

# GELUIDSLEER

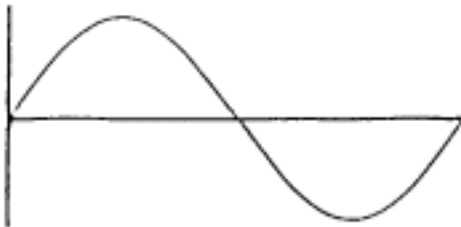
## 1. TRILLINGEN

Geluiden zijn trillingen in de lucht, uiterst kleine en snelle schommelingen van de luchtdruk. Deze trillingen worden opgewekt door geluidsbronnen, en planten zich voort zoals golven in het water; geluidsgolven verspreiden zich echter in alle richtingen, als een steeds groter wordende bol.

De snelheid van deze geluidsgolven is ca. 340 meter per seconde.

Regelmatige trillingen ervaren wij als tonen, onregelmatige als ruis (slaginstrumenten in de muziek, medeklinkers in de taal); geluiden die zo kort duren dat het alleen daarom al onmogelijk is een bepaalde toonhoogte waar te nemen, noemen we wel pulsen.

Trillingstijd is de tijd die één volledige trilling duurt: het trillende voorwerp beweegt zich eerst in één richting tot een bepaald uiterste, verandert van richting, passeert de uitgangspositie tot het tegenovergelegen uiterste punt is bereikt, en keert terug naar de uitgangspositie. Getekend op een -horizontale- tijdlijn:



De afstand tussen de uitgangspositie en een uiterste punt, de 'wijde' van de trilling, heet amplitude.

Deze bepaalt de sterkte van een geluid: hoe groter de amplitude, des te sterker het geluid.

Geluidssterkte wordt uitgedrukt in het aantal decibel (dB): een natuurkundige maat waarmee niet de amplitude wordt gemeten, maar de energie die bij een bepaalde amplitude hoort.

De hoogte van een toon wordt bepaald door het aantal -volledige- trillingen per seconde (dus feitelijk door de trillingstijd); het aantal trillingen per seconde is de frequentie en wordt uitgedrukt in Herz (Hz).

Vanzelfsprekend is bij grote geluidsbronnen (lange snaren of luchtkolommen) de trillingstijd langer en daardoor de frequentie d.w.z. de toonhoogte lager dan bij kleine geluidsbronnen (korte snaren of luchtkolommen).

De a-ééngestreept (= de a van de stemvork) heeft volgens een internationale afspraak een frequentie van 440 Hz; 1000 Hz wordt ook wel kilo-Hertz (kHz) genoemd.

Jonge, gezonde personen horen geluiden tussen de 16 Hz en 16 à 20 kHz; geluiden onder de 16 Hz worden als een soort geratel ervaren, geluiden boven de 16 à 20 kHz horen wij niet meer. (Bij het stijgen van de leeftijd is een daling tot ca. 9kHz normaal.)

---

## 2. INTERVALLEN

Het -zuivere- interval tussen 2 tonen wordt bepaald door de verhouding van de frequenties ervan; ongeacht de hoogte waarop een bepaald interval klinkt, zullen de frequenties van de 2 samenstellende tonen altijd dezelfde verhouding hebben.

Naarmate de verhouding eenvoudiger is, zal het interval consonanter klinken.

Het meest elementaire interval -de priem- kent een frequentieverhouding van 1 : 1; beide tonen klinken immers even hoog.

Het oktaaf heeft de frequentieverhouding 1 : 2, dat wil zeggen: het oktaaf boven een toon van 200 Hz heeft een frequentie van 400 Hz; de a van de stemvork (=a') staat -zoals gezegd- op 440 Hz, a" zal dus 880 Hz zijn, en de a-'klein' 220 Hz.

Twee tonen vormen een reine kwint als de frequenties zich verhouden als 2 : 3: de kwint boven een toon van 200 Hz heeft dus 300 Hz ( $3/2 \times 200=300$ ), de kwint onder een toon van 600 Hz heeft 400 Hz ( $2/3 \times 600 = 400$ ). De kwint op a' (=440Hz), e", heeft dus 660 Hz.

