

Physikalische Aspekte der Musik

Musik kann sicherlich genossen werden, ohne ihre physikalischen Grundlagen zu verstehen, doch verhilft die Kenntnis der Akustik zu einem tieferen Verständnis der Musik, des Aufbaus der Tonsysteme und der Technik der Musikinstrumente. Dieser Beitrag gibt eine kleine Einführung in die Eigenschaften des Schalls, die in der Musik genutzt werden. Es wird gezeigt, wie der Mensch Klänge aufnimmt, und an der Funktionsweise des Ohres wird erläutert, warum manche Klänge als harmonisch, andere als dissonant empfunden werden. Die Bedeutung der Naturtöne als Grundlage unserer Tonarten wird erklärt.

Beim Vortrag in Matrei wurden die Klangbeispiele am Computer erzeugt und demonstriert. So konnte man etwa in der Obertonreihe die in der Musik benutzten Intervalle erkennen und das Tonsystem logisch aufbauen. Im Bericht besteht die Schwierigkeit, daß zum Verständnis der Klangbeispiele schon die Kenntnis des Tonsystems vorausgesetzt werden muß.

Schall

Schwankungen des Luftdrucks nimmt unser Ohr als Schalleindruck wahr. Je nach Art dieser Änderungen empfinden wir sie als Geräusche, Klänge oder Töne. Geräusch ist dabei ein Oberbegriff, keine Anforderungen werden an die Luftdruckänderungen gestellt; Klänge bilden das hauptsächliche Arbeitsmaterial der Musik, sie sind gekennzeichnet durch periodisch wiederholte Änderungen, also durch Schwingungen. Ein Spezialfall der Klänge sind die Töne, bei denen diese Schwingungen sinusförmig sind. Reine Sinustöne kommen bei natürlichen Musikinstrumenten nicht vor, sie sind aber wichtig in der Physik bei der Analyse von Klängen. Die Begriffe Ton und Klang werden nicht immer klar getrennt, die „Töne“ der Musikinstrumente sind in Wirklichkeit „Klänge“. Die physikalische Einteilung der Geräusche stimmt nicht mit der psychologischen überein, dort versteht man unter Klang den subjektiven Höreindruck. Wir empfinden einen Ton um so höher, je schneller die Schwingung abläuft. Die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde mißt man in Hertz (Hz). Der Kammerton, das eingestrichene a, ist international auf 440 Hz festgelegt.

Schallerzeugung

Musikinstrumente geben mechanische Schwingungen an die Luft weiter, durch die sie an das Ohr gelangen und als Klänge wahrgenommen werden. Die mechanischen Schwinger treten in drei Formen auf;

- Saite, etwa bei Geige, Klavier, Harfe und Gitarre.
- Luftsäule, etwa bei Flöte, Trompete, Orgelpfeife und Oboe.
- Platte und Membran, etwa bei Pauke, Becken und Glocke.

Unterschiedliche Tonhöhen werden dadurch erzeugt, daß die schwingenden Teile mehrfach vorhanden sind – Klaviersaiten oder Orgelpfeifen – und immer nur einige ausgewählt werden; oder durch Verlängern oder Verkürzen der schwingenden Saitenlängen und durch Vergrößern und Verkleinern der Luftsäule bei Blasinstrumenten. Diese Änderungen sind bei manchen Instrumenten nur in festen Schritten möglich, wie zum Beispiel bei der Gitarre, wo die möglichen Saitenlängen durch die Lage der Bünde auf dem Griffbrett bestimmt sind oder bei der Trompete, deren Ventile den schwingenden Luftraum nur um feste Längen verändern. Bei anderen Instrumente lassen sich Saitenlänge und Luftraum stetig verändern, sie erlauben daher Zwischentöne und gleitende Übergänge, man denke etwa an Streichinstrumente und an die Zugposaune. Eine dritte Art unterschiedliche Tonhöhen zu erzeugen besteht in der Weise der Schwingungsanregung. Unterschiedliches Anblasen ändert die Tonhöhe bei Signalhörnern und Barock-Trompeten trotz gleichbleibender Länge des Trompetenrohrs.

