd met 1, 2, 3 en 4. Ventiel 1 wordt bediend door de wijsvinger van de rechterhand. Ventiel 2 wordt bediend door de middelvinger van de rechterhand. Ventiel 3 wordt bediend door de wijsvinger van de linkerhand. Ventiel 4 wordt bediend door de middelvinger van de linkerhand.

Ventiel 1 verlaagt een hele toon en ventiel 2 verlaagt een halve toon wat dus hetzelfde is als bij een normaal ventielinstrument. Ventiel 3 verlaagt een hele toon en ventiel 4 verlaagt een halve toon wat vergelijkbaar is met ventiel 1 en 2. Ventiel 3 en 4 komen dus in de plaats van ventiel 3 van een normaal ventielinstrument. Wanneer de ventielstembuizen de juiste lengte hebben blijkt voor de quadrofoon een veel hogere zuiverheid voor de lage tonen gerealiseerd te kunnen worden dan voor een drieventielsinstrument. Dit zal in hoofdstuk 2 worden aangetoond.

Ventielinstrumenten zijn behalve door combinatie van ventielen ook onzuiver door afwijkingen van bepaalde natuurtonen. De 7^e en de 11^e harmonische zijn daarom niet bruikbaar maar de 5^e en de 10^e harmonischen die wel gebruikt worden, zijn 0,8 % te laag. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de gelijkzwevende stemming zuiver is. Een onzuiverheid van een bepaalde natuurtoon kan versterkt of juist verminderd worden door de onzuiverheid van een bepaalde ventielcombinatie.

Er zijn nog meer oorzaken van onzuiverheid zoals bijvoorbeeld een verkeerd mondstuk, verstoringen van de stroombuis door bijvoorbeeld waterkleppen of een onjuiste toename van de diameter van de hoofdbuis in de richting van de beker, maar er wordt vanuit gegaan dat het instrument zodanig ontworpen is dat deze effecten verwaarloosd mogen worden. Bij de quadrofoon wordt de onzuiverheid, die bij een drieventielsinstrument het gevolg is van combinaties met het derde ventiel, voorkomen.

De bouw van de quadrofoon lijkt op die van instrumenten met drie ventielen en in beginsel is een hele reeks instrumenten mogelijk van contrabas tot sopraan. Voor een eerste prototype wordt voorlopig echter uitgegaan van de hoofdbuislengte van een bugel of een trompet. Bij de bouw van het instrument zal rekening gehouden moeten worden met het feit dat het instrument met twee handen bespeeld, maar ook met twee handen gedragen zal moeten worden. Het instrument kan vastgehouden worden met de duim en de pink van beide handen.

2 Bepaling van de zuiverheid en vergelijking met een drieventielsinstrument

Voor een bepaalde harmonische is de frequentie of toonhoogte omgekeerd evenredig met de buislengte. Volgens de gelijkzwevende stemming is voor verlaging van een halve toon een nieuwe buislengte l nodig die een factor $2^{1/12}$ ofte wel 1,0595 groter is dan de oorspronkelijke buislengte L . Voor verlaging van twee halve tonen is een nieuwe buislengte l nodig die een factor $2^{2/12} = 1,1225$ groter is. Voor verlaging van drie halve tonen is een nieuwe buislengte nodig die een factor $2^{3/12} = 1,1892$ groter is, enz. Voor een verhoging met een halve toon geldt dezelfde factor $2^{1/12}$ alleen moet de buislengte dan met deze verhouding ingekort worden.

Voor 0 tot 6 halve tonen verlaging werd de theoretische buislengte l berekend als functie van L en uitgezet in tabel 1. Door aanliggende waarden van l van elkaar af te trekken vinden we de stapsgewijze theoretische lengtetoeename m die ook vermeld wordt in tabel 1. Door l te verminderen met de oorspronkelijke buislengte L vinden we de totale theoretische lengtetoeename n die ook vermeld wordt in tabel 1. L , l , m en n worden weergegeven in fig. 1.

verlaging	theoretische buislengte l	stapsgewijze theor. lengtetoeename m	totale theoretische lengtetoeename n
geen	$l_0 = 1,0000 L$	$m_0 = 0$	$n_0 = 0$
1 halve toon	$l_1 = 1,0595 L$	$m_1 = 0,0595 L$	$n_1 = 0,0595 L$
2 halve tonen	$l_2 = 1,1225 L$	$m_2 = 0,0630 L$	$n_2 = 0,1225 L$
3 halve tonen	$l_3 = 1,1892 L$	$m_3 = 0,0667 L$	$n_3 = 0,1892 L$
4 halve tonen	$l_4 = 1,2599 L$	$m_4 = 0,0707 L$	$n_4 = 0,2599 L$
5 halve tonen	$l_5 = 1,3348 L$	$m_5 = 0,0749 L$	$n_5 = 0,3348 L$
6 halve tonen	$l_6 = 1,4142 L$	$m_6 = 0,0794 L$	$n_6 = 0,4142 L$

tabel 1 Verloop van l , m en n als functie van de verlaging

Aan het verloop van m is goed te zien dat de vereiste lengtetoeename steeds groter wordt naarmate de buislengte al toegenomen is door een eerdere verlenging. In het verleden zijn er diverse methodes bedacht om de onzuiverheid te verminderen. Een zekere onzuiverheid is op te vangen door verandering van embouchure waarbij het gemakkelijker is om een toon te verlagen dan om een toon te verhogen. De meest gangbare huidige technische methode is om triggers te gebruiken waarmee een ventielbuislengte tijdelijk verlengd kan worden als een bepaalde combinatie te hoog is. Het gebruik van triggers kost echter tijd waardoor een trigger alleen gebruikt kan worden voor lange tonen.

Een andere oplossing is compensatie van het derde ventiel. Hierbij loopt de stembuis van het derde ventiel door extra boringen in het eerste en het tweede ventiel waardoor extra stukjes ventielbuis worden bijgeschakeld. Doordat deze buisjes een minimale lengte moeten hebben is deze methode alleen geschikt voor lange en dus lage instrumenten. Een nadeel is dat de ventielen behoorlijk wat zwaarder worden. Door mij werd ook een compenserend systeem bedacht dat geschikt is voor korte instrumenten zoals een trompet maar dit vereist een totaal nieuwe ventielconstructie.

