

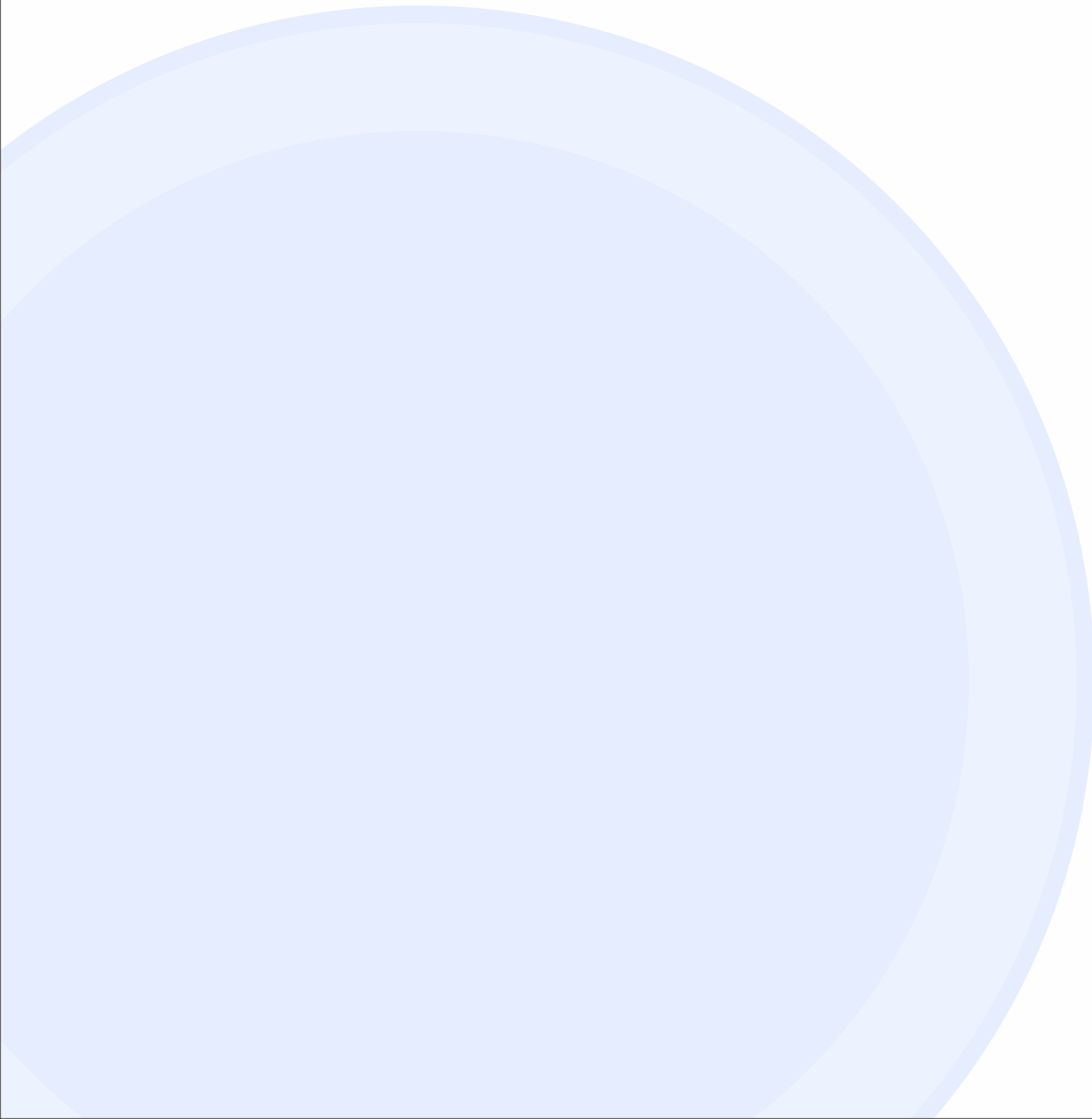


# Psychoakustik

---

5. Stunde

Tonhöhe, Intervalle und Tonarten





Das **Weber-Fechner-Gesetz** besagt, dass die Stärke von Sinneseindrücken **logarithmisch** zur Intensität des physikalischen **Reizes** verläuft.

1834 bemerkte der Physiologe **Ernst Heinrich Weber** (1795-1878), dass ein **Sinnesorgan** nur dann eine merklich stärkere Empfindung  $E$  registriert, wenn der Zuwachs  $R$  zum vorangehenden **Reiz**  $R$  in einem bestimmten, gleich bleibenden Verhältnis  $k$  zu diesem steht:

(1) 
$$\Delta E = k \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

## Webersches Gesetz

Beim **Tastsinn** beträgt der erforderliche relative Zuwachs  $\Delta R/R$  nach Webers Versuchen etwa 3 Prozent des Hautdruckes, beim Helligkeitssehen ca. 1-2 Prozent der **Lichtstärke**. Beim **Geschmack** muss die Konzentration um 10-20% steigen, um als stärker empfunden zu werden.

Beispielsweise erkennt man einen relativen Gewichtsunterschied von ungefähr 2% eines in der ruhenden **Hand** gehaltenen Gegenstands. Man nimmt die Gewichtszunahme eines Gegenstands von zunächst 50g erst wahr, wenn das Gewicht um 1g auf 51g angewachsen ist. Entsprechend muss 5000g Gewicht um 100g anwachsen, um schwerer zu wirken.

Der Mathematiker **Gustav Theodor Fechner** (1801-1887) erweiterte das Webersche Gesetz 1860 formal durch Integration unter der Annahme, dass  $k$  konstant und unabhängig von  $R$  ist:

(2)

## Weber-Fechnersches Gesetz

$R_0$  ist eine Integrationskonstante, die meist den **Schwellenreiz** festlegt. (2) besagt, dass bei einem linearen Anstieg der Reizstärke ihre Empfindung im Sinnesorgan nur logarithmisch anwächst.

Durch die logarithmische **Adaption** kann das menschliche **Auge** Sinneseindrücke zwischen **Dämmerung** und hellem **Sonnenschein** von bis zu 12 Zehnerpotenzen an physikalischer **Leuchtdichte** überbrücken. Ein **freiäugig** gerade noch sichtbarer Stern **6. Größe** (6 mag) ist gegenüber der **Sonne** (-25 mag) um 31 Größenklassen oder  $12\frac{1}{4}$  Zehnerpotenzen schwächer.