Schwingungen

Das Pendel liefert das einfachste Beispiel eines schwingenden Systems. Die Pendelmasse, aus der Ruhelage gezogen und losgelassen, strebt zurück, überschreitet durch ihren Schwung den Ruhepunkt und steigt auf der anderen Seite hoch, wird langsamer und kehrt im höchsten Punkt ihrer Bahn die Bewegung um. Es findet ein steter Wechsel zwischen Bewegungsenergie und Energie der Lage statt. Ist die zurücktreibende Kraft proportional zur Auslenkung so ergibt sich eine sinusförmige Schwingung. Das Brummen eines Lautsprechers, Wähltöne beim Telefon oder Töne, die man gelegentlich beim Umschalten von Radiosendern hört sind Beispiele für Sinustöne. Sie kommen bei Musikinstrumenten in reiner Form kaum vor,

aber der Klang einer Glasharmonika kommt einem Sinuston sehr nahe. Ebenso eine schwach angeschlagene Stimmgabel, denn bei kleinen Amplituden sind in allen schwingenden Systemen die Kräfte annähernd proportional zur Auslenkung. Sinusschwingungen sind so wichtig bei akustischen Untersuchungen, weil sich alle Klänge durch Überlagerungen von Sinusschwingungen annähern lassen. Das entdeckte der französische Mathematiker F. Fourier (1772–1837), nach ihm nennt man die Zerlegung eines Klanges in seine sinusförmigen Komponenten „Fourier-Analyse“. Will man wissen, wie ein akustisches System – zum Beispiel ein Verstärker mit Lautsprechern – zusammengesetzte Klänge wiedergibt, so untersucht man seine Wirkung auf Sinustöne und überlagert die Ergebnisse. Das Verhalten bei sinusförmigen Schwingungen ist mathematisch oft einfach zu bestimmen. Eine Rechtecksschwingung hat die Zerlegung $r(t) = \sin(t) + \sin(3t)/3 + \sin(5t)/5 \dots$. Bild 1 zeigt auf der linken Seite die Komponenten $\sin(t)$, $\sin(3t)/3 \dots \sin(11t)/11$. Rechts sind die Überlagerungen der ersten Komponenten dargestellt, die der Rechtecksform um so näher kommen, je mehr Komponenten man hinzu nimmt. Ganz unten ist die Summe der ersten 15 Komponenten abgebildet.

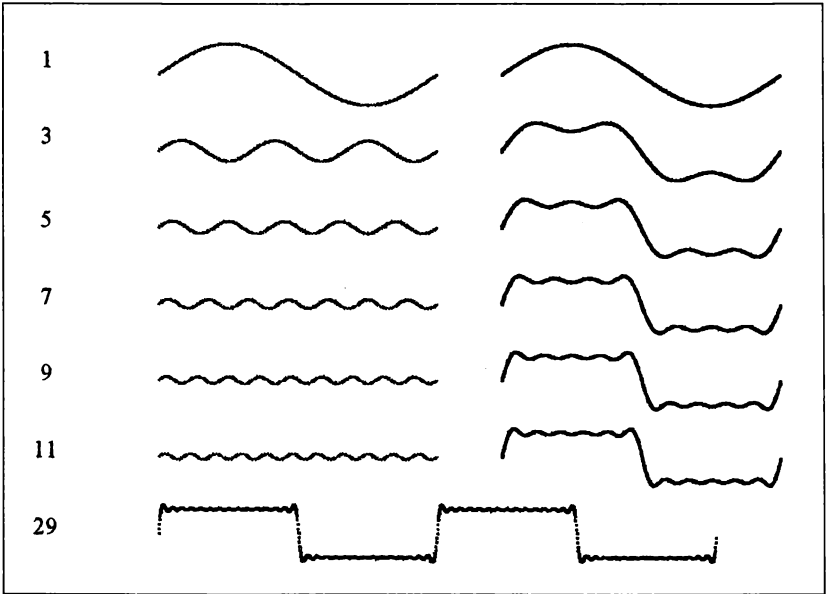


Bild 1
Approximation einer Rechtecksschwingung durch Sinusschwingungen.