Andere intervallen kennen in hun zuivere vorm de volgende verhoudingen:

reine kwart	3 : 4	bv. 300 en 400 Hz
grote tert	4 : 5	bv. 300 en 375 Hz
kleine tert	5 : 6	bv. 300 en 360 Hz
kleine sext	5 : 8	bv. 300 en 480 Hz
grote sext	3 : 5	bv. 300 en 500 Hz
grote secunde	8 : 9	bv. 300 en 337,5 Hz
kleine secunde	15 : 16	bv. 300 en 320 Hz

Deze verhoudingen kun je ook zien bij het bespelen van een snaar-instrument: wanneer je een snaar exact op de helft indrukt, klinkt het oktaaf van de 'grondtoon' van die snaar; door op exact  $1/3$  'af te knijpen' en dus  $2/3$  te laten klinken, krijg je de kwint; om de toon een grote secunde hoger te maken moet de snaar tot  $8/9$  verkort worden, etc..

---

## 3. BOVENTONEN

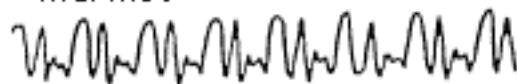
De klankkleur van een toon wordt bepaald door de manier waarop de trilling verloopt. De volgende grafieken horen bij tonen die even hoog en sterk zijn (dus dezelfde frequentie en amplitude hebben), maar duidelijk verschillen van timbre:



fluit



klarinet



trompet



viool

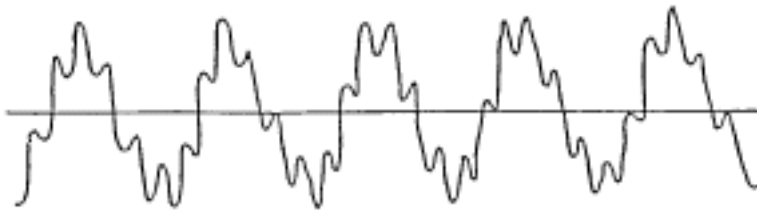


piano

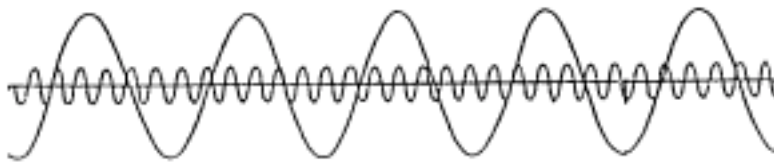
Een volkomen regelmatig en gelijkmatig golvende trilling komt in de natuur niet voor en kan alleen langs electronische weg worden opgewekt. Een dergelijke toon heet sinustoon en is volkomen kleurloos. (Een stemvork geeft nog de beste benadering.) In grafiek:



Nu is echter bewezen dat alle regelmatige trillingen ontleed kunnen worden als een opeenstapeling of 'optelling' van sinustrillingen. Een -overigens vrij hypothetische- trilling bijvoorbeeld die zo verloopt:



kan ontleed worden als een combinatie van 2 sinustonen:

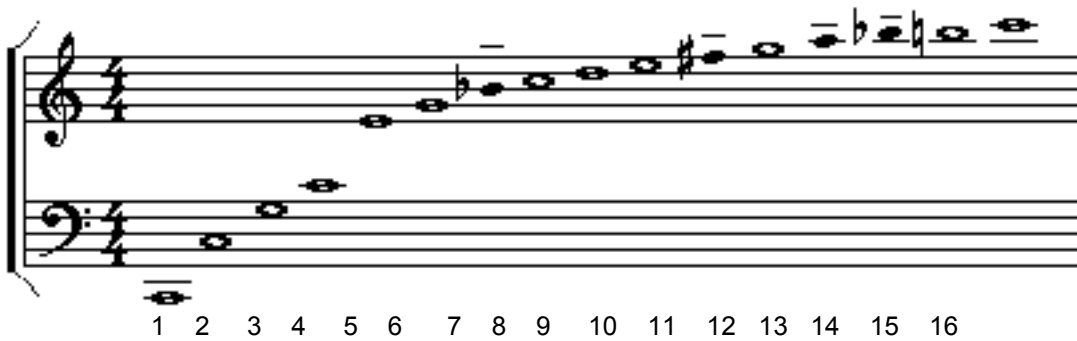


In ons gehoororgaan wordt iedere trilling op deze manier geanalyseerd. De laagste toon van het geheel (=de trilling met de grootste golf) herkennen we als de *hoogte* van de toon, de andere deeltönen noemen we de boventonen.