Bei der Beurteilung der akustischen **Lautstärke** ist die Gültigkeit des Weber-Fechner-Gesetzes eingeschränkt auf den Bereich mittlerer und hoher **Schalldrücke**. Bei leisen Geräuschen und beim Vergleich unterschiedlicher Schallsignale gelten **andere Zusammenhänge**.

# Frequenz und Tonhöhe



Auch Frequenz (in Cent) und wahrgenommene Tonhöhe stehen in einem logarithmischen Verhältnis. Wie auch bei der Lautstärke muss die Tonhöhe in Bezug auf einen Referenzton (Intervall I) angegeben werden. Die Maßeinheit ist Cent = 1/100 Halbton oder 1/1200 Oktave

$$I = 1200 \log_2(F_1/F_0) = 1200 \log_{10}(F_1/F_0)/\log_{10}(2).$$



Aus der Obertonreihe leiten sich durch die Formel folgende reinen Intervalle ab (Die Verhältnisse entsprechen auch umgekehrt den Saitenverhältnissen, die Pythagoras bereits in der Antike bestimmt hat):

Intervall (Name)	Frequenzverhältnis	Intervall (Größe in Cent)	temperierte Stimmung
R1	1/1	0	0
K2	16/15	112	100
G2	9/8	204	200
K3	6/5	316	300
G3	5/4	386	400
R4	4/3	498	500
V5	7/5	583	600
R5	3/2	702	700
K6	8/5	814	800
G6	5/3	884	900
K7	16/9	996	1000
G7	15/8	1088	1100
R8	2/1	1200	1200

# ○ ● ● Tonhöhe

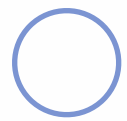
---

- **Spektrale Zusammensetzung und Entwicklung eines Klages entscheidet über Tonhöhen- und Klangfarbeneindruck**
- **Eindeutige Tonhöhe nur bei harmonischen Klängen**
- **Ambivalenz bei inharmonischen Klängen durch konkurrierende virtuelle Tönhöhen**

# ○ ● ● Residualton

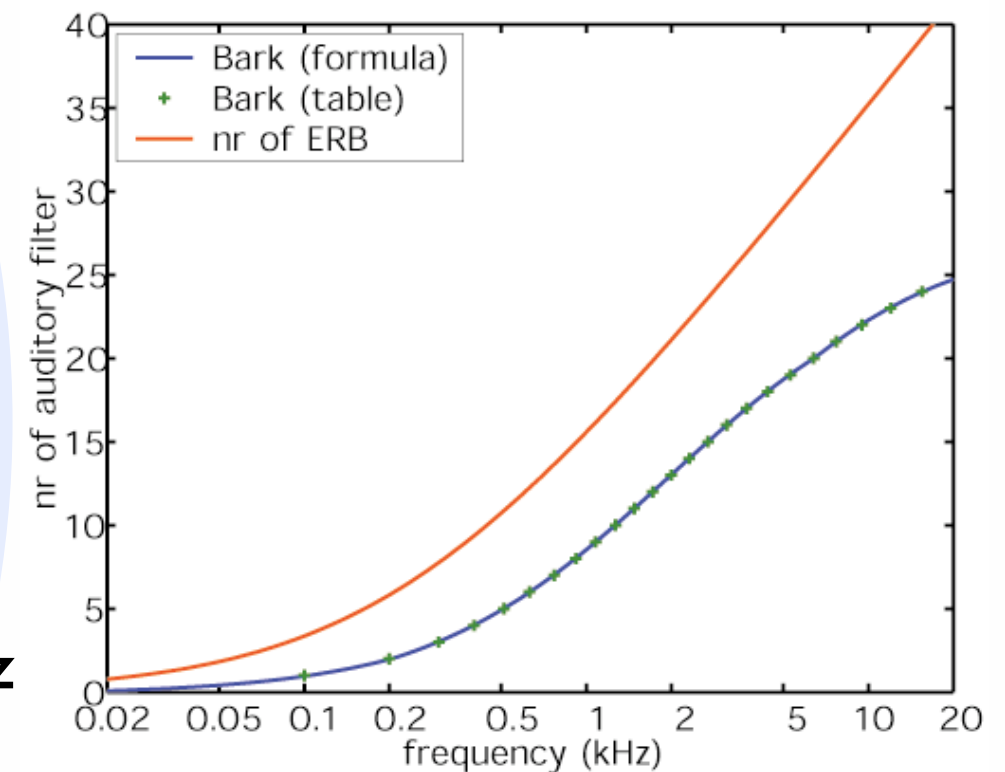
---

- Das Gehirn erkennt die Grundtonhöhe bei harmonischen und manchen inharmonischen Klängen auch beim Fehlen von tiefen Teiltönen. Voraussetzung: drei benachbarte Teiltöne.
- Periodizität bleibt i.A. auch bei fehlendem Grundton erhalten.
- Dies erklärt aber nicht die Wahrnehmung von Schlagtonhöhe bei Glocken.
- Daher hat Terhardt die Theorie einer Mustererkennung formuliert (vergleichbar mit subjektiver Kontur beim Sehen).



## Ortstheorie

- Nach Helmholtz ist das Ohr ein Frequenzanalysator: Klänge erzeugen auf der Basilarmembran "Resonanzen", die Nervenimpulse auslösen. Dabei fungiert die Basilarmembran wie eine Filterbank (Bandpassfilter), deren individuelle Breite durch die sogenannte kritische Bandbreite beschrieben wird.
- Der Hörbereich wird in 24 barks (kritische Bandbreiten) eingeteilt, die im mittleren Bereich etwa den Umfang einer kleinen Terz haben (Schritt - Sprung).