Schallwahrnehmung

Wir nehmen nicht die einzelnen Schwingungen der Luft wahr, sondern unser Ohr setzt diese in Nervenreize um, das Gehirn gewinnt daraus einen Höreindruck. Das menschliche Ohr ist ein überaus leistungsfähiges Sinnesorgan, es erfäßt in der Jugend Schwingungen von etwa 16 Hertz, tiefer als ein Kontrabaß, bis über 20000 Hertz, weit höher als eine Pikkoloflöte oder Triangel. Das sind mehr als zehn Oktaven. Zum Vergleich sieht unser Auge nur Farben – elektromagnetische Schwingungen – in einem Frequenzbereich kleiner als eine Oktave. Dafür ist der Farbeindruck allerdings absolut, wir erkennen eine rote Ampel ohne eine Farbtabelle zu benötigen. Das Ohr erkennt nur Frequenzintervalle. Zur exakten Bestimmung der Tonhöhe brauchen wir den Vergleichston einer Stimmgabel – abgesehen von wenigen Menschen, die ein absolutes Gehör besitzen. Auch der dynamische Umfang unseres Hörbereichs ist beeindruckend, zwischen dem gerade noch wahrnehmbaren „Fallen einer Stecknadel“ und dem lautesten Lärm, der das Ohr noch nicht auf Dauer schädigt, etwa dem eines Preßlufthammers in nächster Nähe, liegen etwa dreizehn Zehnerpotenzen an Intensität.

Das Ohr besteht aus drei Bereichen: Außenohr, Mittelohr und Innenohr. Das Außenohr mit der Ohrmuschel leitet den Schall durch den Gehörgang ans Mittelohr. Schallwellen erreichen unsere beiden Ohren nicht gleichzeitig, aus dem Unterschied schließen wir auf die Richtung der Schallquelle. Die Ohrmuscheln verbessern die Ortung, weil sie den Schall richtungs- und frequenzabhängig sehr unterschiedlich dämpfen. Der Gehörgang ist ein Resonator für Frequenzen um 3000 Hertz, sodaß wir in diesem Bereich besonders deutlich hören. Den Gehörgang schließt das Trommelfell zum Mittelohr ab.

Drei Knöchelchen sind beweglich verbunden, der Hammer – mit dem Trommelfell verwachsen –, der Amboß und der Steigbügel. Sie setzen die vom Schall angeregten weiten Bewegungen des Trommelfells in kräftige Schwingungen ganz geringer Amplitude um. Diese werden an eine Membran über dem sogenannten Ovalen Fenster an das Kortische Organ im Innenohr weitergegeben. Das enthält eine etwa drei Zentimeter lange Kammer, schneckenförmig aufgewickelt, mit Flüssigkeit gefüllt und der Länge nach durch die Basilarmembran unterteilt. Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau der abgewickelten Schnecke.

Die Schallwellen durchlaufen vom Ovalen Fenster herkommend die Flüssigkeit bis zum Ende und kehren dann in anderen Kammer zurück zum Runden Fenster, das auch mit einer Membran abgeschlossen ist. Die Druckunterschiede in den beiden Kammern führen zu einer Verbiegung der

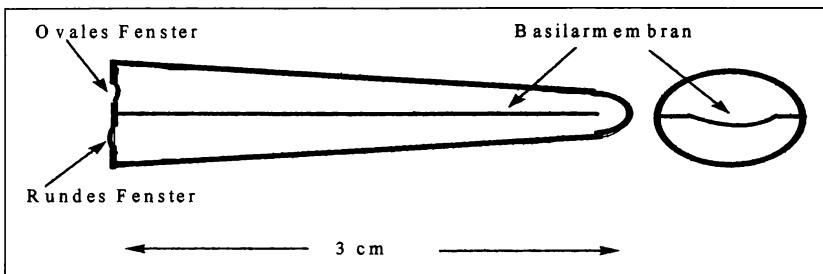


Bild 2
Schematisches Bild der abgewickelten Schnecke.

Basilarmembran. Der Ort der stärksten Auslenkung hängt von der Frequenz der Schallwelle ab (Bild 3). Die Basilarmembran ist mit Nervenzellen bestückt, die auf die Verformung reagieren und über unterschiedliche Nervenfasern elektrische Signale an das Gehirn senden. Aus dem Entstehungs-ort schließt das Gehirn auf die Tonhöhe.

