

Exkurs

Physik und Musik

Die Eigenschaften von Tönen und Klängen in einem Musikinstrument, ihre Erzeugung, das Zusammenklingen, die Weiterleitung von Schwingungen durch das Medium Luft in Form von Schallwellen und ihr Empfang beim Zuhörer lassen sich bis zu einem gewissen Grade physikalisch erfassen. Einiges aus der *musikalischen Akustik* ist im Folgenden zusammengestellt.

Das Erlebnis Musikhören und Musikempfinden selbst ist ein komplexes Geschehen: Die *Psychophysik* beschreibt, wie die Schallwellen im Ohr und dem zugehörigen Teil des Nervensystems als psychologische Empfindung aufgenommen werden. Die *Neuropsychologie* untersucht die Folgeprozesse speziell in der Großhirnrinde (Cortex), in der sich die Vorstellungen eines musikalischen Klangs und eines musikalischen Geschehens mit den Empfindungen der Freude oder auch der Ablehnung bilden.

Töne und Klänge

In der Physik wird unter einem Ton eine Sinuswelle von einer einzigen festen Frequenz verstanden. Dagegen besteht ein **musikalischer Ton** oder **Klang** (im Folgenden kurz *Ton*), wie ihn Musikinstrumente oder die menschliche Stimme erzeugen, aus einer Vielzahl reiner Sinustöne verschiedener Intensität mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz des Tons. Das **Klangspektrum** eines Tons besteht aus dem **Grundton** (*Grundmode*) mit der Frequenz f_0 und den **harmonischen Obertönen**, nämlich dem 1. Oberton mit der Frequenz $2f_0$, dem 2. Oberton mit $3f_0$, usw.

Grundton und Obertöne zusammen werden auch als *Partialtöne* bezeichnet. f_0 ist der 1. Partialton, $2f_0$ der 2. usw. – Das gesamte Schwingungsmuster eines Klangs wiederholt sich mit der Periode des Grundtons.

Als **Tonhöhe** des komplexen musikalischen Tons empfindet der Hörende durch die Verarbeitungsvorgänge im Ohr und im Gehirn die Frequenz f_0 des Grundtons, unabhängig vom speziellen Frequenzspektrum.

Der Hörende meint den Grundton auch dann zu hören, wenn in der Reihe der Partialtöne der Grundton fehlt. Denn das Ohr schließt aus dem Differenzton zweier aufeinanderfolgender Obertöne auf den Grundton: $n f_0 - (n-1) f_0 = f_0$, und dies umso sicherer, je zahlreicher die Paare von aufeinanderfolgenden Partialtönen im Frequenzspektrum sind. Diese *Grundtonerkennung des Gehörs* ermöglicht es dem Hörenden, dem komplexen Ton eines Musikinstruments eine einheitliche Tonhöhenempfindung, nämlich die seines Grundtons, zuzuordnen.

Die **Klangfarbe** eines länger klingenden Tons wird primär durch sein Frequenzspektrum bestimmt. Die Partialtöne und ihr Intensitätsanteil am gesamten

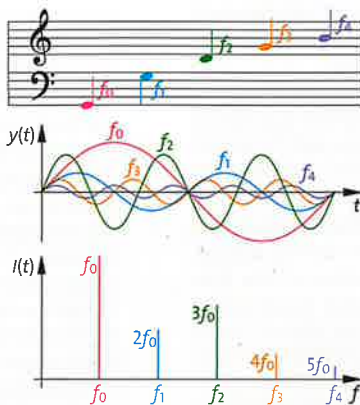
Ton sind für ein Instrument oder eine Stimme charakteristisch.

Für das Erkennen eines Instruments an seiner Klangfarbe spielen die kurzen An- und Abklingvorgänge eines Tons eine Schlüsselrolle. So kann selbst ein geübter Musiker schwerlich das verursachende Instrument erkennen, wenn ein Ton ohne seine Einschwingphase wiedergegeben wird.