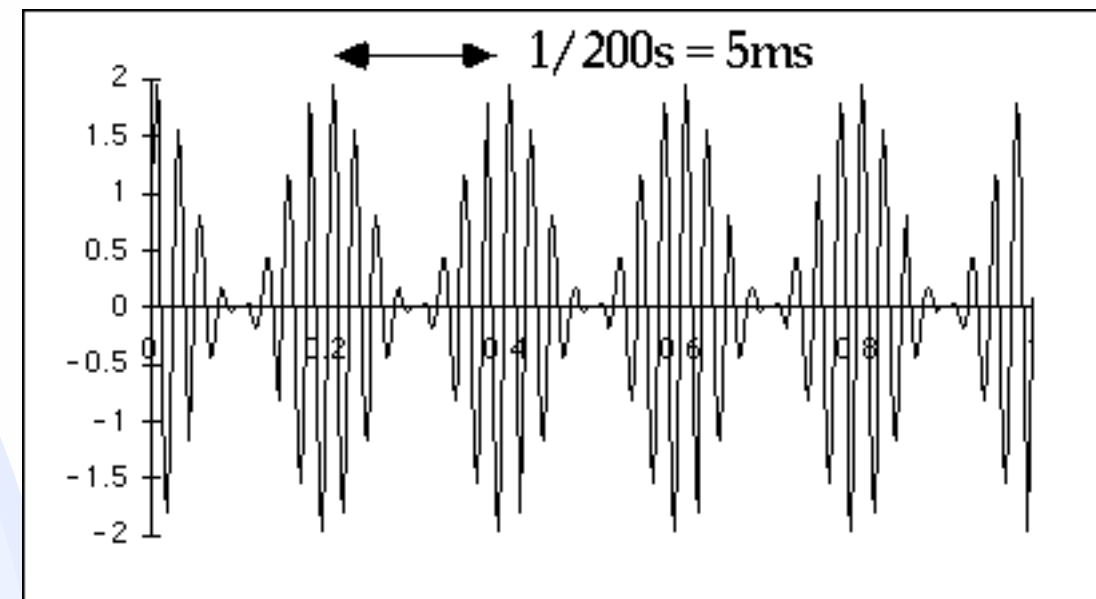




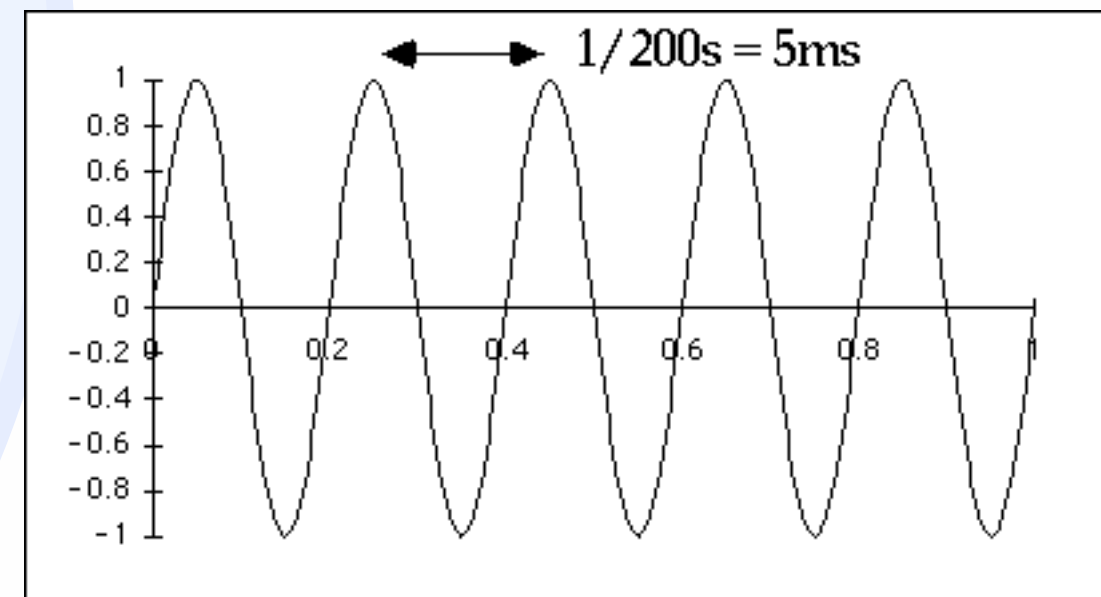
## Zeittheorie

- Nach Schouten ist das Ohr ein Zähler und kann Berge und Täler einer Welle zählend erfassen und diese Informationen durch Nervenimpulse an das Gehirn weiterleiten.

Hohe Teiltöne:



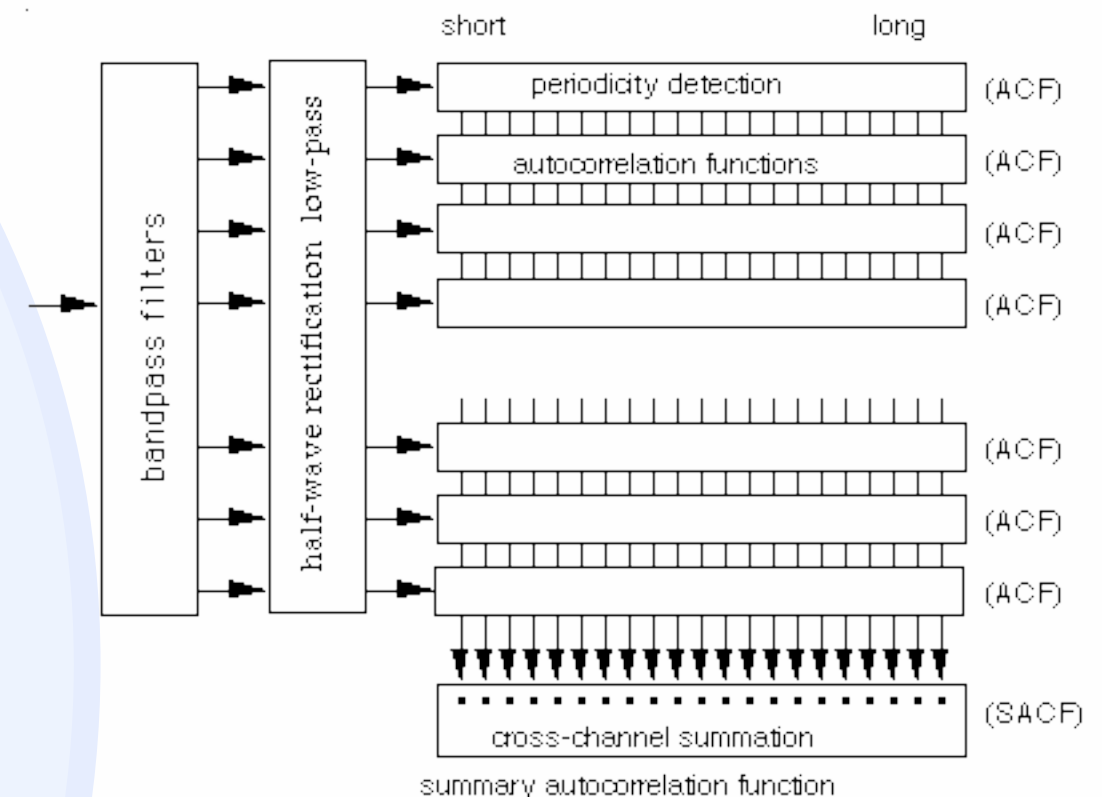
Grundton:





# Orts- und Zeittheorie der Tonhöhenwahrnehmung

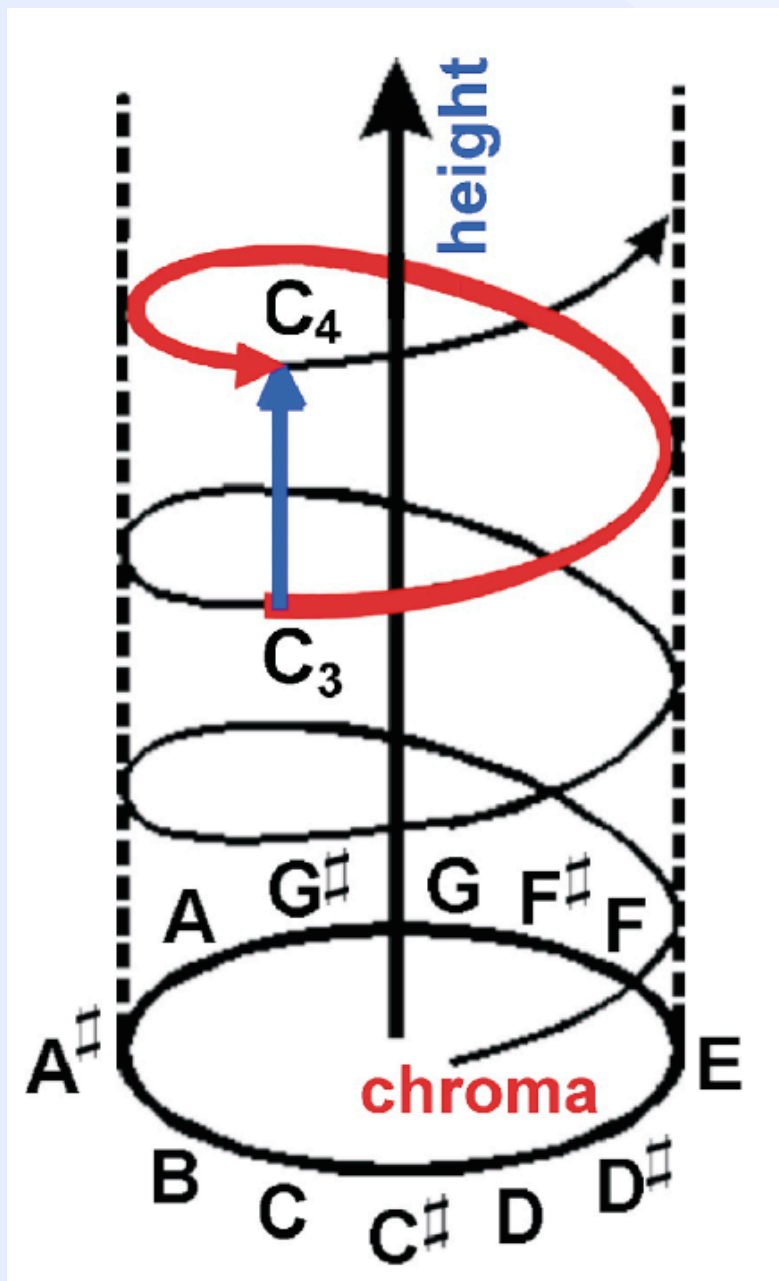
- Wahrheit liegt wohl dazwischen:
- Template-Theorie (Terhardt, Parncutt). Das Gehirn legt eine erlernte Schablone an.
- Modell des Summationsautokorrelogramms (Lyon/Slaney, Patterson). Dabei sucht das Gehirn nach Periodizität im Output von Bandpassfiltern (Kanäle) und summiert diese. Dadurch lassen sich auch Phänomene erklären, die u.a. durch Verstimmung tieferer Teiltöne oder durch Transposition von Klängen mit ungeraden Teiltönen entstehen.



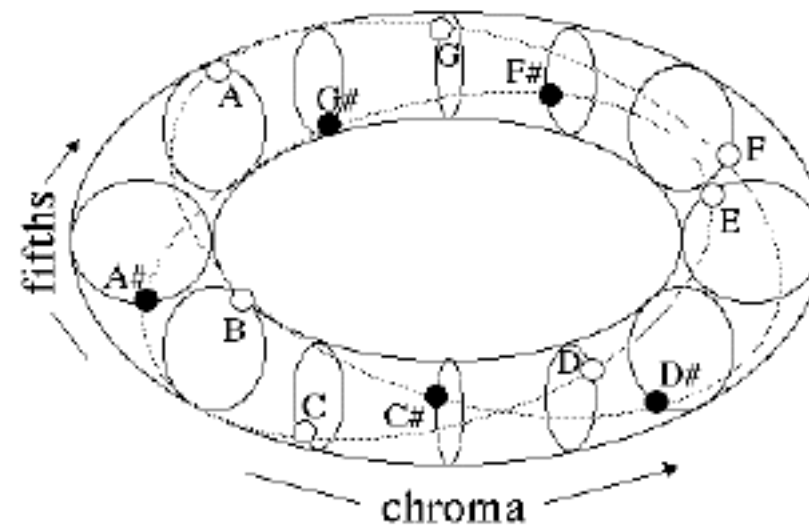




Vom amerikanischen Psychologen Roger Shepard stammt ein kognitivpsychologisches Modell das die Tonhöhe als Helix darstellt. Dabei kann der kreisförmige Chromazirkel (waagrecht) von der Tonhelligkeit (senkrecht) unterschieden werden. Oktaven befinden sich dabei immer auf der gleichen Seite der Helix. Durch eine geschickte Konstruktion können Töne gebildet werden, bei denen die Dimension der Tonhelligkeit wegfällt. Diese "Shepard-Töne" genannten Klänge eignen sich zur Konstruktion auditiver Illusionen, z.B. endlos steigende oder fallende Glissandi oder Tonleitern. Mit den Shepardtönen läßt sich auch ein Phänomen generieren, das man Tritonusparadox nennt. Ein Tritonus wird ja nach Kontext entweder als fallend oder steigend gehört.