De onderlinge frequentie- en sterkteverhoudingen tussen de 'grondtoon' en boventonen bepalen dus de manier waarop de trilling verloopt, en derhalve het timbre of de klankkleur van een toon.

De frequenties van de boventonen zijn veelvoud van de frequentie van hun grondtoon, en zijn altijd dezelfde: 1 : 2 : 3 : 4 : 5 etc.; met andere woorden: grondtoon en boventonen vormen met elkaar altijd dezelfde intervallen. Grondtoon en boventonen worden samen natuurtonen genoemd.

Op de grondtoon C zijn de eerste 16 natuurtonen:



De reeks boventonen is in principe onbegrensd. De boventonen die van invloed zijn op de klankkleur kunnen nog veel hogere rangnummers hebben, tot aan de grens van het gehoor. Sommige tonen passen niet in ons toonsysteem, nl de nrs. 7, 11, 13 en 14 (zijnde het oktaaf van nr.7): het min-teken boven de noot geeft aan dat de natuurtoon iets lager is dan de overeenkomstige toon in ons toonsysteem.

De structuur van de boventonenreeks is wellicht gemakkelijker te onthouden of te reconstrueren dan je denkt:

- het oktaaf van iedere natuurtoon vind je door het rangnummer met 2 te vermenigvuldigen: de 2e natuurtoon (=de 1e boventoon) is het oktaaf van de 1e, de 4e van de 2e, de 8e van de 4e, de 16e van de 8e, etc.etc.; zo zijn ook de 3e, 6e en 12e elkaars oktaveringen, etc..
- de eerste 6 natuurtonen bestaan uit de tonen van een grote drieklank, daarna kun je als 7-, 9-, 11- en 13-akkoord 'doortellen'.
- de rangnummers van 2 tonen vormen tevens de verhouding van het interval dat ze vormen:

nrs. 1 en 2 vormen een oktaaf; oktaafverhouding = 1 : 2

nrs. 2 en 3 vormen een kwint; kwintverhouding = 2 : 3

nrs. 3 en 4 vormen een kwart; kwartverhouding = 3 : 4

etc., maar ook:

nrs.3 en 5 vormen een grote sext; grote sextverhouding = 3 : 5

etc..

- een 3-voud vormt een kwint met een 2-voud: nr. 9 (3x3) is een kwint op nr. 6 (2x3), nr. 15 (3x5) een kwint op nr. 10 (2x5), etc.
- naar boven toe worden de intervallen steeds kleiner, wat niet helemaal in de notatie is weer te geven omdat er andere dan gebruikelijke afstanden ontstaan:

4 en 5 vormen een normale grote terts, 5 en 6 een normale kleine terts, maar omdat 7 lager is dan in ons toonsysteem gebruikelijk- 6 en 7 vormen een terts die iets kleiner is dan de normale kleine terts, en 7 en 8 vormen een grote secunde die iets groter is dan de gebruikelijke grote secunde, die pas verschijnt tussen 8 en 9.

Tussen 10 en 11 vinden we een 'te kleine' grote secunde, tussen 11 en 12 een 'te grote' kleine secunde; tussen 12 en 14 moeten we zelfs één van de intervallen als een grote secunde noteren, hoewel het kleiner is dan 'te grote' 'kleine secunde' tussen 11 en 12.

Wanneer geluidstrillingen een voorwerp bereiken dat gevoelig is voor hun frequentie, gaat dat voorwerp meetrillen. Dit verschijnsel heet resonantie.

Resonantie is voor bijna alle muziekinstrumenten van groot belang: ze bestaan immers uit één of meer klankbronnen (bv. snaren), en een resonator (bv. de klankkast van een viool, de kast met klankbodem van een piano).

Doordat iedere resonator bepaalde voorkeurfrequentiegebieden heeft, dat wil zeggen: bij bepaalde frequenties veel beter resonanceert dan bij andere, bepaalt hij mede welke boventonen sterk(er) en welke boventonen zwak(ke) zullen klinken.

Ofwel: de resonator bepaalt in belangrijke mate de klankkleur van een instrument (en de geluidssterkte). Alles is daarbij van belang: de houtsoort, dikte van het materiaal, aantal laklagen, en zelfs de samenstelling ervan.