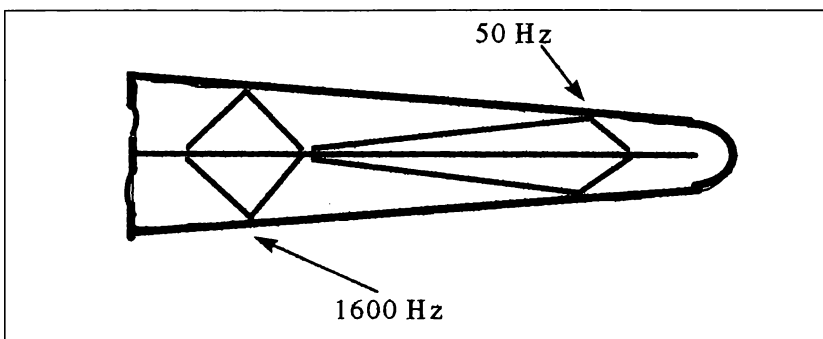


Bild 3:
Auslenkung der Basilarmembran (Schematisch, überhöht dargestellt) in Abhängigkeit von der Frequenz.

Der Mechanismus der Mittelohrknöchelchen erscheint auf dem ersten Blick sehr umständlich zu sein. Er löst aber sehr elegant die Aufgabe, Luftschwingungen an eine Flüssigkeit weiterzugeben, ohne daß an der Übergangsschicht durch Reflexion große Verluste auftreten. Daß dieses ein Problem ist merkt man beim Tauchen; mit den Ohren unter Wasser hört man kaum Geräusche von außerhalb des Wassers. Bei Meeressäugern, wie Walen und Delphinen, die ständig im Wasser leben, sind die Mittelohrknöchelchen zurückgebildet, weil der Übergang von Luft zu Wasser entfällt (Pohl 1955).

Beim Hören eines Klanges treten an verschiedenen Stellen der Basilarmembran unterschiedliche Auslenkungen auf, es findet eine Fourier-Analyse statt. Wir erkennen nur die Teilfrequenzen, nicht die genaue Form der Schwingung.

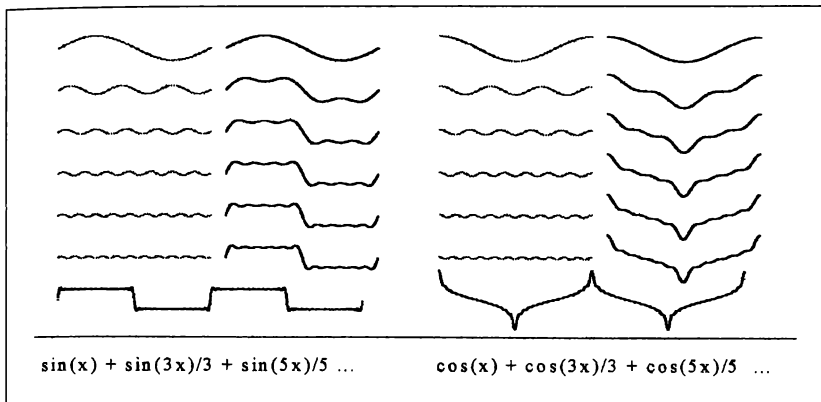


Bild 4
Gleichklingende Klänge unterschiedlicher Schwingungsform.

Daß dieses so ist, läßt sich am Computer demonstrieren. Die oben betrachtete Rechteckschwingung verändern wir, indem wir alle Teiltöne um Viertel ihrer Wellenlänge verschieben, das heißt wir ersetzen den Sinus durch den Kosinus. Der neue Klang enthält die gleichen Teilfrequenzen in gleicher Stärke, der Druckverlaufs hat aber eine ganz andere Form (Bild 4). Beim Abspielen dieser synthetischen Klänge ist kein Unterschied zu hören.

Musikinstrumente

Die ersten bekannten physikalischen Untersuchungen stammen von Pythagoras und seiner Schule. Sie erkannten die Abhängigkeit der Höhe eines Klanges von der Länge einer Saite und stellten fest, daß zu harmonisch klingenden Intervallen Saitenlängen gehören, die in einem einfachen Zahlenverhältnis stehen.