## Fünfdimensionales Modell



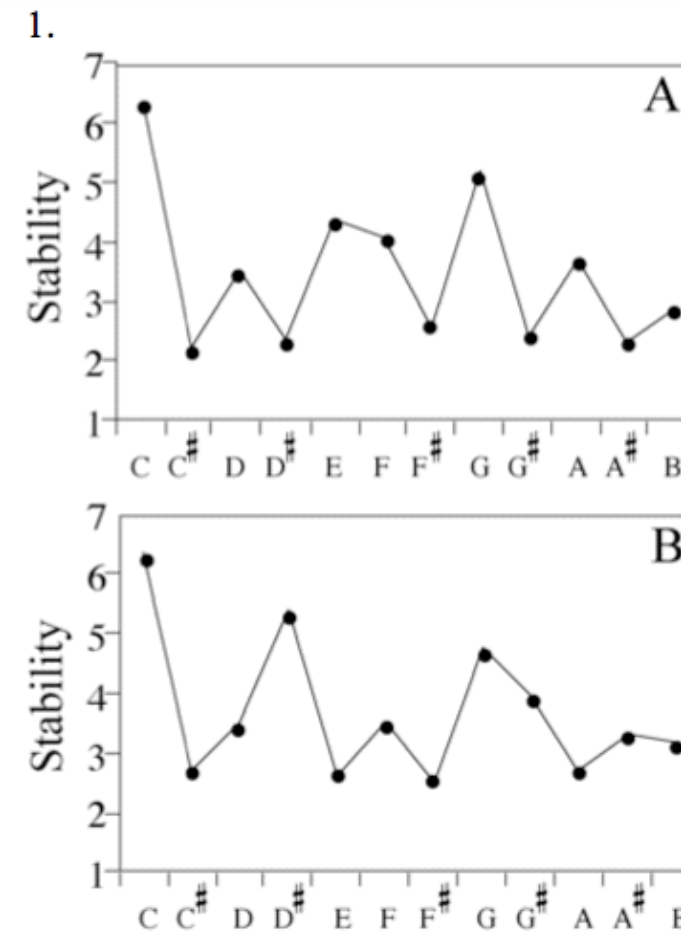
# Tonalität und die Probe Tone-Methode



siehe auch: <http://people.cs.uct.ac.za/~dnunez/psy205s/tut4/>

Shepard und seine Schülerin Carol Krumhansl entwickelten die Probe Tone-Methode, die dazu dient, das Phänomen der Tonalität zu erklären. Tonalität ist ein hierarchisches Phänomen, bei dem die in einem System geordneten Töne Spannungsverhältnisse zu einander ausbilden. Dabei stellt sich die bis heute noch nicht ganz beantwortete Frage, ob die in der Musik verwendeten Klänge (z.B. mit harmonischen Teiltönen) letztlich die kulturelle Ausprägung der Musik bestimmen.

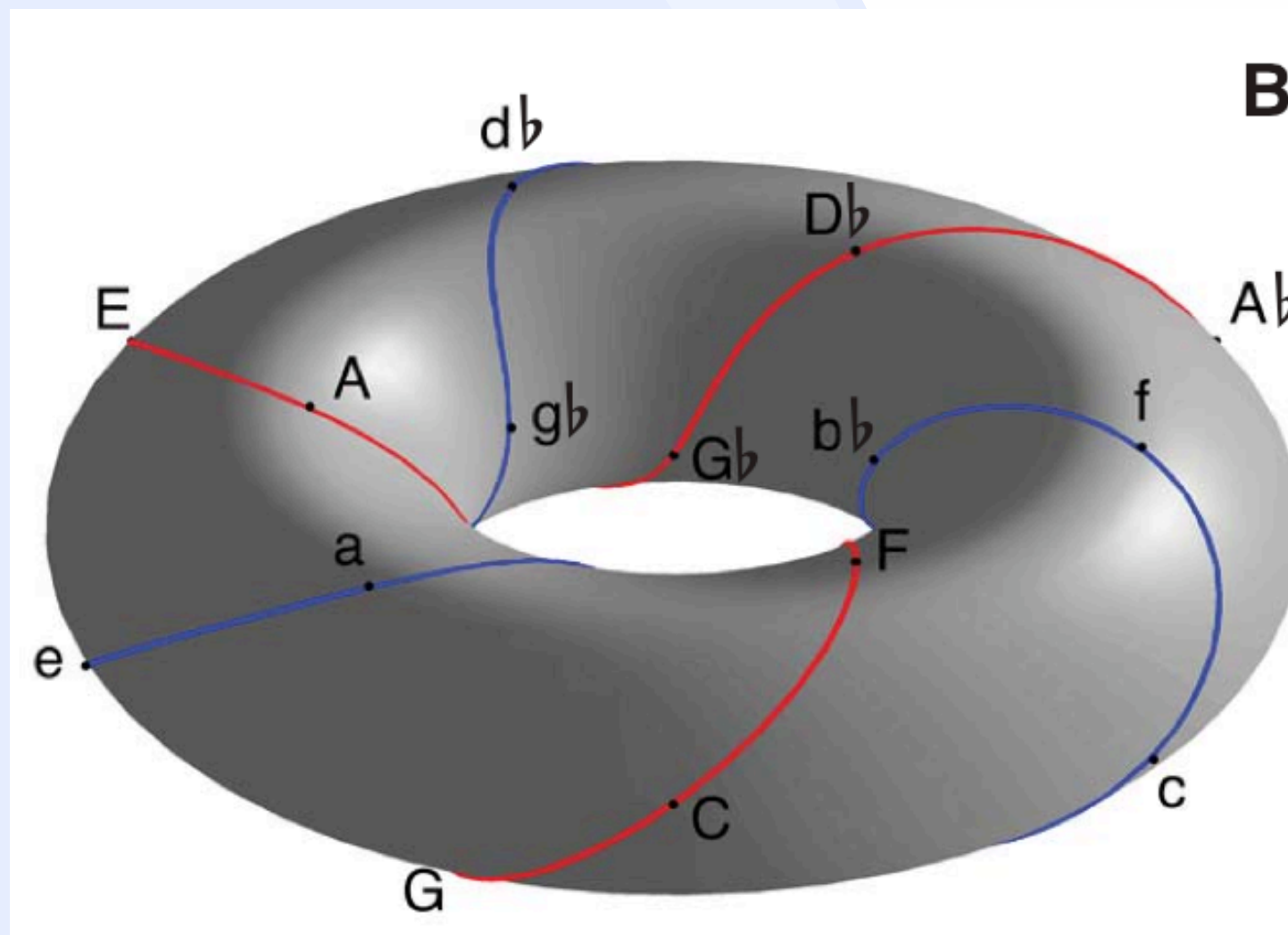
In dieser Methode werden Probanden Kadenzen und Tonleitern vorgespielt, wobei der Zielton durch einen sogenannten Testton ersetzt wird. Die Probanden werden aufgefordert auf einer Skala von 1 bis 7 zu beurteilen, wie gut der Testton "passt". Durch die Auswertung der Daten kristallisierten sich drei Gruppen heraus, die je nach musikalischer Vorbildung, mehr oder weniger in der Lage waren tonale Hierarchien im Dur oder moll-Kontext wahrzunehmen (die Abbildung rechts zeigt Ergebnisse wie sie für geübte Musiker typisch ist).