Hält ein Ton längere Zeit an, ändert sich normalerweise seine Klangfarbe, da die höheren Obertöne rascher abklingen als die unteren. Ebenso ist die Klangfarbe eines stärkeren Tons heller, denn seine höheren Obertöne treten stärker hervor.

Für die **Lautstärke** eines Tons ist die gesamte Struktur des Frequenzspektrums verantwortlich. Die Lautstärke hängt von der Intensität, dem Amplitudenquadrat des gesamten Schallsignals, ab ($\rightarrow$ S. 139). Mit zunehmender Lautstärke verlagert sich bei gleicher Tonhöhe das Intensitätsmaximum auf die höheren Obertöne.

Die verschiedenen Darstellungsformen einer Partialtonreihe mit Grundton und den vier ersten Obertönen, nämlich *Notenbild*, *Schwingungsbild* und *Frequenzspektrum*, zeigt die folgende Abbildung.



Intervalle und Tonleiter

Der Zusammenklang zweier Töne wird auf dem *Monochord* untersucht. Dazu werden zwei Saiten zuerst auf die gleiche Frequenz f_1 abgestimmt und danach auf einer der Saiten, die durch einen Steg verkürzt werden kann, ein zweiter Ton mit der Frequenz $f_2 > f_1$ erzeugt. Beide Töne klingen harmonisch, wenn die Länge der zweiten Saite im Verhältnis $n:m$ ($m > n$; $m, n \in \mathbb{N}$) zur Länge der ersten, der Gesamtlänge, steht, und zwar umso wohlklingender, je kleiner m und n sind. Eine Frequenzmessung zeigt, dass das Verhältnis der Frequenzen umgekehrt zum Verhältnis der Längen der beiden Saiten ist: $f_2:f_1 = m:n$.

Zwei Töne, ob gleichzeitig oder nacheinander erzeugt, bilden ein **Intervall**, definiert durch ihr Frequenzverhältnis $f_2:f_1$ mit $f_2 > f_1$. Intervalle spielen in der Musik eine große Rolle. Wird zu einem bestimmten Grundton, z. B. zu der Note c, mit den auf Seite 145 angegebenen einfachen Verhältnissen jeweils der zweite Ton des Intervalls gesucht, so entsteht die **natürliche diatonische Tonleiter in C-Dur** mit den acht Tönen c, d, e, f, g, a, h, c' innerhalb der Oktave c – c'. Für eine Dur-Tonleiter charakteristisch sind die 5 **Ganztonschritte** (G) und die 2 **Halbtonschritte** (H) in der Reihenfolge GGGHGGH.

Würden die von den weißen Tasten auf dem Klavier angeschlagenen Saiten, von c ausgehend, mit den Intervallen 2:1, 3:2, 4:3 usw. gestimmt, so könnte auf ihnen mit den Noten der diatonischen Tonleiter nur Musik in C-Dur gespielt werden. Würde etwa auf d als Grundton die diatonische D-Dur-Tonleiter aufgebaut, hätte die Quinte d – a mit dem 5. Ton a das dort festgelegte Frequenzverhältnis $5/3:9/8 = 45/24 = 1,48$ statt $3:2 = 1,5$ wie es für die diatonische D-Dur-Tonleiter sein müsste. [Es gilt für die Intervalle: $(d-a) = (c-a):(c-d)$.]

Diese und einige andere grundsätzliche Schwierigkeiten, die sich auf dem Klavier oder der Orgel bei der natürlichen diatonischen oder der *pythagoräischen* Tonart ergäben, mildert und umgeht die **wohltemperierte Stimmung**.

Sänger, Streicher und Posaunisten haben die Schwierigkeiten nicht. Sie können nach Gehör die Frequenzen beliebig verändern und auf jedem Ton als Grundton eine natürliche Tonleiter mit ihren charakteristischen ganzzahligen Intervallen spielen.

