

VEJLEDNING TIL RØRKLOKKESPIL

Tidligere trykt som artikel i Tidsskriftet Fysik•Kemi, udgivet af Danmarks Fysik- og Kemilærerforening, Julen 1996, 22 årgang nr 5.

Revideret i forbindelse med publicering som pdf-dokument på hjemmesiden www.lydleg.dk 2005

SVINGNINGER

En streng på f.ex. en guitar frembringer en tone når den svinger mellem ende-punkterne hvor den er ophængt. Det er strengens grundtone (se fig. 1a).

Hvis man, under anslaget, berører guitar strengen let præcis på midten, vil der opstå et knudepunkt på midten (et knudepunkt er et punkt strengen vrikker omkring – fig. 1b). Svingningerne bliver dobbelt så hurtige, og man hører strengens første overtone en oktav over grundtonen.

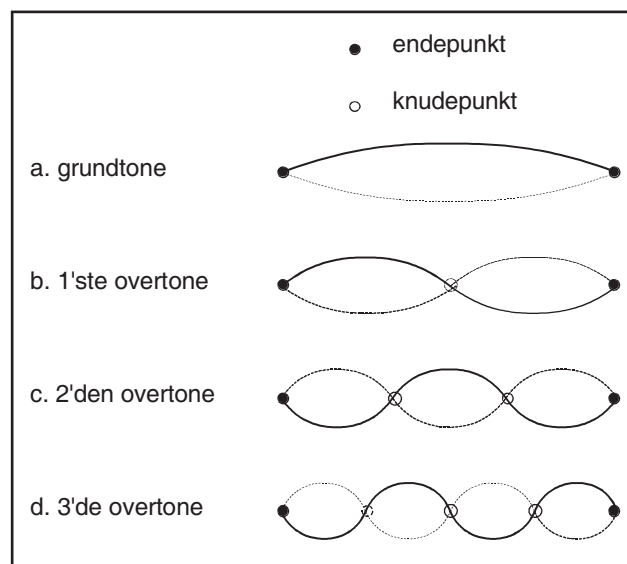
På samme måde kan man ved at berøre strengen 1/3 ned af længden få den til at svinge med to knudepunkter (fig. 1c). 2'den overtone vil så svinge 3 gange så hurtigt, en oktav og en kvint over grundtonen.

Med 3 knudepunkter vil den 3'de overtone svinge 4 gange så hurtigt som grundtonen (fig. 1d). Da svingningshastigheden bliver dobbelt så hurtig hver gang man stiger en oktav bliver 3'de overtone 2 oktaver over grundtonen.

Svingningshastigheden måles i svingninger per sekund som man kalder hertz. Hertz forkortes Hz. Kammertonen er det A der ligger lidt til højre for nøglehullet på klaveret. Der svinger klaverstrengene 440 gange i sekundet - med 440 Hz. A en oktav under svinger med 220 Hz, og sådan kan man fortsætte ned til det nederste A på klaveret, 4 oktaver under kammertonen, der svinger med 27.5 Hz. Den højeste tangent på klaveret er A, 3 oktaver over kammertonen, den svinger med 3520 Hz.

Vi kan høre tonerne helt op til 20.000 Hz, men når man bliver ældre kan mekanikken i øret ikke føle de hurtigste svingninger. Så kan man f.ex. ikke høre cikaderne i de øverste oktaver mere.

Man kan høre toner under den laveste tangent på klaveret også - men på et tidspunkt føler man tonen mere end man hører den.