**Fig. 1.** Listeners ratings of stability of each pitch class after the presentation of a) C major; and b) C minor tonal contexts (after [2]). Tonal hierarchies for other keys are obtained by shifting the stability values circularly.



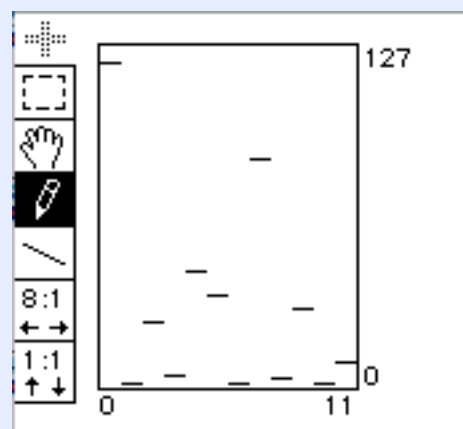
Aus den experimentell gewonnen Daten lässt sich nun durch multidimensionale Skalierung ([http://de.wikipedia.org/wiki/Multidimensionale\\_Skalierung](http://de.wikipedia.org/wiki/Multidimensionale_Skalierung)) die Anordnung der 24 Tonarten auf der Oberfläche eines Torus herleiten. Die multidimensionale Skalierung ist ein Verfahren, bei dem sich z.B. aus einer Liste von Entfernungen (etwa die Strecke Köln-Hamburg oder Stuttgart-Berlin) eine zwei-dimensionale Karte konstruieren lässt. Nimmt man jetzt die Tonalitätsprofile für alle 24 Dur- und moll-Tonarten als Ausgangspunkt, so ergibt sich durch Vergleich der Profile eine Karte, die die Distanzen (d.h. Verwandtschaftsgrad) der Tonarten als Punkte auf der Oberfläche eines Torus ("Rettungsring") abbildet. Dabei fällt auf, dass die beiden Quintenzirkel (Dur=rot, moll=blau) sich spiralförmig um den Torus winden.