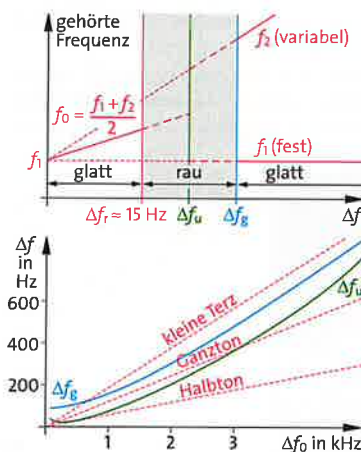
Bei der **wohltemperierten Stimmung** wird die Oktave in zwölf gleiche Halbtönschritte eingeteilt, ein Ganztonschritt gleich zwei Halbtönschritten. Für die Oktave ist dann $i^2 = 2$ oder für ein Halbtonintervall $i = \sqrt[12]{2} = 1,059463$.

Auf dem Klavier sind den 8 weißen Tasten, die für die C-Dur-Tonleiter stehen, die 5 schwarzen Tasten für die fehlenden Halbtöne hinzugefügt. Die Frequenzen der **wohltemperierten Stimmung** sind in der Abbildung auf → Seite 147 angegeben. Damit lässt sich auf jeder Taste des Klaviers auf jedem Ton eine Dur-Tonleiter mit der Tonfolge GGGGGH (ebenso eine Moll-Tonleiter) aufbauen. Zwar ist kein Intervall exakt rein harmonisch, aber die Fehler sind äußerst gering.

Konsonanz und Dissonanz

Zwei Töne klingen umso harmonischer, **konsonant**, je zahlreicher ihre gemeinsamen Obertöne sind. Bei der Oktave, Intervall 2:1, aus f_1 und $f_2 = 2f_1$ fallen alle Obertöne von f_2 , wegen $nf_2 = n \cdot 2f_1$, mit den geradzahlgigen Obertönen von

f_1 zusammen: Der Zusammenklang, die **Konsonanz** beider Töne, ist optimal. Für die Quinte mit $f_2:f_1 = 3:2$ oder $f_2 = 1,5f_1$ ist $2nf_2 = 2n \cdot 1,5f_1 = 3nf_1$, d.h. nur jeder zweite Oberton von f_2 trifft auf einen Oberton von f_1 . Dagegen stimmt für die große Sekunde, Intervall 9:8, nur jeder achte Oberton von f_2 mit einem neunten Oberton von f_1 zusammen wegen $8nf_2 = 8n(9/8)f_1 = 9nf_1$. Da die Intensität hoher Obertöne stark abnimmt, ist die **Konsonanz** sehr gering. Zum weiteren Verständnis der **Dissonanzen** sollen die **Schwebungen** genauer betrachtet werden (s. Abbildung).



f_2 und f_1 seien zwei **reine** Sinustöne, f_1 eine feste Frequenz, f_2 sei veränderbar. Solange $\Delta f = |f_2 - f_1| < \Delta f_r$ ist – Δf_r ist die sogenannte **Rauigkeitsfrequenz**, die bei 15 Hz liegt –, hören wir den „glatten“ Schwebungston $f_0 = (f_1 + f_2)/2$

(→ S. 119); seine Lautstärke ändert sich mit der Schwebungsfrequenz $f_s = f_2 - f_1$. Wird f_2 weiter verändert, wird der Zusammenklang bis zur **Frequenzunterscheidungsgrenze** Δf_u unangenehm rau (s. Abbildung). Von Δf_u und bis zur **Frequenzgruppengrenze** Δf_g hören wir dann plötzlich zwei getrennte, aber immer noch unangenehm raue Töne. Erst oberhalb Δf_g sind die beiden reinen Sinustöne f_1 und f_2 getrennt zu hören. Die (fließenden) Grenzen Δf_u und Δf_g hängen stark von der mittleren Tonhöhe f_0 ab. So müssen zwei Töne von 2 kHz mindestens 200 Hz auseinanderliegen, um unterschieden zu werden, und mehr als 300 Hz, um „glatt“ zu klingen.