Figur 1: En strengs svingninger

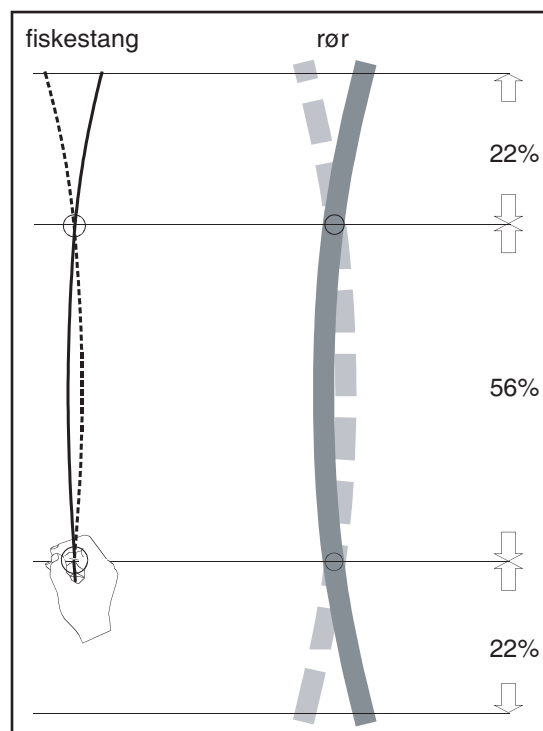


Figur 2: Rørklokke spil
16 mm eloxerede
alurør fra byggemarked

I en fløjte eller orgelpibe er det luftsøjlen inde i røret der står og svinger. I en rørklokke er det røret der står og svinger ligesom en streng.

Forestil dig at du står og svirper hurtigt frem og tilbage med en fiskestang ved at vrikke i håndledet. Man kan gøre det sådan at den nederste del af stangen står og slår buer, og den øverste del af stangen over knudepunktet svirper frem og tilbage. Håndledet er i virkeligheden det andet knudepunkt.

Det samme sker med et rør når man slår på det. Da det ikke ligesom strengene er ophængt i enderne vil det stå og svinge omkring 2 knudepunkter et stykke inde fra enderne (fig. 3). Hvis man holder røret et andet sted end i et knudepunkt, vil man bremse svingningerne der hvor man holder - men i knudepunkterne er der næsten ingen svingninger, så der kan man holde uden at forhindre resten af røret i at svinge



Figur 3: Knudepunkter

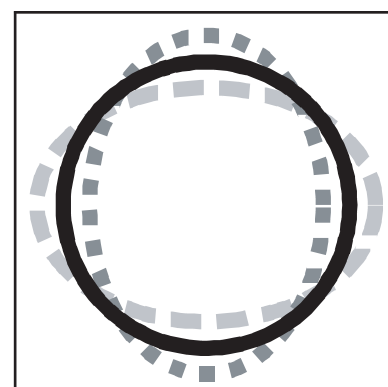
Når man slår på metalpladerne på en xylofon er det samme der sker. Pladen står og svinger omkring to knudepunkter. Pladen hviler så på trærammen præcis under knudepunkterne.

Knudepunktet på en svingende stang (eller rør/plade) opstår så massen gange hvor langt den skal bevæges til den ene side på den ene side af knudepunktet, er lig med massen gange hvor langt den skal bevæges til den anden side på den anden side af knudepunktet. Da enden vil svirpe lidt længere ud end midten af røret, der jo hænger sammen med den anden halvdel af røret, ligger knudepunktet lidt længere ude end $\frac{1}{4}$ inde på røret. På alle rør (og aflange plader) af ensartet tykkelse ligger knudepunktet 22% af rørets længde inde på røret.

Man kan finde placeringen af knudepunktet ved at bruge en tang der kan holde røret i to spidse punkter forskellige steder på røret indtil man ikke kan føle vibrationerne i tangen og tonen lyder ren (uden overtoner).

Når rørene bliver meget korte i forhold til deres diameter begynder de at opføre sig som rigtige klokker også. Så svinger de også radiært når de bliver slået på. Et snit af røret vil ikke være cirkelrunt men stå og være ellipseformet skiftevis på den ene og den led. Derfor er der grænser for hvor høje toner man kan lave rene med store rørdiameter.

Når rørene har små diameter vil de lange rør med lave toner ikke kunne høres ret langt væk. Det er fordi deres flade er ret lille og der skal flyttes meget mere luft jo langsommere svingningerne er for at vi skal kunne høre dem.