Ook is het mogelijk om zes i.p.v. drie ventielen te gebruiken waardoor ventielen niet of maar beperkt gecombineerd behoeven te worden. Daardoor is een zeer hoge zuiverheid mogelijk is. Dergelijke instrumenten werden al in de 19^e eeuw ontwikkeld door Adolf Sax die ook de uitvinder is van de saxofoon maar omdat ze behoorlijk zwaar zijn, zijn ze geen succes geworden. Deze instrumenten zijn wel gebouwd en nog altijd te zien in het muziekinstrumentenmuseum MIM in Brussel. Door mij werden ook een instrument ontworpen met zes ventielen, sixel genaamd (zie rapport De Sixel van 13-2-2015), dat echter nog niet gebouwd is. Een belangrijk nadeel is de totaal andere speelwijze.

Bij de quadrofoon is het gewicht maar iets groter dan dat van een instrument met drie ventielen en de speelwijze is alleen anders voor de lage tonen. Daarom maakt de quadrofoon volgens mij een grotere kans om werkelijk ontwikkeld en toegepast te worden.

Om met vier ventielen een maximale zuiverheid te realiseren moeten de ventielstembuizen een bepaalde lengte hebben. De volgende afstelling blijkt het beste resultaat op te leveren: Ventiel 1 zuiver. Ventiel 2 zuiver. Ventiel 1 + 2 + 3 zuiver. Ventiel 1 + 2 + 4 zuiver. De lengte van de ventielstembuizen 1, 2, 3 en 4 word respectievelijk a, b, c en d genoemd. De totale werkelijke lengtetoename wordt o genoemd. De totale werkelijke buislengte wordt p genoemd. De waarden voor a, b, c en d worden bepaald m.b.v. tabel 1 en de aangenomen afstellingen. o, p, a, b, c en d worden ook weergegeven in fig. 1. In fig. 1 heeft het bovenste plaatje betrekking op een traditioneel instrument met drie ventielen. Het middelste plaatje geeft de theoretisch vereiste verlengingen weer en het onderste plaatje geeft de verlengingen weer voor de quadrofoon. De figuren zijn op schaal getekend maar wel met rechte buizen.

Ventiel 1 zuiver geeft dat $a = n_2 = 0,1225 \text{ L}$.

Ventiel 2 zuiver geeft dat $b = n_1 = 0,0595 \text{ L}$.

Ventiel 1 + 2 + 3 zuiver geeft dat $a + b + c = n_5 = 0,3348 \text{ L}$.

Ventiel 1 + 2 + 4 zuiver geeft dat $a + b + d = n_4 = 0,2599 \text{ L}$.

$c = n_5 - a - b = 0,3348 \text{ L} - 0,1225 \text{ L} - 0,0595 \text{ L} = 0,1528 \text{ L}$.

$d = n_4 - a - b = 0,2599 \text{ L} - 0,1225 \text{ L} - 0,0595 \text{ L} = 0,0779 \text{ L}$.

Vanwege de aangenomen afstelling geldt: $o_1 = n_1 = 0,0595 \text{ L}$, $o_2 = n_2 = 0,1225 \text{ L}$,

$o_4 = n_4 = 0,2599 \text{ L}$ en $o_5 = n_5 = 0,3348 \text{ L}$. Daarom geldt: $p_1 = l_1 = 1,0595 \text{ L}$, $p_2 = l_2 = 1,1225 \text{ L}$,

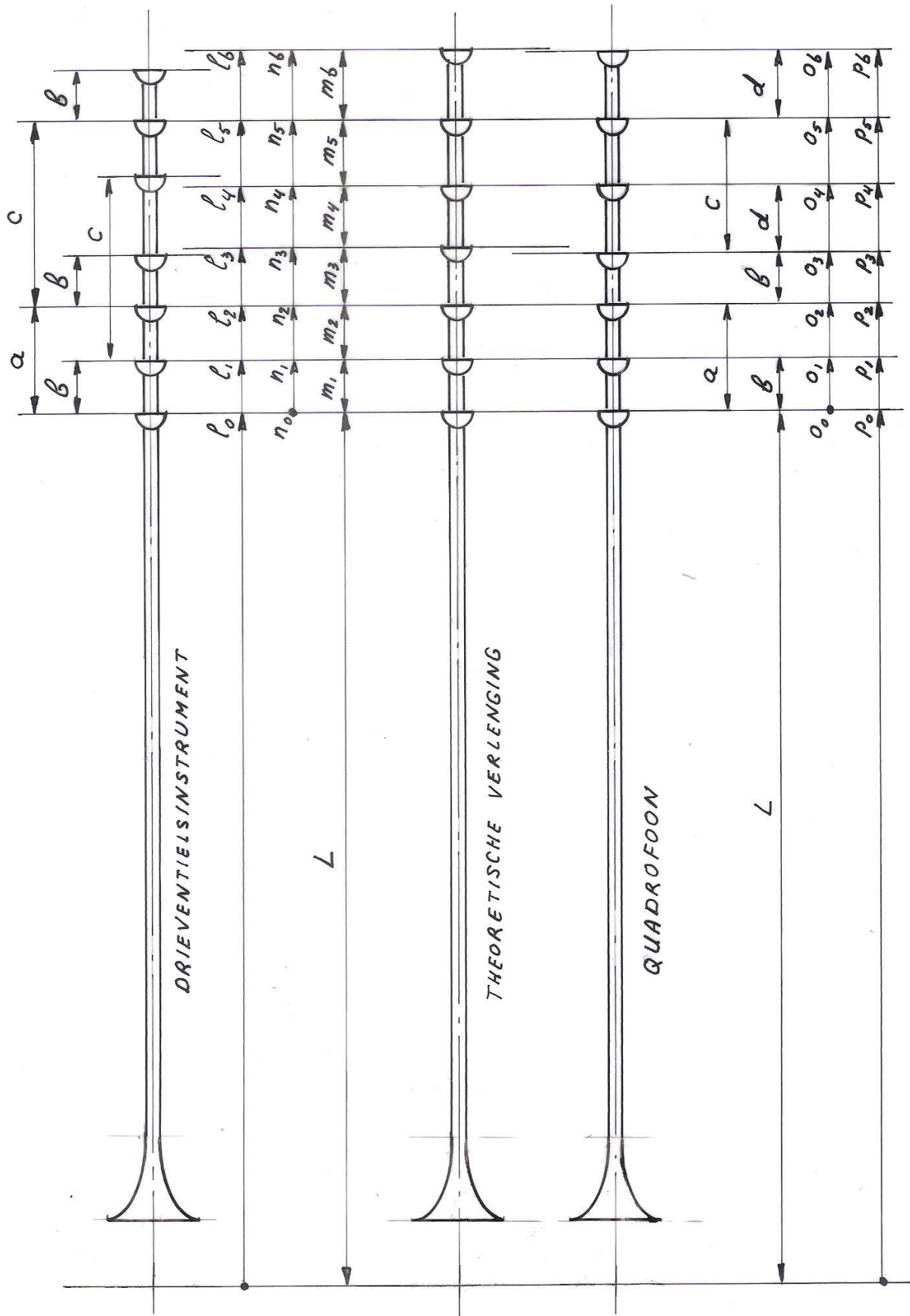
$p_4 = l_4 = 1,2599 \text{ L}$ en $p_5 = l_5 = 1,3348 \text{ L}$.