Daher sind für die Frage der Dissonanz die Schwebungseffekte auch der (reinen) Obertöne zu berücksichtigen.

Geigen erzeugen auffallende Obertöne, ihr reicher Klang ist auf die Tönung mit komplexen Dissonanzen zurückzuführen. Der Ton der Klarinette dagegen klingt wegen nur schwacher Obertöne rein. Die Grenze der Tonhöhenunterscheidung ist größer als ein Halbton, bei extrem hohen und tiefen Tönen größer sogar als ein Ganzton, d.h. also, dass ganz tiefe Töne (unter 200 Hz) und hohe Töne (über 3000 Hz) nur gut zu unterscheiden sind, wenn sie einen Ganzton auseinanderliegen. Tiefe Töne müssen offenbar weiter getrennt sein, um als konsonant zu klingen. Tatsächlich findet man in der Klaviermusik beispielsweise bei tiefen Dreiklängen häufig große Intervalle, während bei solchen im Diskant die Töne näher zusammenrücken.

vollkommene Konsonanzen				unvollkommene Konsonanzen				Dissonanzen			
Prime	1:1	c–c	(1:1)	große Terz	5:4	c–e	(81:64)	große Sekunde	9:8	c–d	(9:8)
Oktave	2:1	c–c'	(2:1)	kleine Terz	6:5	e–g	(32:27)	kleine Sekunde	10:9	d–e	(256:243)
Quinte	3:2	c–g	(3:2)	große Sexte	5:3	c–a	(27:16)	große Septime	15:8	c–h	(243:128)
Quarte	4:3	c–f	(4:3)	kleine Sexte	8:5	e–c'	(128:81)	kleine Septime	9:5	c–b	(16:9)

Intervalle der natürlichen diatonischen Tonleiter am Beispiel der C-Dur-Tonleiter (in Klammern die Intervalle der pythagoräischen diatonischen Tonleitern). Angegeben sind die Bezeichnungen der Intervalle und ihr Frequenzverhältnis sowie als Beispiel die Noten der C-Dur-Tonleiter. Die kleine Septime mit der Note b liegt nicht mehr innerhalb der C-Dur-Tonleiter.

Note (n)	c (1)	d (2)	e (3)	f (4)	g (5)	a (6)	h (7)	c' (8)
$f_n:f_1$	1:1 = 1,000	9:8 = 1,125	5:4 = 1,250	4:3 = 1,333	3:2 = 1,500	5:3 = 1,667	15:8 = 1,875	2:1 = 2,000
$f_{n+1}:f_n$	9:8 = 1,125	10:9 = 1,111	16:15 = 1,067	9:8 = 1,125	10:9 = 1,111	9:8 = 1,125	16:15 = 1,067	

Frequenzverhältnisse der natürlichen diatonischen C-Dur-Tonleiter von Ton zu Grundton $f_n:f_1$ und von Ton zu vorhergehendem Ton $f_{n+1}:f_n$. Die Tonschritte einer Dur-Tonleiter (untere Zeile) sind immer: GGGGGH. Ganzton (G) 1,1..., Halbton (H) 1,0...).