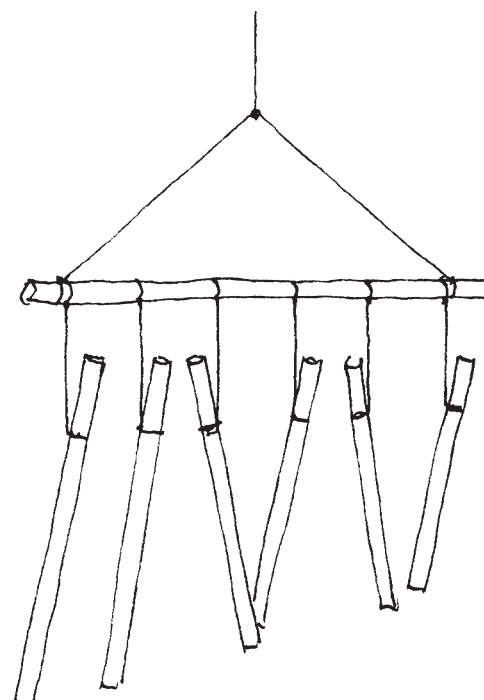


Figur 4: Tværsnit af kort rør der svinger radiært ligesom en kirkeklokke

Knudepunktet på røret findes egentlig kun der hvor røret har størst diameter. Så hvis man vil hænge røret op i knudepunktet må man bore 2 huller igennem vinkelret på den led det bliver slået an fra. Oversiden af hullerne skal være 22% nede af længden. - Det kalder jeg ophæng med huller, se fig. 2.

Man kan også bare hænge det op ved at slå et dobbelt halvstik omkring det ud for knudepunktet (fig. 5). Hvis det bliver slået an fra siden vinkelret på knuden er knuden i knudepunktet. - Det kalder jeg sideophæng. Sideophæng kan også laves med at træde en tråd med løkke igennem huller boret ligesom til ophæng med huller.

Næsten alle slags rør kan bruges. Materialet skal bare være hårdt og elastisk. Renest tone giver aluminium- og messing rør. Rustfri jernrør giver en mere malmklang. Almindelige jernrør begynder at blive lidt døde i det (tonen holder ikke så længe). Kobberrørs tone er ren men den dør hurtigt.



Figur 5: Sideophæng

AT STEMME RØR TIL RØRKLOKKESPIL

Når man har fundet nogle rør skal man have kortet dem af til nogle længder der har de toner man vil have. I begyndelsen er det lettest at starte med en type rør, lære den at kende, og lave alle de toner man vil have af den samme slags rør.

For ikke at skulle file sig ned til alle tonerne er det en fordel at have en fornemmelse af hvilken længde der svarer til hvilken tone. Når man har det kan man korte røret af på 1-2 millimeters overlængde og så stemme det sidste stykke op med en fil.

Man kan få en oversigt over hvilke længder der giver de forskellige toner på to måder: 1) ved at beregne sig frem til det i et skema (det er det mest nøjagtige), og 2) ved at lave en graf på logaritmisk millimeter papir over forholdet mellem hertz eller toner og længde på rørene. Nedenfor forklarer jeg begge måder hver for sig. Det er en fordel at læse det hele for at forstå de enkelte afsnit. Som eksempel er brugt en type aluminiumsrør som kan købes hos de fleste byggemarkeder. Det er 16 mm i diameter x 1 mm godstykkelse. En 2 m længde er nok til at lave et rørklokkespil som det beskrevne.

1. Beregnet skema

Et skema med forholdet mellem toner og længder kan laves på flere måder afhængig af hvad man har af udstyr til at beregne med og om man stemmer efter hertz (med f.ex. en tonegenerator) - se 1.a. nedenfor, eller om man stemmer efter toner (med f.ex. et stemt instrument eller en stemmemaskine/guitartuner) - se 1.b.

1.a.) Efter hertz fra en tonegenerator

For at kunne bruge en tonegenerator må man have en liste over hvilke Hz de forskellige toner svinger med.