$o_3 = a + b = 0,1225 \text{ L} + 0,0595 \text{ L} = 0,1820 \text{ L}$.

$o_6 = a + b + c + d = 0,1225 \text{ L} + 0,0595 \text{ L} + 0,1528 \text{ L} + 0,0779 \text{ L} = 0,4127 \text{ L}$.

$p_3 = L + o_3 = L + 0,1820 \text{ L} = 1,1820 \text{ L}$.

$p_6 = L + o_6 = L + 0,4127 \text{ L} = 1,4127 \text{ L}$.



figuur 1 Buislengtes voor een drieventielsinstrument en een quadrofoon

3 Berekening van de vereiste ventielbuislengtes in mm

In hoofdstuk 2 wordt de ventielbuislengtes al berekend als functie van de theoretische lengte van de hoofdbuis L. Deze rekenmethode geldt voor een buis met een constante diameter. Omdat de ventielbuizen in het deel van het instrument liggen waar de buisdiameter nog nagenoeg constant is, mag deze theorie worden toegepast. De lengte van de hoofdbuis L kan op diverse manieren bepaald worden. Het lijkt voor de hand te liggen om de hoofdbuis van een bestaande bugel of trompet nauwkeurig op te meten. Echter, de boring verloopt conische na het ventielblok en mondt aan het einde uit in de beker. Dit veroorzaakt eindeffecten waardoor de grondtoon aanzienlijk lager is dan op grond van de opgemeten buislengte verwacht mag worden.

Een veel nauwkeuriger resultaat wordt verkregen als de buislengte van het derde ventiel opgemeten wordt en die lengte dan te gebruiken om L mee te berekenen. De metingen werden in eerste instantie uitgevoerd aan een Yamaha YFH 631 bugel (zonder triggers). Eerst werd m.b.v. een keyboard gecontroleerd of het derde ventiel met ingeschoven ventielstembuis precies drie halve tonen verlaging geeft. Dit blijkt niet het geval te zijn. De toon is iets te laag. Voor het normale gebruik is dit niet erg omdat het derde ventiel niet alleen gebruikt wordt. De stembuis van dit ventiel moet zelfs nog ongeveer 13 mm uitgetrokken worden om 1 + 3 zuiver te laten klinken. Maar de bugel is hierdoor niet geschikt voor de meetproeven.

De metingen werden verder uitgevoerd aan een Getzen 300 trompet waarvan een volledig ingeschoven stembuis van het derde ventiel wel een zuivere verlaging van drie halve tonen oplevert. Omdat beide instrumenten in Bes staan wordt er vanuit gegaan dat de ventielbuizen van een trompet en een bugel voor eenzelfde verlaging even lang zijn. Vervolgens werd de lengte van de ventielbuis opgemeten over het hart van de buis. Hier werd de lengte van de twee ventielboringen aan toegevoegd waar de lucht doorloopt als het ventiel ingedrukt is. De lengte van de ventielboring waar de lucht doorloopt als het ventiel niet is ingedrukt werd hier weer vanaf getrokken. De totale lengte blijkt 280 mm te zijn. In tabel 1 is te zien dat $n_3 = 0,1892$ L voor een zuiver 3^e ventiel. Dit geeft dat $L = 280 / 0,1892 = 1480$ mm.

Een andere manier is om L te bepalen op basis van de vereiste frequentie f van de 2^e harmonische C. Voor de 2^e harmonisch C bevinden zich in de buis twee knopen wat inhoudt dat de golflengte λ gelijk is aan de buislengte L. Omdat een trompet in Bes staat klinkt een toon die voor een trompet als C genoteerd wordt gelijk aan de Bes van een piano. Een piano A heeft een frequentie van 440 Hz of een factor 2 hoger of lager. Een Bes is een halve toon hoger dan een A en heeft daardoor een frequentie die een factor $2^{1/12} = 1,05946$ hoger is dan een A. Dit komt neer op een frequentie van 466,164 Hz of een factor 2 hoger of lager. De frequentie van de 2^e harmonische C van een trompet blijkt een factor 2 lager te zijn wat inhoudt dat de frequentie 233,082 Hz is. De golflengte λ wordt gegeven door de formule:

$$\lambda = v / f \quad (\text{m}) \quad (3)$$

Hierin is v de geluidssnelheid. De geluidssnelheid is ongeveer 340 m/s voor droge lucht van 15 °C. Echter de gemiddelde temperatuur van de lucht in een trompet is hoger dan 15 °C en de lucht is verzadigd met waterdamp. Door mij werd de luchttemperatuur t.p.v. het middelste ventiel gemeten nadat er een poos op het instrument geblazen was. Deze temperatuur blijkt ongeveer 25 °C ofte wel 298 °K te zijn. De geluidssnelheid v wordt gegeven door de formule:

$$v = 64,2 \pi (\kappa \times T / d) \quad (\text{m/s}) \quad (4)$$

Hierin is κ een constante die voor lucht 1,40 bedraagt. T is de luchttemperatuur in °K. d is de relatieve dichtheid van lucht t.o.v. waterstof (dimensieloos). Voor droge lucht bedraagt deze waarde 14,4. De absolute dichtheid ρ van droge lucht van 25 °C bedraagt 1,185 kg/m³. De absolute dichtheid van met waterdamp verzadigde lucht van 25 °C bedraagt 1,170 kg/m³.