Deze resonantiegebieden worden ook wel formanten genoemd, vaak vergeleken met klinkers. Als de mondholte een bepaalde stand inneemt (een klankkast dus) kan een ie, ee, aa, oh, oo, oe, uu klank worden geproduceerd. Instrumenten hebben van zichzelf ook een klinkerachtige klank: bijvoorbeeld een viool 'ie' en een cello meer 'oh'.

---

#### 4. STEMMEN en STEMMINGEN

Aan de hand van de boventonenreeks laat zich de mate van consonantie/dissonantie van intervallen verklaren:

intervallen klinken consonanter naarmate ze meer boventonen gemeenschappelijk hebben en de niet-gemeenschappelijke 'hoger' liggen; ze klinken dissonanter naarmate ze minder boventonen gemeenschappelijk hebben en de niet-gemeenschappelijke 'lager' liggen:



Tevens laat zich door de boventonenreeks het verschijnsel verklaren dat lage consonante intervallen toch niet meer zo consonant klinken en hoge dissonante intervallen eigenlijk niet meer zo dissonant: 'hoge', niet-overeenkomende boventonen van een consonant interval komen bij een lage ligging toch binnen onze gehoorgrens, en van een hoog-gespeeld dissonant interval vallen de meeste boventonen buiten onze gehoorgrens.

Bij het stemmen van instrumenten -wat doorgaans in kwarten en kwinten gebeurt- spelen boventonen eveneens een rol: de zweeping die je hoort, is het verschil tussen de eerste gemeenschappelijke boventoon van beide tonen. Pas als deze gemeenschappelijke toon precies even hoog is, is de zweeping weg en het interval zuiver.



Bij stemmen is er meer aan de hand dan je op het eerste gezicht, -of beter: op het eerste gehoor- zou denken. Er zijn 2 grote problemen:

### Probleem no.1:

Door eerst vanuit -bijvoorbeeld- c' een kwint omhoog (verhouding 2:3) te stemmen en dan weer een kwart omlaag (verhouding 4:3) maak je de grote secunde c'-d'. De frequentie van d' is dan  $\frac{3}{4} \times \frac{3}{2} = \frac{9}{8}$ , wat natuurlijk dezelfde verhouding is als we in de boventonenreeks bij de grote secunde zijn tegengekomen. (Alhoewel: natuurlijk?)

Indien je grote secundes op elkaar stapelt, is de frequentie van elke nieuwe secunde  $\frac{9}{8}$  van de vorige. Door 6 grote secundes op elkaar te stapelen -of afwisselend 6 x een kwint omhoog en een kwart omlaag- maak je een oktaaf:

c' - d' - e' - fis' - gis' - aïs' - bis', want bis' is immers enharmonisch gelijk aan c".

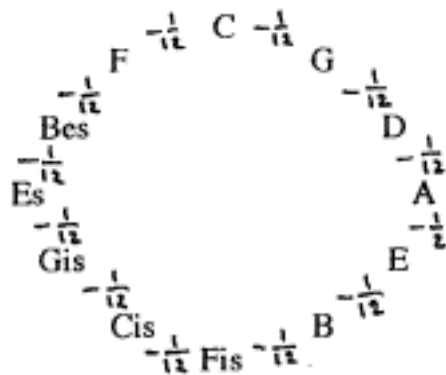
Echter: als je de frequentie van een oktaaf via zesvoudige vermenigvuldiging gaat berekenen, kom je niet uit op de zuivere oktaaf-verhouding 1:2.

Namelijk:  $\frac{9}{8} \times \frac{9}{8} \times \frac{9}{8} \times \frac{9}{8} \times \frac{9}{8} \times \frac{9}{8} = \frac{531441}{262144}$ ; ofwel met andere woorden: bis' verhoudt zich tot c' als  $\frac{531441}{262144}$ .

Door c' te octaveren tot c" krijg je de verhouding bis' - c":  $\frac{531441}{524288}$ ; ofwel met andere woorden: een bis is hoger dan c. Dit verschil staat bekend als het 'Pythagoraeïsch comma'.

Dus: door consequent zuivere kwarten en kwinten te stemmen kom je 'te hoog uit'.