En oktav spænder over 12 halvtoner (A #A H C #C D #D E F #F G #G, forfra A).

(Når jeg i det følgende snakker om toner mener jeg hvilken som helst af de tolv halvtoner i en oktav.)
Svingningstallet fordobles over en oktav, det vil sige at A en oktav over A ved 110 Hz svinger med

$$110\text{Hz} * 2^1 = 220\text{Hz}$$

A to oktaver over A ved 110 Hz svinger med

$$110\text{Hz} * 2^2 = 440\text{Hz}$$

A en oktav under A ved 110 Hz svinger med

$$110\text{Hz} * 2^{-1} = 55\text{Hz}$$

#A 1/12 oktav (en halvtone) over A ved 110 Hz svinger ved

$$110\text{Hz} * 2^{\frac{1}{12}} = 116.5\text{Hz}$$

Nu kan du lave et skema. Start med en lav tone, f.ex. A ved 110 Hz, du får ikke brug for lavere toner til rørklokker. Skriv tonerne i de næste 5 oktaver op under hinanden. Giv dem fortløbende numre startende med 0 for A^{110Hz}. Beregn deres svingningstal som

$$110\text{Hz} * 2^{\left(\frac{\text{1/2 tone nummer fra A}^{110\text{Hz}}}{12}\right)} = x\text{Hz}$$

I et regneark som Exel ville celle-formlen som regel være:

$$=POTENS(2; \text{"navnet på cellen med tonenumret, f.eks. A2"}/12)*110$$

De første tre kolonner i appendix 1 på side 7 viser hvordan det kommer til at se ud.

Det næste du gør er at vælge et langt og et kort rør af den type du vil arbejde med. Du vælger sådan at det lange rør ligger omkring, eller under, den laveste tone du vil have; og det korte ligger omkring, eller over, den højeste tone du vil have. Du kan høre tonen ved at holde røret mellem pege- og tommelfinger 22% nede af længden og slå let midt på det med knoen.

Hæng de to rør op med sideophæng og bestem deres frekvens ved at justere tonegeneratoren til den stemmer med rørene.

Gå ind i skemaet og find de nærmeste toner over rørenes frekvens.

Fil vinkelret af enden af rørene til de stemmer med de to toner.

Noter rørenes nøjagtige længder ud for de to toner.

Du skal nu beregne rør-længden til de andre toner ud fra rør-længden til de to toner. Rørlængden er også en eksponentialfunktion af tonerne. For hver tonespring op skal rørlængden forkortes en procentdel af foregående tones længde.

Hvis du laver skemaet med en lommeregner gør du på følgende måde.

Lad os sige at du har de to rør på tonerne a og b hvor a er den lave, og at der er 14 tonemellemrum imellem a og b.

Den %-del et rør skal være kortere end a for at det har tonen en 1/2tone over a, kan skrives som:

$$\text{længde } a * x = \text{længde } (a + 1/2\text{tone})$$

Da det skal ske 14 gange er

$$\text{længde } a * x^{14} = \text{længde } b$$

$$x = \left(\frac{\text{længde } b}{\text{længde } a} \right)^{\frac{1}{14}}$$

Gem x i hukommelsen og start så med at gange længde a med x for at få længde a+1, noter længde a+1, gang så længde a+1 med x, noter længde a+2, gang med x, noter a+3, og så videre...

Hvis du vil have længder der er kortere end a dividerer du bare a med x for at få a-1, og igen a-1 med x for at få a-2...

Hvis du skal have rørlængden til en tone X uden for rækken kan du finde den som

$$\text{Længde } X = \text{længde } a * \left(\frac{\text{længde } b}{\text{længde } a} \right)^{\left(\frac{\text{antal } 1/2\text{toner fra } a}{\text{antal } 1/2\text{toner mellem } a \text{ og } b} \right)}$$

hvor antal 1/2toner fra a er positive hvis X er højere/kortere end a og negative hvis X er lavere/længere.