De met waterdamp verzadigde lucht is dus een factor 0,9873 lichter dan droge lucht. Daardoor is de relatieve dichtheid van met waterdamp verzadigde lucht van 25 °C ook een factor 0,9873 lager dan die van droge lucht en bedraagt daardoor 14,22.

Invulling van de gevonden waarden voor κ , T en d in formule 4 geeft dat $v = 347,74$ m/s. Invulling van de gevonden waarden voor v en f in formule 3 geeft dat $L = \lambda = 1,492$ m = 1492 mm. Deze berekende waarde op basis van de vereiste frequentie en de geluidssnelheid in de buis ligt zeer dicht bij de waarde van $L = 1480$ mm die bepaald werd op basis van de lengte van de ventielbuis van het derde ventiel.

Wanneer L bepaald werd door de werkelijke lengte van de hoofdbuis van een trompet op te meten vinden we dat $L = 1367$ mm. Dit is aanzienlijk korter dan de twee eerder berekende waarden wat betekent dat het eindeffect van de beker een grote invloed heeft. Voorlopig wordt aangenomen dat de gevonden waarde voor L op basis van de lengte van de ventielbuis van het derde ventiel juist is en dat dus geldt dat $L = 1480$ mm.

Deze waarde van L zal nu gebruikt worden om de lengtes van de ventielbuizen voor de quadrofoon mee te berekenen. De lengtes van de ventielbuizen 1, 2, 3 en 4 worden respectievelijk a , b , c en d gesteld. In hoofdstuk 2 werden de waarden van a , b , c en d berekend als functie van de hoofdbuislengte L . Gevonden werd dat:

$a = 0,1225 L$, $b = 0,0595 L$, $c = 0,1528 L$ en $d = 0,0779 L$.

Invulling van $L = 1480$ mm geeft dat:

$a = 181,3$ mm, $b = 88,1$ mm, $c = 226,1$ mm en $d = 115,3$ mm.

De ventielstembuizen hebben de vorm van een U. Daardoor wordt vergroting van de stembuislengte met een bepaalde waarde verkregen door het verlengen van een stembuis met de helft van deze waarde. Hierdoor wordt $0,5(c - a)$ het verschil in U-pootlengte tussen de stembuizen van ventiel 1 en 3 en $0,5(d - b)$ het verschil in U-pootlengte tussen de stembuizen van ventiel 2 en 4. Dit geeft: $0,5(c - a) = 0,5 * 44,8 = 22,4$ mm en $0,5(d - b) = 0,5 * 27,2 = 13,6$ mm. De U-pootlengte van de stembuis van ventiel 3 moet dus 22,4 mm langer zijn dan die van ventiel 1 en de U-pootlengte van de stembuis van ventiel 4 moet dus 13,6 mm langer zijn dan die van ventiel 2.

Voor een normale drieventielstropet kunnen de stembuizen van ventiel 1 en 3 behoorlijk ver uitgetrokken worden. Voor een optimale stemming van de lage tonen worden de stembuizen van ventiel 1 en 2 meestal geheel ingedrukt maar wordt die van ventiel 3 voor een trompet wel 20 mm getrokken. Voor de quadrofoon met juist berekende ventielbuislengtes zou het niet nodig moeten zijn om de ventielbuizen nog te stemmen. Alleen de stembuis van de hoofdbuis blijft nodig om het instrument als geheel te kunnen stemmen.

4 Technische uitvoering van de quadrofoon (zie figuur 2)

De ventielen van instrumenten zoals een trompet of een bugel, maken een slag van ongeveer 15 mm en voor lagere instrumenten is dit nog meer omdat de boring groter is. Deze grote slag begrenst de maximale speelsnelheid. Een reden van deze tamelijk grote slag is dat er bij een normaal ventiel drie vreemd gevormde boringen in het ventiel zitten die elkaar niet mogen raken. De ventieldiameter moet zo klein mogelijk gekozen worden om de ventielmassa te begrenzen en om er voor te zorgen dat de ventielen niet te ver uit elkaar zitten. Bij mijn Getzen trompet en Yamaha bugel is de afstand tussen het hart van twee aanliggende ventielen ongeveer 26 mm. De massa van een ventiel van mijn Yamaha bugel is ongeveer 54 gram.

Bij de quadrofoon zoals beschreven in dit rapport wordt er voor gekozen om de ventielen te bedienen met de wijsvinger en de middelvinger. Een andere optie zou zijn om gebruik te maken van de wijsvinger en de ringvinger maar in dit geval zitten de middelvinger van de linkerhand en de rechterhand elkaar in de weg en daarom vervalt deze optie.

Het schuifventiel zoals wij dat nu kennen werd in 1838 uitgevonden door de Fransman François Perinet en het wordt dan ook het perinet ventiel genoemd. In die tijd kon men alleen ronde vormen zo nauwkeurig maken dat de spleet tussen het ventiel en de boring klein genoeg was voor een acceptabele kleine luchtlekage.

Een nadeel van een rond ventiel is dat men moet voorkomen dat het ventiel in de boring kan draaien en daarom zit er voor een bugel aan het ventiel een nokje dat in een sleuf in de boring beweegt. Wanneer het ventiel een rechthoekige vorm heeft dan wordt blokkering tegen rotatie automatisch verkregen. Met de huidige machines kan een rechthoekig ventiel en een rechthoekige boring in het ventielhuis waarschijnlijk met de benodigde nauwkeurigheid en gladheid gemaakt worden.