Sinds ca. 1800 ondervangt men dit probleem door elke kwint iets te klein, en elke kwart iets te groot te nemen zodat dit pythagoraeïsch comma gelijkelijk over alle kwinten verdeeld wordt: dit wordt de 'gelijkzwevende' of 'evenredigzwevende temperatuur' genoemd. Schematisch:



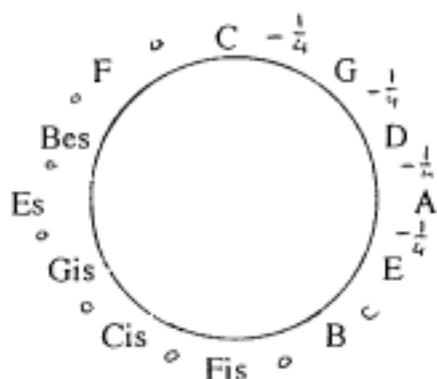
In deze stemming zijn de onzuiverheden zó gering, dat *wij* ons er niet aan storen. Kenmerkend is verder dat alle enharmonische tonen gelijk zijn (bis=c), en dat alle toonsoorten speelbaar zijn (en gelijk klinken).

Tussen ca.1700 en ca.1800 heeft men het bovengeschetste probleem op een andere wijze aangepakt: men verdeelde het pythagoraeïsch comma niet over alle 12 (=evenredig'), maar meestal over 4 -soms ook wel over 6- van de 12 kwinten.

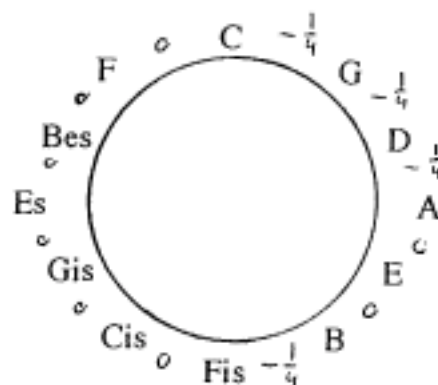
Stemmingen van deze soort worden "Wohltemperierungen" genoemd en vaak vernoemd naar degene die ze beschreven heeft.

Enkele voorbeelden:

1. Kimberger (1721-1783)  
leerling van Bach:



2. Werckmeister (1645-1706)  
organist en theoreticus:



Doordat in dit soort stemmingen niet alle kwinten/kwarten en derhalve ook andere intervallen niet 'even groot' zijn, klinkt elke toonsoort dus anders. (!)

In de tijd dat deze 'Wohltemperierungen' gebruikt werden, was het principe van de 'evenredig' of 'gelijkzwevende' stemming wel bekend en ook beschreven (o.a. door deze Werkmeister). De reden dat hij echter niet gebruikt werd, heeft te maken met het 'tweede grote probleem' bij het stemmen:

**Probleem no.2:**

Door 2x een zuivere kwint omlaag en een zuivere reine kwart omhoog te stemmen creëer je een grote terts:



De verhouding van deze grote terts berekenen we als volgt met behulp van de verhoudingen 2:3 en 3:4 voor resp. de reine kwint en de reine kwart:

- de frequentie van d' is  $\frac{2}{3}$  van die van a'.
- de frequentie van g' is  $\frac{4}{3}$  van die van d', dus  $\frac{4}{3} \times \frac{2}{3} = \frac{8}{9}$  van die van a'.
- de frequentie van c' is  $\frac{2}{3}$  van die van g', dus  $\frac{2}{3} \times \frac{8}{9} = \frac{16}{27}$  van die van a'.
- de frequentie van f' is  $\frac{4}{3}$  van die van c', dus  $\frac{4}{3} \times \frac{16}{27} = \frac{64}{81}$  van die van a'.

De aldus verkregen grote terts is derhalve iets groter dan de zuivere grote terts met de verhouding 4:5, of omgerekend: 64:80. Dit verschil in grootte staat bekend als het syntonisch comma, en is ongeveer  $\frac{1}{5}$  van een halve toonsafstand. Aangezien een grote en kleine terts samen een reine kwint vormen, zijn kleine tertsen hetzelfde comma te klein.

Al met al klinkt een eenvoudig akkoord als een grote drieklank in deze stemming vrij onaangenaam, zeker in de vergelijking met de volkomen zuivere drieklank van de boventonenreeks.