Exkurs

Musikinstrumente und menschliche Stimme

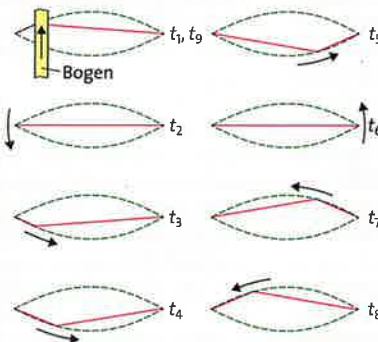
Saiteninstrumente

Mit einer gespannten Saite lassen sich durch Zupfen (Harfe, Gitarre, Cembalo), Streichen (Streichinstrumente) oder Anschlagen (Klavier) Töne erzeugen, deren Frequenzen durch Länge, Gewicht und Spannung der Saiten in weiten Grenzen verändert werden können. Beim Zupfen und Anschlagen wird Energie einmalig auf die Saite übertragen, beim Streichen stetig. Je nach der Anregungsart schwingen die Saiten in einem charakteristischen Frequenzspektrum aus Grundton und zugehörigen Obertönen. Nachteil einer Saite ist ihre schlechte Schallabstrahlung. Daher wird die Saitenschwingung – möglichst verlustfrei und frequenzunabhängig – zunächst auf einen Resonator übertragen, der eine wesentlich größere schwingende Fläche besitzt: den Korpus von Geige oder Gitarre, den Resonanzboden von Klavier oder Flügel usw. Der mitschwingende Resonator überträgt dann seine Energie – möglichst bei allen Frequenzen weitgehend proportional zur Amplitude der Saitenschwingung – an die Luft. Boden und Decke einer Geige oder Gitarre zeigen bei einer Reihe von Frequenzen Eigenschwingungen oder *Moden*. Die linke Abbildung zeigt für einen besonders ausgeprägten Schwingungszustand einer Gitarre die Moden bei 268 Hz, die durch Interferenz aufnahmen sichtbar gemacht sind. Die Klangfarbe des erzeugten Tons ist sowohl durch das ursprüngliche Schwingungsspektrum der Saite als auch durch das komplexe Verhalten des Resonanzkörpers bestimmt. Eine Geigensaite schwingt im Gegensatz etwa zur Klaviersaite komplexer. Der Bogen haftet so lange an der Saite, die dabei in Form eines Dreiecks ausgelenkt wird, bis die Rückstellkraft größer als die Haftreibung zwischen Bogen und Saite ist. Während der Zeit einer Schwingung läuft dann der scharfe Knick auf der Saite hin und her und beschreibt dabei die grüne Hüllkurve, die



der Form einer stehenden Welle entspricht, bevor sich der Vorgang wiederholt und der Bogen wieder haftet. In der rechten Abbildung sind acht Phasen einer solchen Schwingung der Geigensaite dargestellt.

Die heutigen Klaviere sind gleichschwebend temperiert gestimmt. Jede Oktave ist in zwölf gleiche Tonschritte unterteilt. Die Klaviersaiten bestehen aus dicken steifen Stahldrähten. Die Frequenzen ihrer höheren Partialtöne sind wegen der Steifigkeit dieser Drähte keine genauen Vielfachen des Grundtons – sie liegen etwas „zu hoch“. Das gibt der Saite ihre besondere Klangfarbe und dem Klavier seinen typischen „Ton“. Von 88 Tasten sind 10 für die tiefsten Töne einfach, „einchörig“, besaitet, dann die folgenden 18 mit doppelten



Saiten, „zweichörig“, und schließlich 60 dreifach, „dreichörig“.

Das hat zwei Gründe. Einmal wird die Energie des Hammers beim Anschlag i. Allg. auf zwei oder drei Drähte übertragen; der Ton wird dadurch kräftiger, als wenn nur ein Draht für die Saiten vorhanden wäre.

Zum anderen schlägt fast jeder Hammer gleichzeitig zwei oder drei Drähte an, die unvermeidlich nicht mit absolut derselben Frequenz schwingen und daher leichte Schwebungen erzeugen. Diese Tatsache trägt ebenfalls dazu bei, dass das Klavier bei verschiedenen Tönen seinen charakteristischen Klang erhält. Der Ton klingt voller, „wärmer“.

Das Gleiche gilt übrigens auch für ein Orchester, wenn z. B. auf mehreren Geigen auch von guten Musikern derselbe

Ton gespielt wird. Unvermeidliche Frequenzunterschiede schon von ein, zwei Hertz im Grundton führen zu Schwebungen. Der Ton wirkt „wärmer“, als wenn er von einem Einzelnen gespielt wird.