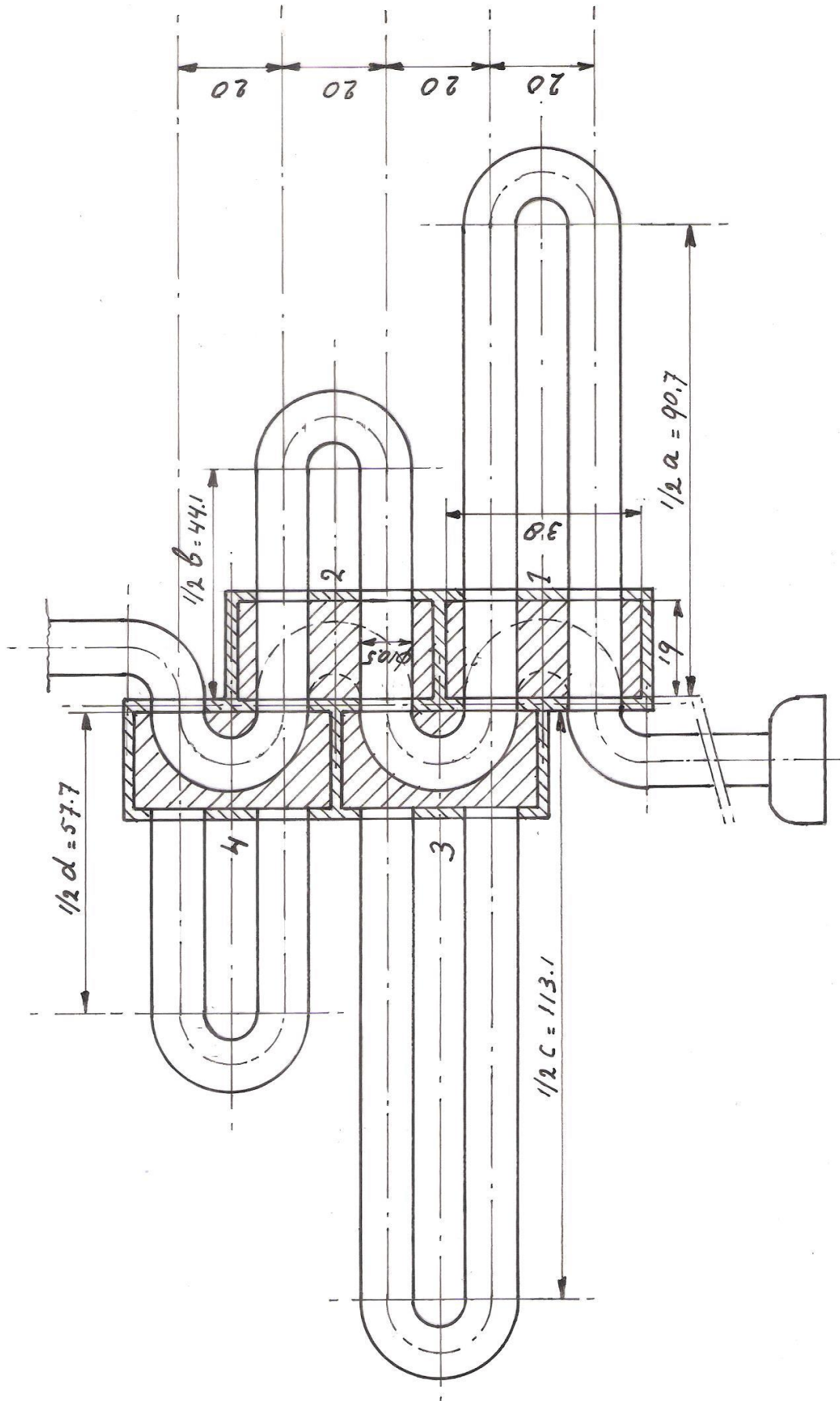
Moderne ventielen worden gemaakt van een speciale roestvrij staal legering (monel) en lopen in een messing boring. De glijeigenschappen van deze materialen zijn niet zodanig dat zonder smeermiddel gewerkt kan worden en daarom moeten de ventielen regelmatig met ventielolie gesmeerd worden. Voor de nieuwe ventielen wordt er in eerste instantie van uitgegaan dat de boring van messing of brons is maar voor het ventiel wordt een watervaste kunststof gebruikt. Met de huidige technologie is lijkt het mogelijk om de ventielen op een 3D printer te maken waardoor elke vorm van boringen in het ventiel eenvoudig te realiseren is. Het is mogelijk dat de glijvlakken mechanisch nabewerkt moeten worden om een voldoende grote te nauwkeurigheid te realiseren. Het kan zijn dat smering voor een kunststof ventiel niet of veel minder vaak nodig is.

Voorlopig wordt gekozen voor een rechthoekige vorm van het ventiel met een breedte van 38 mm en een dikte van 19 mm. Alle vier de ventielen zijn gelijk. In een ventiel zitten drie boringen met een inwendige diameter van ongeveer 11 mm. De onderste boring heeft een halfronde vorm wat inhoudt dat de stroming 180° van richting verandert. Daarboven zitten twee rechte evenwijdige boringen. De afstand tussen de bovenkant van de onderste boring en de onderkant van de bovenste boringen is 3 mm wat inhoudt dat de vereiste ventielslag 14 mm is bij een boringdiameter van 11 mm. Dit is toch 1 mm minder dan voor een normaal perinet ventiel. De afstand tussen de onderkant van het ventiel en de onderkant van de onderste boring moet minimaal 3 mm zijn om een voldoende groot glijvlak te krijgen. De afstand tussen de bovenkant van het ventiel en de bovenkant van de bovenste boring moet ook minimaal 3 mm zijn. Dit geeft een minimale ventielhoogte van $2 * 11 + 3 * 3 = 31$ mm.

Wanneer het ventiel ingedrukt is, sluit de bovenste boring aan op een U-vormige ventielbuis. De korte ventielbuizen van ventiel 2 en ventiel 4 liggen in een horizontaal vlak. Wanneer de ventielbuizen van ventiel 1 en ventiel 3 ook in zijn geheel in een horizontaal vlak zouden liggen dan zijn zij te lang en komen daardoor tegen de betreffende hand aan. Deze ventielbuizen hebben daarom een knik naar omhoog waardoor condenswater automatisch afgevoerd wordt. Een doorsnede schaal 1 : 1 met de belangrijkste maten van het ventielhuis en de ventielen wordt gegeven in figuur 2.

In figuur 2 is de knik in de ventielbuizen 1 en 3 echter niet getekend en alle vier de ventielbuizen liggen in de tekening dus in één plat vlak. De ventielbuizen zijn zo getekend dat de buisdikte gelijk is aan de lijndikte.