I regnearket vil celle-formlen for længde på tone X være

$$=\text{længde } a * (\text{POTENS}((\text{længde } b/\text{længde } a);((\text{celle med tonenr. } X - a\text{'s tonenr.}) / \text{toner mellem } a \text{ og } b)))$$

I appendix 1 på side 7 kan du se hvordan det bliver. Kolonne 6 er de længder jeg har beregnet ud fra de to længder på tone nr. 31 (E) og tone nr. 43 (E). Kolonne 4 er de længder jeg har målt på færdige rør. Kolonne 5 er kolonne 6 minus kolonne 4, d.v.s. forskellen på beregnet og målt længde. Kolonne 7 er 22% af kolonne 6, d.v.s. længden fra enden til knudepunktet.

Hvis du synes det her er barnemad vil jeg gerne vide hvordan man, hvis man har to rør af længde a og b som svinger med A og B Hz (uden for tonerækken) beregner længde x som svinger med X Hz. Som du kan se, hvis du kigger lidt på tallene bliver rørlængden en anelse mindre end halv så lang hvis tonen stiger to oktaver. Send besked når du har fundet ud af hvordan - jeg har ikke fundet ud af det endnu.

1.b. Efter et stemt instrument eller en stemmemaskine

Hvis du har et stemt instrument uden for mange overtoner eller en stemmemaskine behøver du ikke at beregne hertz for de enkelte toner. Så kan du starte med at vælge et langt og et kort rør, stemme dem op til nærmeste tone, og så beregne længder som beskrevet ovenfor.

2. Graf på logaritmisk millimeter papir for forholdet mellem hertz eller toner

og længde på rørene (Den første version af dette blev skrevet i 1993, før vi alle fik computere til at beregne, men vi tager det med alligevel, det giver et overblik over logaritmer)

2.a. Efter hertz fra en tonegenerator

Appendix 2 viser forholdet mellem længden af 16 mm aluminiumrør og de hertz de svinger med (x = kolonne 3 og y = kolonne 6 fra appendix 1). Som forklaret ovenfor er både hertz til tone og tone til længde exponential funktioner. Så hvis man går ned til boghandleren og køber millimeter papir med logaritmisk skala på både x og y axen (dobbelt logaritmisk millimeter papir) og plotter forholdet mellem længde og hertz ind bliver de samme data en lige linie som den i appendix 3.

Med en lige linie bliver det lige pludselig let. Man tager bare et langt og et kort rør af vilkårlig længde, måler deres svingnings frekvens med tonegeneratoren og deres længde og plotter de to punkter ind. Derefter slår man en linie gennem de to punkter og har så en graf.

Derefter skal man bruge en omsætning mellem toner og hertz for at vide hvor hurtigt de toner man vil have svinger. Til det kan man enten bruge et skema som de første tre kolonner i appendix 1, eller lave en graf på følgende måde.

Da hertz til tone er en exponential funktion (hertz fordobles hver oktav) vil man på et millimeter papir med en logaritmisk skala på y -axen og en almindelig lineær skala på x -axen få en lige linie som den i appendix 4 (enkelt logaritmisk millimeter papir - køb det også nu du er hos boghandleren).

Du ved at A'erne svinger med 55, 110, 220, 440, 880, 1760, 3520.. hz. Plot det område du er interesseret i ind på papiret og træk en lige linie gennem punkterne.

2.b. Efter et stemt instrument eller en stemmemaskine

Da tone til længde er en exponential funktion kan man også her bruge enkelt logaritmisk millimeter papir. I appendix 5 er de samme data som hidtil vist.

Vælg et langt og et kort rør af den type du vil arbejde med. Du vælger sådan at det lange rør ligger omkring, eller under, den laveste tone du vil have; og det korte ligger omkring, eller over, den højeste tone du vil have. Du kan høre tonen ved at holde røret mellem pege- og tommelfinger 22% nede af længden og slå let midt på det med knoen.