Blasinstrumente

Die (Orchester-)Praxis unterscheidet zwischen Blech- und Holzblasinstrumenten. Zu Ersteren zählen Posaune, Trompete, Horn, zu den Letzteren Oboe, Fagott, Klarinette, Saxophon, Flöte. Bei Blasinstrumenten erfolgt die Tonerzeugung im Gegensatz zu den Saiteninstrumenten im Resonator selbst. Der Resonator hat meist röhrenförmige Gestalt. Die darin eingeschlossene Luft wird zu erzwungenen Schwingungen erregt, die im Resonanzfall besonders kräftig sind. Diese in dem Luftvolumen der Röhre

erzeugten Schwingungszustände sind stehende Wellen mit offenen und geschlossenen Enden. Die Schwingungen werden durch periodische Druckänderungen der Luft an einem Ende der Röhre erzeugt, und zwar auf zwei gängige Arten: Luftwirbel an einem kantenförmigen Hindernis (*Kantentöne*, *Lippentöne*) oder Druckänderungen durch eine schwingende Lamelle

(*Zungentöne*).

Bei der *Labial- oder Lippentpfeife* werden durch einen Luftstrom an einer Kante Wirbel erzeugt, die das Einschwingen der Pfeife bewirken. Bei der *Lingual- oder Zungenpfeife* wird eine dünne elastische Zunge aus Metall, Schilfrohr o. Ä. durch den Luftstrom in Schwingungen versetzt.

Das Prinzip der *Kantentöne* wird bei den Flöten und bei der einen Gruppe von bestimmten Orgelpfeifen verwendet, das der *Zungentöne* bei Oboe, Klarinette, Fagott, Saxophon, Harmonika, Harmonium und auch bei der Orgel. Trompete, Posaune, Horn und Tuba werden ebenfalls durch Zungentöne angeregt. Nur besteht der sich periodisch öffnende Spalt hier aus den Lippen des Bläasers.

Schlaginstrumente

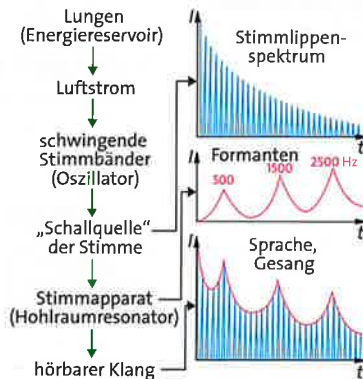
Trommeln, Glocken, Becken, Xylophone u. a. m. werden durch Anschlagen zum Schwingen gebracht. Die Große Trommel oder Basstrommel ist eines der lautesten Musikinstrumente; sie wird an Schallleistung nur noch von großen Glocken und Orgeln übertroffen. Die Eigenschwingungen von Schlaginstrumenten, deren Muster sich zwei- oder dreidimensional ähnlich den Chladni'schen Klangfiguren ausbilden, hängen von der Elastizität des Materials, seiner Dichte und den Abmessungen ab. Ebenso aber spielt die Art und die Stelle der Anregung eine Rolle.

Die menschliche Stimme

Zur Schallerzeugung werden durch den Luftstrom aus der Lunge, der aus ihr mit 0,005 bis 0,04 atm gepresst wird, die Stimmbänder im Kehlkopf zu Schwingungen gebracht, mit Frequenzen von 70 Hz bis 200 Hz bei Männern, von 140 Hz bis 400 Hz bei Frauen, bei geübten Sängern auch bis 880 Hz. Die von den Stimmbändern erzeugten kurzen Schallimpulse regen die Luft im Hohlraum von Mund, Rachen und Nase zu Eigenschwingungen an. Dieser Kopfbereich bildet einen Hohlraumresonator

mit breiten Resonanzfrequenzen, den **Formanten**, die bei etwa 500 Hz, 1500 Hz, 2500 Hz und 3500 Hz liegen. Bei diesen Frequenzen ist die Verstärkerwirkung des Stimmapparates besonders groß.