De luchtstroom loopt eerst door ventiel 1, dan door ventiel 3 dan door ventiel 2 en dan door ventiel 4. De vier ventielen zitten in één ventielhuis. De ventielen zijn zo t. o. v. elkaar gepositioneerd dat de boringen door het ventielhuis allemaal evenwijdig aan elkaar lopen en haaks staan op de zijkanten van het ventielhuis. De steek tussen deze boringen wordt 20 mm gekozen. Dit houdt in dat de hartafstand tussen ventiel 1 en ventiel 2, 40 mm is en dat de hartafstand tussen ventiel 3 en ventiel 4 ook 40 mm is. Het hart van de toets die bovenop een ventiel zit valt samen met het hart van een ventiel waardoor de afstand tussen de toetsen van dezelfde hand ook 40 mm is. Dit is 14 mm groter dan de 26 mm die geldt voor normale ventielen. De wijsvinger en de middelvinger moeten daarom wat verder uit elkaar gehouden worden dan voor normale ventielen maar omdat de ringvinger niet gebruikt wordt, lijkt dit nog wel toelaatbaar. Wanneer de toppen van de wijsvinger en de ringvinger op het hart van de betreffende toets liggen is er geen kans dat de ringvinger van de rechter hand de ringvinger van de linkerhand raakt.



figuur 2 Doorsneden quadrofoon over de ventielen, ventiel 1 + 2 ingedrukt, ventiel 3 + 4 niet ingedrukt, ventielen 1 en 3 weergegeven in een plat vlak

Figuur 2 is getekend voor een ingedrukt ventiel 1 en 2. De luchtstroom loopt dus door de ventielbuizen van ventiel 1 en 2 maar loopt alleen door de 180° bocht van ventiel 3 en 4. Elk ventiel wordt door een centrale veer aan de onderkant omhoog gedrukt.

Het deel van het ventiel waar de boringen in zitten heeft een minimale hoogte van 31 mm. Een ventielhoogte van 31 mm lijkt niet genoeg om te voorkomen dat het ventiel schrankt bij een excentrische belasting. De werkelijke ventielhoogte wordt daarom langer gekozen dan 31 mm. Het ventiel kan bestaan uit twee rechthoekige gedeeltes die met elkaar verbonden zijn door een cilindrisch gedeelte om gewicht te besparen. Aan de bovenkant van het bovenste rechthoekige gedeelte zit een ronde druktoets. In de onderkant van het onderste rechthoekige gedeelte zit een boring waar een drukveer in valt die het ventiel omhoog drukt. De ventielmassa van een dergelijk ventiel gemaakt van een kunststof met een dichtheid $\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3$ zal nog wat lager zijn dan die van een normaal ventiel gemaakt van monel. Dit en de wat kleinere slag verhoogt de maximale snelheid waarmee een ventiel met een bepaalde kracht op en neer bewogen kan worden.

Ik heb nog overwogen om de ventielen juist erg lang te maken en de ventielbuizen in het ventiel op te nemen. De ventielbuis van het derde ventiel is het langst en die bepaalt dan de lengte van de ventielen. In plaats van twee rechte gaten buigen de boringen eerst 90° omhoog. Dan zijn er twee evenwijdige verticale stukken en deze stukken worden aan elkaar gekoppeld met een 180° bocht. De voordelen hiervan zijn dat er nu geen ventielbuizen aan de zijkant van het ventielhuis uitsteken. De nadelen hiervan zijn dat de ventielen veel zwaarder worden en dat de ventielen nu niet meer allemaal aan elkaar gelijk zijn. De veel grotere massa lijkt mij een te groot bezwaar en dit idee werd daarom verlaten.

Een alternatief op het bovenstaand idee is om alleen de ventielbuizen van ventiel 2 en 4 geheel in het ventiel op te nemen. De ventielbuizen van ventiel 1 en 3 lopen wel in het ventiel omhoog maar maken bovenin het ventiel opnieuw een bocht van 90° en het laatste deel van de ventielbuis ligt weer buiten het ventiel. Deze stukken zijn echter veel korter dan bij een ventielbuis die geheel buiten het ventielhuis ligt. Bij deze optie wordt de ventiel lengte bepaald door de benodigde lengte van de ventielbuis voor ventiel 4. De ventielen worden zo licht mogelijk als de ventieldoorsnede ter plaatse van de verticale buizen ovaalvormig is met daarin twee 11 mm gaten. Waarschijnlijk is het mogelijk om op deze manier een ventielmassa te realiseren die ongeveer gelijk is aan die van normale ventielen.

Stel dat bij het bovenstaand alternatief de rechte lengte van het deel van de ventielbuis dat binnen ventiel 3 ligt even lang gekozen wordt als de rechte lengte van de ventielbuis van ventiel 4. De twee bovenste 90° bochten in ventiel 3 zijn samen even lang zijn als de 180° bocht in ventiel 4 en daarom is het deel van de ventielbuis van ventiel 3 dat binnen het ventiel ligt even lang als de ventielbuis van ventiel 4. Het deel van de ventielbuis van ventiel 3 dat buiten het ventielhuis ligt moet dus een lengte hebben van $c - d = 226,1 - 115,3 = 110,8 \text{ mm}$.

Het deel van de ventielbuis van ventiel 3 dat buiten het ventielhuis ligt heeft een 180° bocht met een lengte van 31,4 mm op de hartlijn. De totale lengte van de twee rechte stukken hebben daarom samen een lengte van $110,8 - 31,4 = 79,4 \text{ mm}$. De rechte lengte van een poot van een U-bocht is daardoor $79,4 / 2 = 39,7 \text{ mm}$. Hiervan wordt 2 mm gevormd door de dikte van de wand van het ventielhuis en de rechte lengte van een poot buiten het ventielhuis is daardoor 37,7 mm. De 180° bocht heeft een totale breedte van 16,5 mm bij een wanddikte van de pijp van 1 mm. De totale breedte van de externe bocht van ventiel 3 wordt daardoor $37,7 + 16,5 = 54,2 \text{ mm}$. Ik verwacht niet dat deze bocht tegen de palm van de linkerhand zal komen als de linkerhand op de juiste manier geplaatst wordt. De externe bocht van ventiel 1 is nog aanzienlijk korter dan die van ventiel 3 en is daarom zeker niet bepalend voor de ergonomie. Deze optie met ventielbuizen die voor ventiel 2 en 4 binnenin de ventielen liggen, lijkt me daarom acceptabel mits het mogelijk is om de tamelijk gecompliceerde boringen in de ventielen aan te brengen.