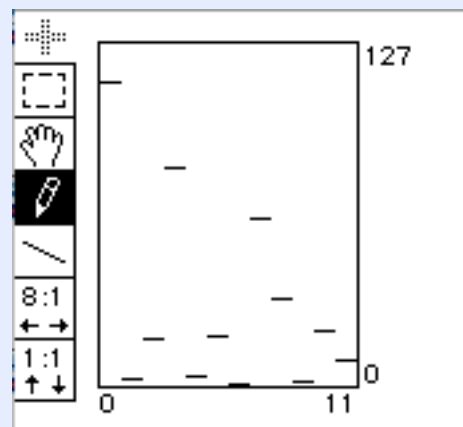
# Tonartenräume



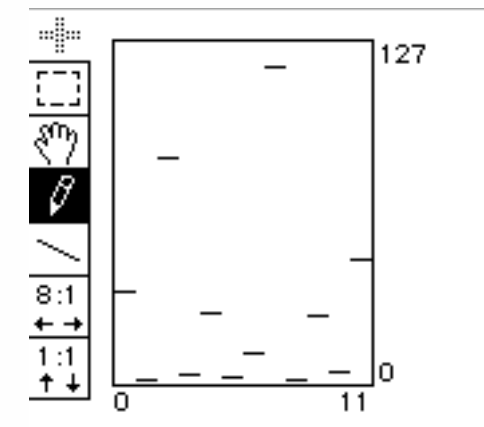
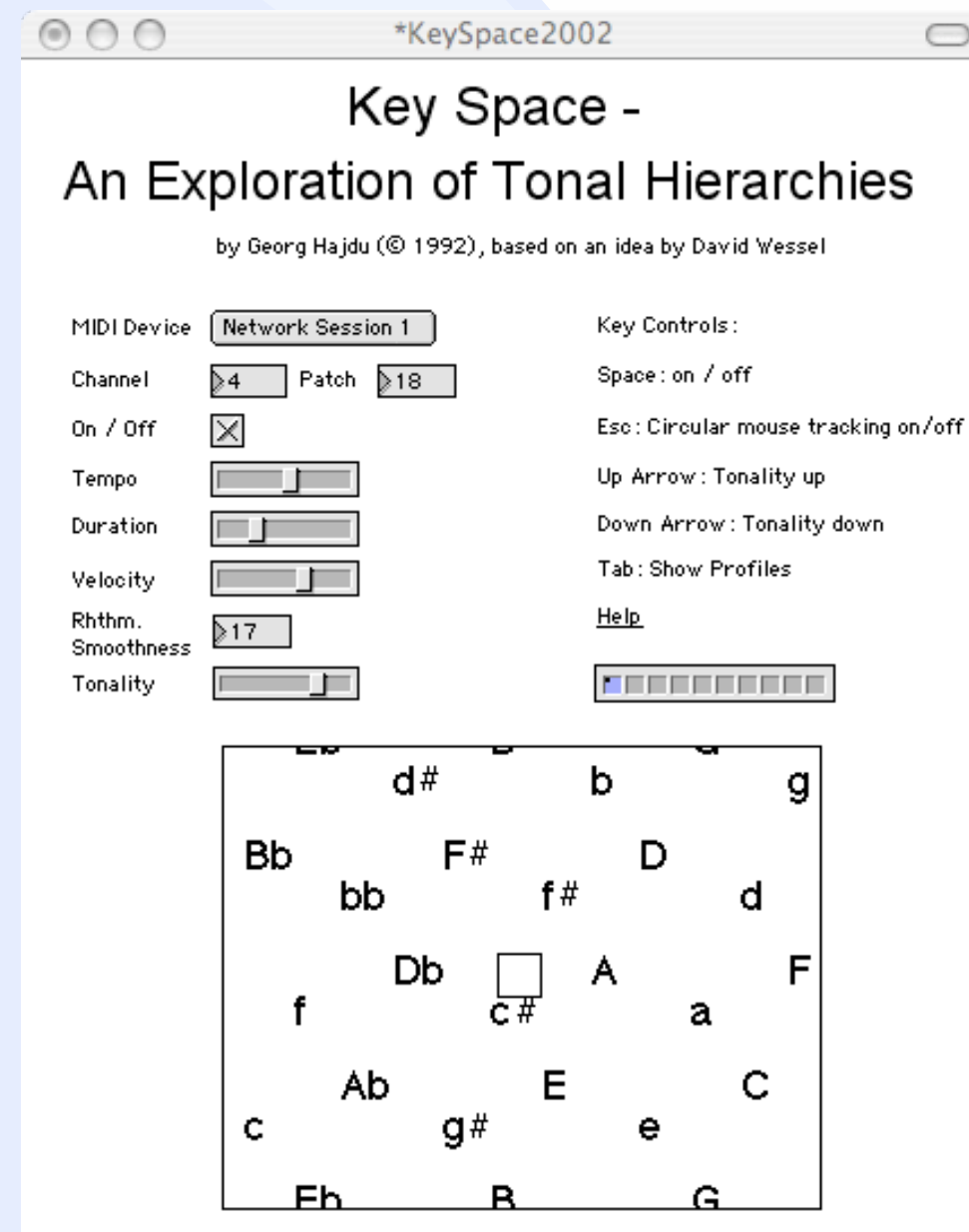
An der University of California in Berkeley ist unter Anregung von David Wessel ein Programm entstanden, dass den umgekehrten Ansatz verfolgt: Die Nutzer fahren mit der Maus auf der Oberfläche des Torus und steuern dabei einen generativen Prozess, der den Profilen entsprechend Melodien erzeugt, d.h. die Höhe jedes Balkens für einen gegebenen Ton bestimmt die Häufigkeit seines Erscheinens. Dadurch ist es möglich kontinuierlich von Tonart zu Tonart zu modulieren. Bei der unteren Darstellung ist der Torus in zwei Dimensionen aufgeschnitten und "flachgelegt" worden.