Hæng de to rør op med sideophæng og stem dem op til nærmeste hele tone ved at file vinkelret af enden af rørene.

Noter rørenes nøjagtige længder og marker dem på den logaritmiske skala over tonen.

Slå en streg igennem de to punkter.

SKALA TIL ET RØRKLOKKE SPIL

Du har nu et skema eller en graf der kan fortælle dig hvor lange du skal skære rørene for at få de enkelte toner. Når du vil have et rør med en tone skær du det bare af 1 eller 2 millimeter længere (afhængig af hvor omhyggelig du har været og hvor ensartede rørene er lavet) og filer af enden indtil røret stemmer.

Du skal nu bestemme hvilke toner du vil lave. På et klaver kan du finde ud af hvilke toner der passer godt sammen. Du kan f.ex. bruge de sorte tangenter eller en anden 5-tone skala. Selv synes jeg E #F A H #C E passer godt til rørklokker.

God fornøjelse. Hvis du har kommentarer og ideer så send dem til mig på adressen på sidehovedet

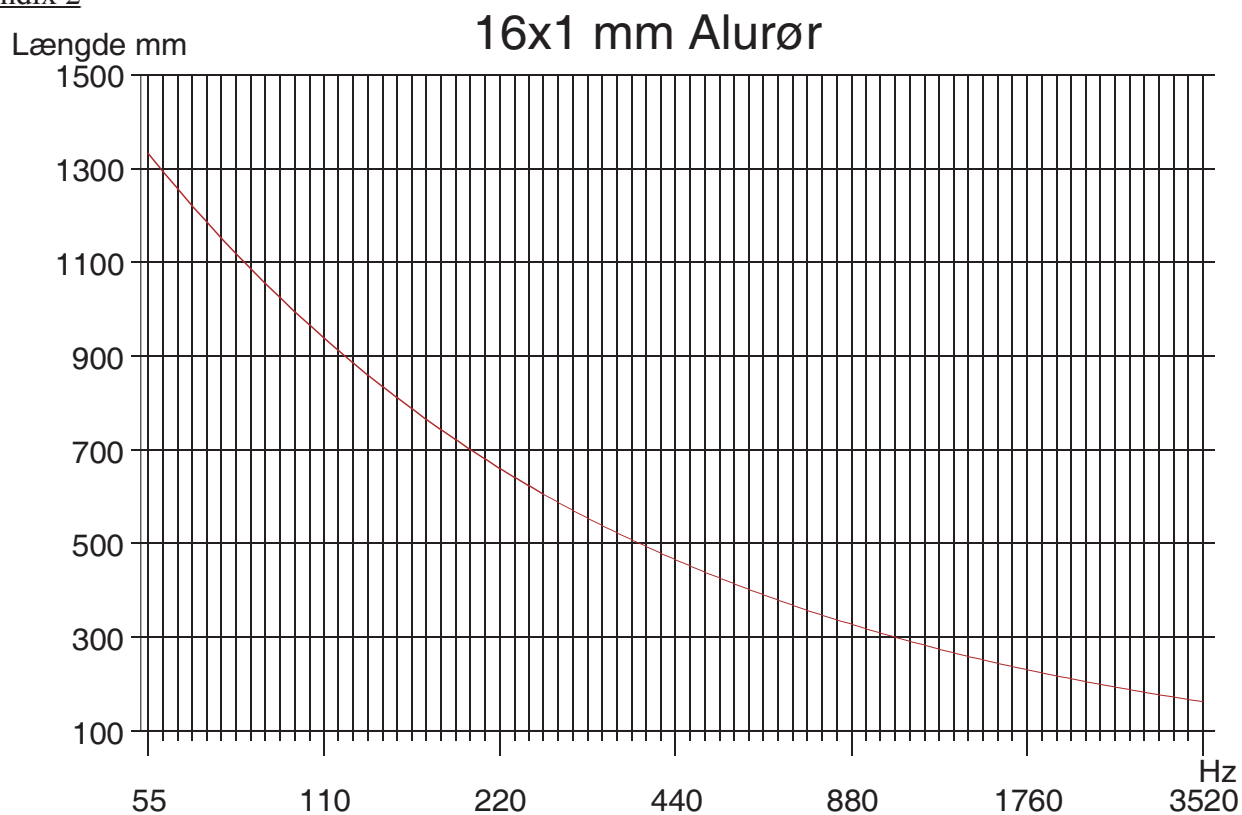
Finn Stubsgaard, redigeret Hytten februar 2005