In figuur 2 is te zien dat de lead pipe direct uitkomt op ventiel 1 zoals dat ook bij een bugel het geval is. De rest van de hoofdbuis begint bij ventiel 4 en maakt dan, net als bij een bugel, een enkele bocht die om het ventielhuis heen loopt en dan eindigt bij de beker. Maar men zou ook kunnen kiezen voor de configuratie van een trompet waarbij de lead pipe uit komt op ventiel 4 en waarbij de rest van de hoofdbuis begint bij ventiel 1 en dan eindigt bij de beker. Bij de bugelconfiguratie loopt de hoofdbuis na het ventielhuis op dezelfde manier als bij een normale bugel.

In figuur 2 is te zien dat de luchtstroming bij niet ingedrukte ventielen twee bochten van 90° en vier bochten van 180° moet passeren. De weerstand van deze bochten zal wat groter zijn dan de weerstand van drie niet ingedrukte perinet ventielen. Wanneer dit nieuwe ventiel wordt ingedrukt dan blijven de bochten gelijk en worden er alleen twee extra rechte stukken toegevoegd (voor externe platte lussen). De weerstand zal hierdoor maar beperkt toenemen. Dit is vergelijkbaar met een schuifrombone. Wanneer een perinet ventiel ingedrukt wordt dan worden niet alleen rechte stukken toegevoegd maar ook een aantal extra bochten die vooral erg scherp zijn in het ventiel zelf. Een bocht zal waarschijnlijk een grotere toename van de weerstand veroorzaken dan een recht stuk en daarom is de toename van de weerstand bij perinet ventielen waarschijnlijk groter dan bij dit nieuwe ventiel. Wanneer men voor de quadrofoon echter kiest voor de optie met in het ventiel opgenomen ventiellussen voor ventiel 2 en 4 dan komen er extra bochten bij en zal de toename van de weerstand ook groter zijn.

Het is misschien mogelijk om dit nieuwe type ventiel ook te gebruiken voor drieventielsinstrumenten. We krijgen dan dezelfde opstelling als voor de quadrofoon alleen vervalt het vierde ventiel. Opeenvolgende ventielen worden dan weer 1, 2 en 3 genoemd. Ventiel 2 verlaagt dan weer een halve toon en ventiel 3 verlaagt dan weer 3 halve tonen.

Het is wel zo dat de drie ventielen dan niet in lijn zitten. Voor de gekozen ventielfmetingen en voor een wanddikte van 2 mm van het ventielhuis ligt het hart van ventiel 2 dan 21 mm links van het hart van ventiel 1 en 3. Nu is de middelvinger wat langer dan de wijsvinger en de ringvinger maar een verschil van 21 mm is te groot om het centrum van het eerste vingerkootje voor alle drie de vingers te laten samenvallen met het hart van de ventieltoets zonder dat de wijsvinger en de ringvinger erg gebogen moeten worden. Maar er is wel op te spelen als het drukpunt voor de wijsvinger en de ringvinger wat meer vanaf de vingertop verwijderd is.

5 Berekening van de onzuiverheid van alle ventielcombinaties

De berekende waarden voor o en p worden opgenomen in tabel 2 samen met de al eerder berekende waarden voor l.

ventielnummer vingerzetting	verlaging	theoretische buislengte l	totale werkelijke lengtetoename o	totale werkelijke buislengte p	afwijking (%)
	geen	$l_0 = 1,0000 \text{ L}$	$o_0 = 0$	$p_0 = 1,0000 \text{ L}$	zuiver
2	1 halve toon	$l_1 = 1,0595 \text{ L}$	$o_1 = 0,0595 \text{ L}$	$p_1 = 1,0595 \text{ L}$	zuiver
1	2 halve tonen	$l_2 = 1,1225 \text{ L}$	$o_2 = 0,1225 \text{ L}$	$p_2 = 1,1225 \text{ L}$	zuiver
1 + 2	3 halve tonen	$l_3 = 1,1892 \text{ L}$	$o_3 = 0,1820 \text{ L}$	$p_3 = 1,1820 \text{ L}$	+ 0,6
1 + 2 + 4	4 halve tonen	$l_4 = 1,2599 \text{ L}$	$o_4 = 0,2559 \text{ L}$	$p_4 = 1,2599 \text{ L}$	zuiver
1 + 2 + 3	5 halve tonen	$l_5 = 1,3348 \text{ L}$	$o_5 = 0,3348 \text{ L}$	$p_5 = 1,3348 \text{ L}$	zuiver
1 + 2 + 3 + 4	6 halve tonen	$l_6 = 1,4142 \text{ L}$	$o_6 = 0,4127 \text{ L}$	$p_6 = 1,4127 \text{ L}$	+ 0,1

tabel 2 Verloop van l, o en p als functie van de verlaging voor een quadrofoon

De afwijking of onzuiverheid wordt bepaald door de totale werkelijke buislengte p te vergelijken met de theoretische buislengte l . Als de geproduceerde toon te hoog is, is de afwijking positief en wordt voorzien van een + teken. Als de geproduceerde toon te laag is, is de afwijking negatief en wordt voorzien van een – teken. De afwijking in procenten wordt bepaald met de formule:

$$\text{afwijking} = 100 (l - p) / l \quad (\%) \quad (1)$$

De berekende afwijkingen werd ook opgenomen in tabel 2. Voor de ventielcombinatie 1 + 2 (drie halve tonen verlaging) vinden we een afwijking van + 0,6 %. Voor de ventielcombinatie 1 + 2 + 3 + 4 (zes halve tonen verlaging) vinden we een afwijking van + 0,1 % wat verwaarloosbaar klein is. Alle andere ventielcombinaties zijn exact zuiver.

De afwijkingen worden nu vergeleken met een drieventielsinstrument met optimaal afgestelde ventielstembuizen d.w.z. 1 = zuiver, 2 = zuiver en 1 + 3 = zuiver.