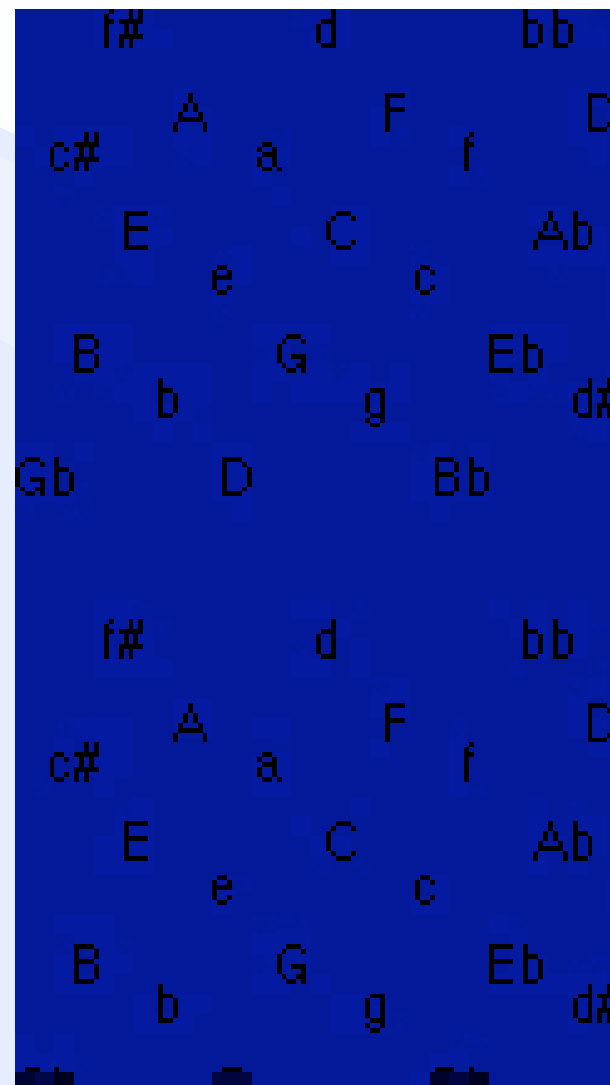
C-Dur



c-moll

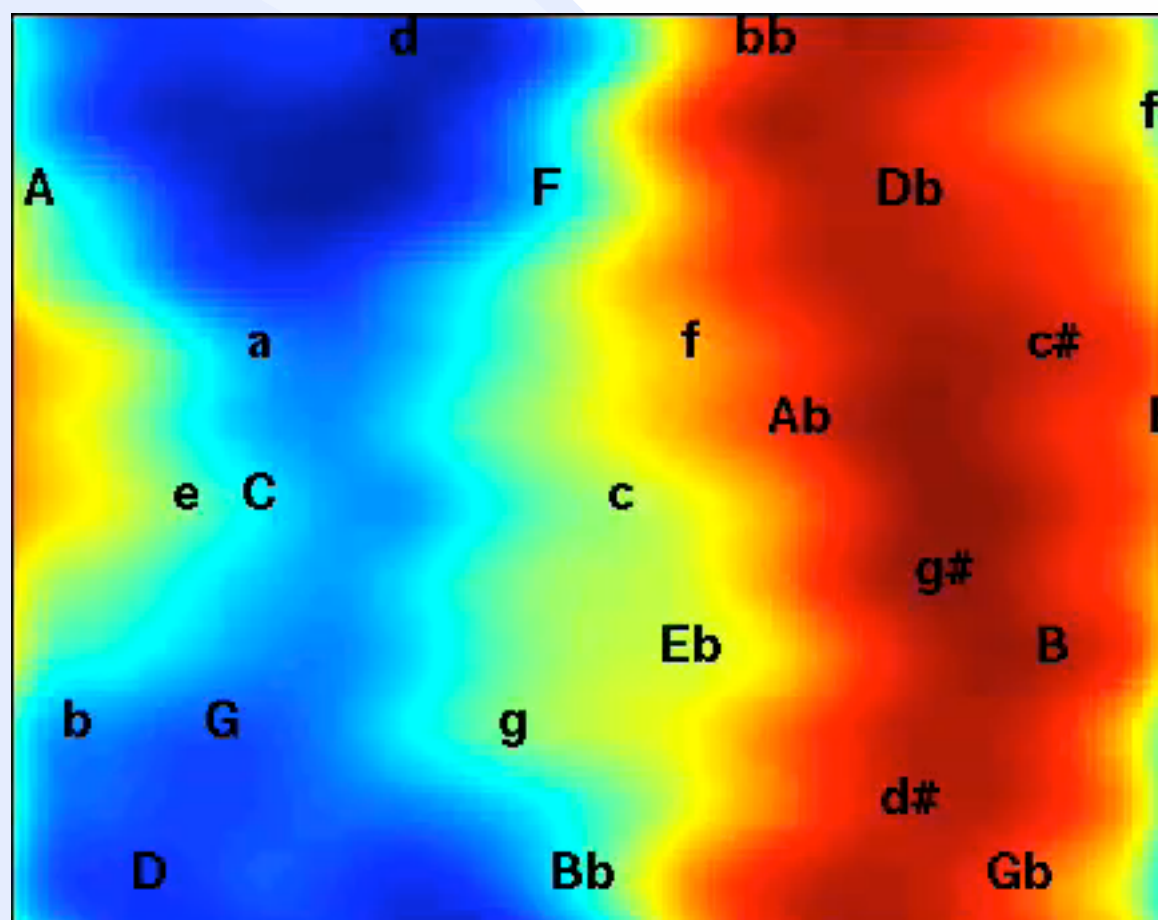


G-Dur



Mithilfe des Modell von Krumhansl lässt sich beim Einspielen von (tonaler) Musik bestimmen, welche Tonart gerade vorherrscht und wie sie sich quasi auf der Oberfläche des aufgeschnittenen Torus bewegt. Dabei werden die Zonen je heller, je deutlicher ein Tonarteneindruck ist. In der Animation (Modulation in einer Komposition von J.S. Bach) haben die Autoren die Antwort eines Experten (obere Hälfte) mit dem Output eines Computerprogramms (untere Hälfte) verglichen.

## Anderes Beispiel: Girl from Ipanema



# Die Quinte als Tonalitätsmotor



Die Quinte (3:2) nimmt in fast allen Musikkulturen eine herausragende Stellung ein. Im Gegensatz zu so genannten unvollkommenen Konsonanzen wie Terzen und Sexten werden Abweichungen der Quinte von den Hörern nicht gut toleriert. Sie weist damit eine Ähnlichkeit mit der Oktave auf, die aber als tonidentisch empfunden wird.

Die besondere Bedeutung der Quinte manifestiert sich darin, dass sie auf vier unterschiedlichen Ebenen der Musik auftritt und damit auch ein Indiz für die holistische, selbstähnliche bzw. fraktale Natur der (tonalen) Musik darstellt.

1. Teiltonreihe
2. Intervall komplexer Töne
3. Funktion: T-D
4. Tonarten: C-Dur - G-Dur

In vielen Kulturen ist die pentatonische Tonleiter verbreitet. Diese Tonleiter lässt sich durch Schichtung von 5 Quinten herleiten (pythagoräische Stimmung) und weist folgende Eigenschaften auf:

1. enthält stabile Intervalle
2. ist nahezu äquidistant
3. ist asymmetrisch
4. entspricht der 7+/- 2-Regel der Informationsverarbeitung



# Die pythagoräische Stimmung



Durch Quintschichtungen lassen sich die pentatonische (5 Quinten), die diatonische (7 Quinten) aber auch die chromatische Stimmung (12 Quinten) herleiten. Nach 12 Quinten erreichen wir ein Intervall, das nazu exakt 7 Oktaven entspricht. Die Abweichung von etwa einem Neuntelton (ca. 23 Cent) nennen wir das pythagoräische Komma. In der gleichschwebend-temperierten Stimmung wird diese Abweichung auf die 12 Quinten verteilt, wodurch die temperierte Quinte nunmehr 2 Cent zu tief ist.

Die pythagoräische Stimmung leitet sich aus den Potenzen des Verhältnisses  $3/2$  her.  $F_n = F_0 * (3/2)^n$  oder der Summation des Intervalls 701,95 Cent.

Hausaufgabe: Trage die pythagoräische Stimmung in die rechte Spalte ein.

Intervall (Name)	Frequenzverhältnis	Intervall (Größe in Cent)	temperierte Stimmung	pythagoräische Stimmung
R1	1/1	0	0	0
K2	16/15	112	100	
G2	9/8	204	200	204
K3	6/5	316	300	294
G3	5/4	386	400	408
R4	4/3	498	500	498
V5	7/5	583	600	
R5	3/2	702	700	702
K6	8/5	814	800	
G6	5/3	884	900	906
K7	16/9	996	1000	996
G7	15/8	1088	1100	
R8	2/1	1200	1200	