Oben ist das Schema des Energieflusses



im Stimmapparat aufgeführt; links das Flussdiagramm, rechts die Stimmbandschwingungen (oben), die durch die Formanten des Hohlraumresonators (Mitte) verändert und teilweise verstärkt werden (unten).

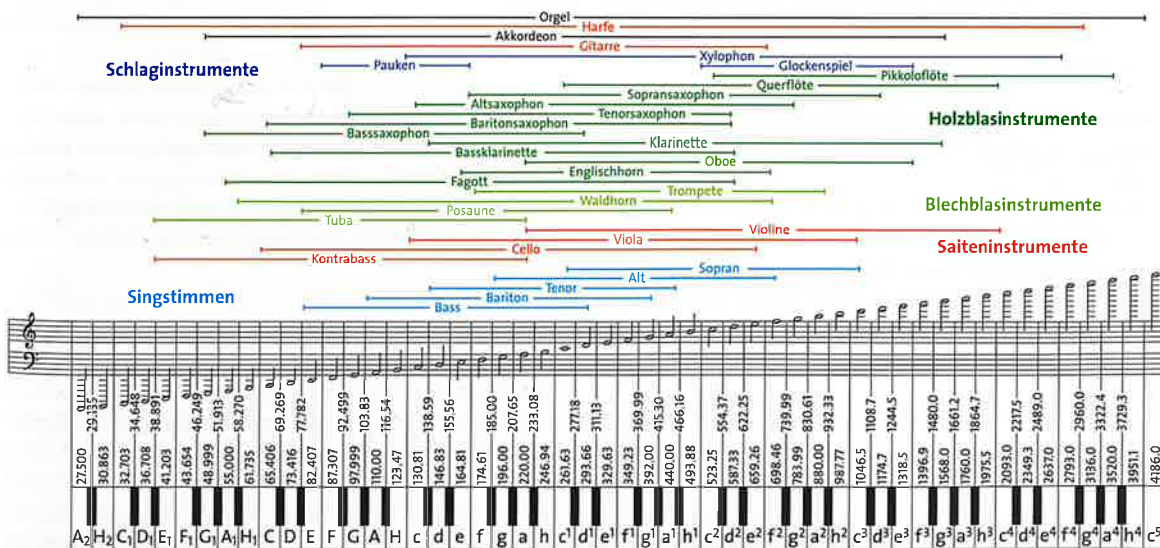
Die Frequenz der Stimmbandimpulse legt lediglich die Grundfrequenz, die

Tonhöhe der Stimme, fest. Die Verschiedenheit der Vokale richtet sich nach der augenblicklichen Gestalt des Hohlraumresonators von Mund, Rachen und Nase aus, vor allem veränderbar durch die Form und Stellung der Zunge.

Die *Frequenzspektren der Vokale* unterscheiden sich durch die Intensitätsverhältnisse der Obertöne. Sie erstrecken sich für Vokale von etwa 100 Hz bis 4000 Hz, bei Konsonanten, vor allem bei den Zischlauten, jedoch bis etwa 10 000 Hz.

Elektronische Musikinstrumente

Synthesizer und Keyboards, Computer, Sampler, Sequencer, Home- und Stagepianos usw. prägen die Aufführungen zeitgenössischer E- und U-Musik. Computer mit ihren Möglichkeiten zur elektronischen Klangerzeugung und Klangverarbeitung ermöglichen eine große Zahl neuer musikalischer Effekte, die mit konventionellen Musikinstrumenten nur unvollkommen erreicht werden können: kontinuierliche Veränderung der Tonhöhe des Obertonspektrums, Einbeziehung aller Arten von Geräuschen, Speicherung und automatische Wiederholung auch längerer Klangfolgen u. a. m.



Die Frequenzbereiche der gängigen Musikinstrumente. Über den 88 weißen und schwarzen Tasten des Klaviers sind die Frequenzen der gleichmäßig temperierten Stimmung, ausgehend vom Kammerton 440 Hz für das eingestrichene a^1 , aufgetragen.