Appendix 1

16mm diameter x 1 mm gods, alurør, byggemarked HERTZ1.XLS

nr	ton	Hz	Længder			
			målt	forskel	beregnet knudepkt. 22 % x L	
0	A	110,0		-938,9	938,9	206,6
1	#A	116,5		-911,7	911,7	200,6
2	H	123,5		-885,3	885,3	194,8
3	C	130,8		-859,7	859,7	189,1
4	#C	138,6		-834,8	834,8	183,7
5	D	146,8		-810,6	810,6	178,3
6	#D	155,6		-787,2	787,2	173,2
7	E	164,8		-764,4	764,4	168,2
8	F	174,6		-742,3	742,3	163,3
9	#F	185,0		-720,8	720,8	158,6
10	G	196,0		-699,9	699,9	154,0
11	#G	207,7		-679,6	679,6	149,5
12	A	220,0		-660,0	660,0	145,2
13	#A	233,1		-640,9	640,9	141,0
14	H	246,9		-622,3	622,3	136,9
15	C	261,6		-604,3	604,3	132,9
16	#C	277,2		-586,8	586,8	129,1
17	D	293,7		-569,8	569,8	125,4
18	#D	311,1		-553,3	553,3	121,7
19	E	329,6		-537,3	537,3	118,2
20	F	349,2		-521,7	521,7	114,8
21	#F	370,0		-506,6	506,6	111,5
22	G	392,0		-492,0	492,0	108,2
23	#G	415,3		-477,7	477,7	105,1
24	A	440,0		-463,9	463,9	102,1
25	#A	466,2		-450,5	450,5	99,1
26	H	493,9		-437,4	437,4	96,2
27	C	523,3		-424,8	424,8	93,4
28	#C	554,4		-412,5	412,5	90,7
29	D	587,3		-400,5	400,5	88,1
30	#D	622,3		-388,9	388,9	85,6
31	E	659,3	377,7	0,0	377,7	83,1
32	F	698,5		-366,7	366,7	80,7
33	#F	740,0	355,9	-0,2	356,1	78,3
34	G	784,0		-345,8	345,8	76,1
35	#G	830,6		-335,8	335,8	73,9
36	A	880,0	326,2	0,1	326,1	71,7
37	#A	932,3		-316,7	316,7	69,7
38	H	987,8	308,1	0,6	307,5	67,6
39	C	1046,5		-298,6	298,6	65,7
40	#C	1108,7	290,4	0,4	289,9	63,8
41	D	1174,7		-281,5	281,5	61,9
42	#D	1244,5		-273,4	273,4	60,1
43	E	1318,5	265,5	0,0	265,5	58,4
44	F	1396,9		-257,8	257,8	56,7
45	#F	1480,0		-250,3	250,3	55,1
46	G	1568,0		-243,1	243,1	53,5
47	#G	1661,2		-236,1	236,1	51,9
48	A	1760,0		-229,2	229,2	50,4
49	#A	1864,7		-222,6	222,6	49,0
50	H	1975,5		-216,1	216,1	47,6
51	C	2093,0		-209,9	209,9	46,2
52	#C	2217,5		-203,8	203,8	44,8
53	D	2349,3		-197,9	197,9	43,5
54	#D	2489,0		-192,2	192,2	42,3
55	E	2637,0		-186,6	186,6	41,1
56	F	2793,8		-181,2	181,2	39,9
57	#F	2960,0		-176,0	176,0	38,7

Appendix 2



Appendix 3