Wederom een kort historisch intermezzo:

het stemmen in zuivere reine kwinten en kwarten is de oudste stemming van de westerse muziekgeschiedenis, -hetgeen natuurlijk vrij logisch is-. Dit eenvoudige systeem staat bekend als de 'pythagoreïsche stemming', genoemd naar de griekse wijsgeer en wiskundige Pythagoras (6e eeuw voor Chr.). Middeleeuwse meerstemmige muziek (tot ca. 1500), dwz de eerste meerstemmige muziek, is in dit systeem geconcipteerd.

De meest praktische manier van deze wijze van stemmen is om de kwintencirkel in 'mollenrichting' (linksom dus) voort te zetten tot de 'es', en in 'kruisenrichting' (rechtsom) tot de 'gis':



Op dit punt aangekomen, blijkt 'dat je niet uitkomt': het interval gis-es is geen zuivere reine kwint, of -omgekeerd- geen zuivere reine kwart. (We gaan altijd uit van de zuiverheid van het oktaaf.) Dit rest-interval gis-es is een te kleine kwint, of omgekeerd een te grote kwart: in dit interval wordt het eerder genoemde pythagoreïsch comma gecompenseerd.

Aardig geprobeerd dus, deze stemming, maar in praktijk slechts zeer beperkt bruikbaar: de tertsen (en dus ook de sexten) zijn erg dissonant, en door de restkwint/-kwart gis-es is het niet mogelijk in alle toonsoorten te spelen.

Met andere woorden: zuivere kwinten en kwarten zijn niet te combineren met zuivere tertsen.

Terugkomend op de 'Wohltemperierungen': de 'te kleine' kwinten werden zó gepositioneerd, dat de tertsen van toonsoorten met weinig voortekens minder onzuiver waren (meer welluidend) dan die van de toonsoorten met veel voortekens. Iedere toonsoort heeft daardoor zijn eigen karakter. De tertsen van de 'Wohltemperierungen' zijn over het algemeen zuiverder dan die van de gelijkzwevende stemmingen: dat is de reden dat men in de periode van ca.1700 tot ca.1800 hieraan de voorkeur gaf.

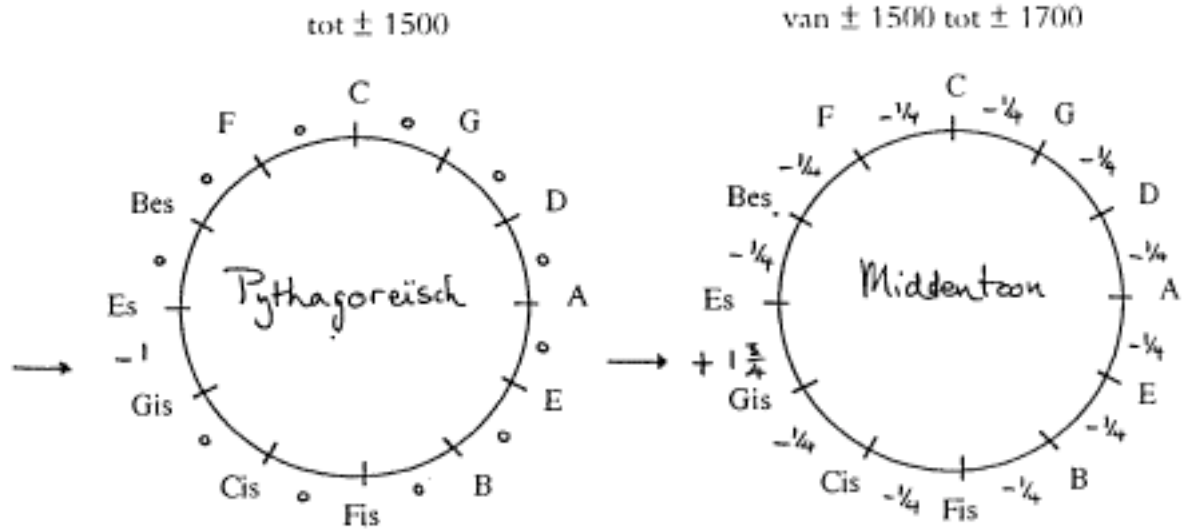
Daarvóór (vanaf ca.1500 tot ca.1700) werd de zg. "middentoonstemming" gebruikt: hierin werd naar zoveel mogelijk zuivere grote tertsen gestreefd, door de meeste kwinten in verdraagbare mate iets te klein te nemen. Dit gaat echter ten koste van één kwint die véél te groot wordt genomen, waardoor ook in deze stemming slechts het gebruik van een beperkt aantal toonsoorten mogelijk was.