Voor een drieventielsinstrument is te berekenen dat de afwijking voor 1 + 2 (drie halve tonen verlaging) + 0,6 % is wat gelijk is aan de afwijking voor de quadrofoon. Voor een drieventielsinstrument is te berekenen dat de afwijking voor 2 + 3 (vier halve tonen verlaging) – 0,9 % is. De quadrofoon is bij deze verlaging exact zuiver wat dus aanzienlijk beter is. Voor een drieventielsinstrument is te berekenen dat de afwijking voor 1 + 2 + 3 (zes halve tonen verlaging) + 1,4 % is. De quadrofoon is heeft bij deze verlaging een te verwaarlozen afwijking van + 0,1 % wat dus ook aanzienlijk beter is. Voor een verlaging van één, twee en vijf halve tonen zijn beide instrumenten exact zuiver.

Op de quadrofoon zijn veel meer vingerzettingen mogelijk dan de zes die in tabel 2 genoemd worden maar die worden normaal niet gebruikt. Dit zijn de vingerzettingen 3, 4, 3 + 1, 3 + 2, 3 + 4, 4 + 1, 4 + 2, 4 + 3, 1 + 3 + 4 en 2 + 3 + 4. Bij de voorkeursvingerzettingen worden de ventielen 3 en 4 alleen gebruikt als de ventielen 1 en 2 beiden zijn ingedrukt.

De afwijkingen die het gevolg zijn van de combinatie van ventielen worden nu vergeleken met de afwijkingen die het gevolg zijn van de onzuiverheid van de hogere harmonischen. De frequentie van een hogere harmonische is gelijk aan het rangnummer vermenigvuldigd met de frequentie van de grondtoon ofte wel de eerste harmonische. Om afwijking van de harmonischen te bepalen werd een formule gebruikt die vergelijkbaar is met formule 1. Deze formule luidt:

$$\text{afwijking} = 100 (f_{\text{harm}} - f_{\text{gelijkzw.}}) / f_{\text{gelijkzw.}} \quad (\%) \quad (2)$$

Het resultaat van de berekening wordt voor de bruikbare hogere harmonischen vermeld op de eerste regel van tabel 3. Voor alle ventielcombinaties uit tabel 2 werd de gecombineerde afwijking berekend en opgenomen in tabel 3. De afwijkingen t.g.v. beide effecten kunnen bij elkaar opgeteld worden indien rekening gehouden wordt met het teken.

ventiel	rangnummer harmonische + naam van de toon en bijbehorende procentuele afwijking									
geen	2C 0	3G +0,1	4C 0	5E -0,8	6G +0,1	8C 0	9D +0,2	10E -0,8	12G +0,1	
2	2B 0	3Ges +0,1	4B 0	5Es -0,8	6Ges +0,1	8B 0	9Des +0,2	10Es -0,8	12Ges +0,1	
1	2Bes 0	3F +0,1	4Bes 0	5D -0,8	6F +0,1	8Bes 0	9C +0,2	10D -0,8	12F +0,1	
1+2	2A +0,6	3E +0,7	4A +0,6	5Des -0,2	6E +0,7	8A +0,6	9B +0,8	10Des -0,2	12E +0,7	
1+2+4	2As 0	3Es +0,1	4As 0	5C -0,8	6Es +0,1	8As 0	9Bes +0,2	10C -0,8	12Es +0,1	
1+2+3	2G 0	3D +0,1	4G 0	5B -0,8	6D +0,1	8G 0	9A +0,2	10B -0,8	12D +0,1	
1+2+3+4	2Ges +0,1	3Des +0,2	4Ges +0,1	5Bes -0,7	6Des +0,2	8Ges +0,1	9As +0,3	10Bes -0,7	12Des +0,2	

tabel 3 Toonnaam en procentuele afwijking als functie van de ventielcombinatie en de gebruikte harmonische voor de quadrofoon.

De dik gedrukte tonen zijn voorkeursvingerzettingen omdat in dit geval het minimum aantal ventielen gebruikt wordt. Bij de 5Des is te zien, dat het 0,8 % te laag zijn van de vijfde harmonische, grotendeels gecompenseerd wordt door het 0,6 % te hoog zijn van de combinatie 1 + 2.

Tabel 3 geeft aan dat de maximale verhoging van een dikgedrukte toon optreedt voor de 3E (+ 0,7 %) wat nog gemakkelijk met embouchureverandering te compenseren is. Tabel 3 geeft aan dat de maximale verlaging van een dikgedrukte toon optreedt voor de 5E, de 5Es, de 5D, de 10E en de 10Es die allen een verlaging van – 0,8 % hebben. Ook deze verlaging is nog goed te compenseren met embouchureverandering. Daarbij komt dat, hoewel de benodigde grepen wat gecompliceerder zijn, deze tonen nog zuiverder te spelen zijn door gebruik te maken van de 6^e en de 12^e harmonischen.

6 Bescherming van het idee van de quadrofoon en de nieuwe ventielvorm

In de afgelopen 200 jaar zijn er dermate veel octrooien op het gebied van ventielen verleend dat het niet te verwachten is dat een vierventielsinstrument niet onder één van deze octrooien zal vallen. Deze octrooien zijn inmiddels waarschijnlijk echter allemaal verlopen. Daarbij is octrooiering een kostbare zaak. Ikzelf heb geen intentie om een prototype van de quadrofoon te bouwen. Dit laatste is nodig om aan te tonen dat het instrument werkelijk zo zuiver is als de berekeningen aangeven maar ook om aan te tonen dat een normale trompettist zich de speeltechniek binnen niet al te lange tijd kan eigen maken. Als iemand anders een prototype wil bouwen wil ik wel graag proberen of er op te blazen is.

Ik heb ook geen intentie om de quadrofoon in serie te gaan produceren als zou blijken dat het prototype goed werkt. Middels deze KD-notitie heb ik het idee alleen willen vastleggen. Deze KD-notitie kan door iedereen van mijn website www.kdwindturbines.nl gekopieerd worden. Doordat het idee hierbij vrijgegeven wordt kan het door niemand anders geoctrooieerd worden. Iedereen is vrij om de quadrofoon te bouwen en te verkopen en hoeft daarvoor niets aan mij te betalen. Men mag het instrument eventueel zelfs ook een andere naam geven. Ook de nieuwe ventielvorm mag vrij gebruikt worden, eventueel ook voor een normaal drieventielsinstrument. Ik stel er wel prijs op om als uitvinder genoemd te worden.