(De naam 'middentoonstemming' duidt op de 'd' die in deze stemming de zuivere grote terts c-e precies in tweeën verdeeld, dus niet in 2 ongelijke grote secundes zoals in de boventonenreeks met de verhouding 8:9 en 9:10)

---



## 5. STEMMINGEN



### Uitgangspunt:

- Alle kwinten rein, behalve één, die een Pythagoreïsch komma te klein is.

### Voordeel:

- Reine kwinten en kwarten.

### Nadeel:

- Grote tertsen en sexten zijn te groot (syntonisch komma).

### Consequentie:

- Diatonische leidtonen te hoog gestemd (klein).
- Door de slechte kwint niet mogelijk in alle toonsoorten te spelen.

### Uitgangspunt:

- Alle kwinten  $1/4$  te klein, behalve één, de 'wolfskwint', die veel te groot is.

### Voordeel:

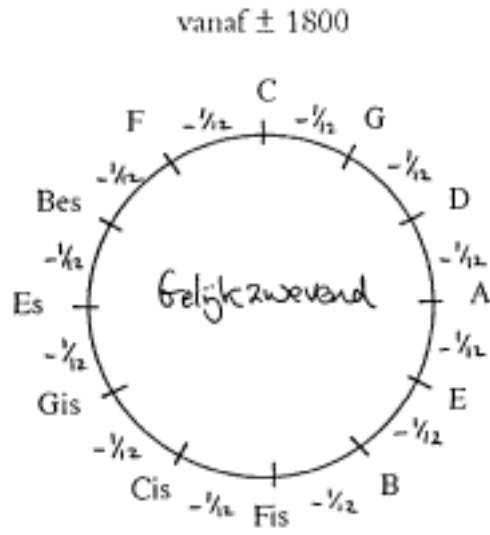
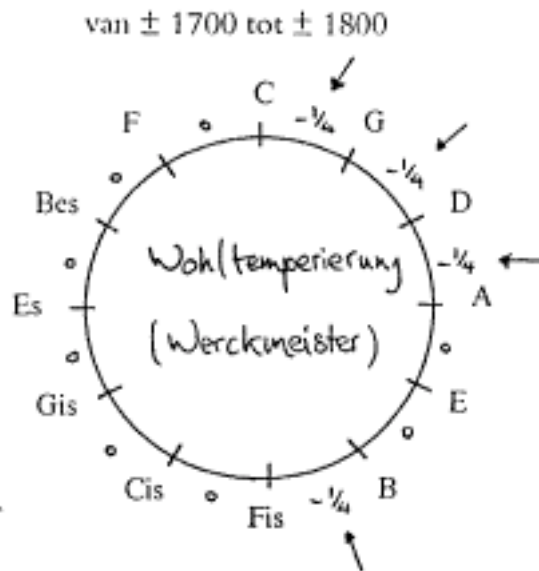
- Veel reine grote tertsen en sexten.

### Nadeel:

- Kwinten iets te klein (kwarten dus te groot).
- Door de erbarmelijke kwint niet mogelijk in alle toonsoorten te spelen.

### Consequentie:

- Diatonische leidtonen te laag gestemd (groot).



**Uitgangspunt:**

- 4 kwinten worden  $1/4$  komma te klein.

**Voordeel:**

- Geen slechte kwinten, dus mogelijk in alle toonsoorten te spelen.
- Waar de kwinten te klein zijn, zijn de grote tertsen en sexten juist reiner.
- Door verschil in reinheid hebben de toonsoorten ieder een eigen karakter.

**Nadeel:**

- Alle enharmonische tonen zijn (op het klavier althans) gelijk (bijv. gis-as)

**Uitgangspunt:**

- Alle kwinten  $1/12$  komma te klein.

**Nadeel:**

- Niets is meer zuiver, alles onzuiver.
- Alle toonsoorten klinken precies gelijk.

**Voordeel:**

- Onzuiverheden zijn zo gering dat we ons er niet echt aan storen.
- Alle toonsoorten zijn bespeelbaar.
- Alle enharmonische tonen zijn gelijk (bijv. gis-as)