Die Schwingungen einer an beiden Enden eingespannten Saite lassen sich leicht errechnen. Es stellen sich die in Bild 5 dargestellten Sinusschwingungen heraus. Dabei hat die Grundschiwingung einen Schwingungsbauch – eine Stelle maximaler Bewegung – in der Mitte der Saite, die nächste Schwingung hat zwei Bäuche, dann drei und so fort. Die Stellen, an denen die Saite in Ruhe bleibt, heißen Knoten. Die Frequenzen sind der Zahl Bäue-

che proportional, das heißt die zugehörigen Töne haben die doppelte, dreifache, vierfache... Frequenz.

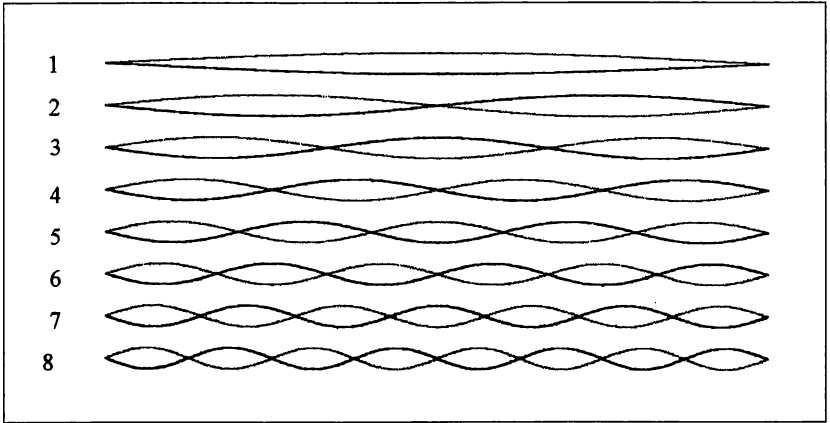


Bild 5
Grundschwingungen einer Saite.

Diese Töne nennt man die Obertöne der Grundfrequenz, sind ihre Frequenzen wie bei der Saite ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz, so spricht man von harmonischen Obertönen oder Naturtönen. Die Klänge der schwingenden Saite ergeben sich aus Überlagerungen der Grundschwingungen. Hört man die Obertöne dieser Reihe einzeln an, so entdeckt man einige in der Musik verwendete Intervalle. Zwischen dem Grundton und dem ersten Oberton liegt eine Oktave. Der Oktave entspricht also eine Verdoppelung der Frequenz. Eine Quinte findet man zwischen dem zweiten und dritten Ton, die in einem Frequenzverhältnis von zwei zu drei stehen. Der vierte, fünfte und sechste formen einen Dreiklang.

Oberton	Verhältnis zur vorausgehenden Oktave	Intervallname	Verhältnis zum vorausgehenden Ton	Intervallname
1	1:1	Prime		
2	2:1	Oktave	2:1	Oktave
3	3:2	Quinte	3:2	Quinte
4	4:2 = 2:1	Oktave	4:3	Quarte
5	5:4	Große Terz	5:4	Große Terz
6	6:4 = 3:2	Quinte	6:5	Kleine Terz
7	7:4	Naturseptime	7:6	
8	8:4 = 2:1	Oktave	8:7	

Tabelle 1
Musikalische
Intervalle

Die Tabelle 1 zeigt die Intervalle der Obertonreihe zum Grundton und zum vorangehendem Ton, die Schwingungsverhältnisse und musikalischen Bezeichnungen. Bei eine Oktave übersteigenden Intervallen ist der Name des Intervalls vom Grundton zu dem in die Grundoktave transponierten Ton angegeben. Durch die Weise des Anschlags einer Saite, des Anstreichens oder Zupfens kann man beeinflussen, wie stark die einzelnen Obertöne angeregt werden. So trifft etwa beim Klavier der Hammer die Saiten bei einem Siebtel ihrer Länge; dort liegt ein Schwingungsknoten des siebten Obertons, so daß die Naturseptime unterdrückt wird.

Auch bei Blasinstrumenten schwingt die Luftsäule mit den Frequenzen der Obertonreihe. Bei Barock-Trompeten oder Signalhörnern, bei denen man die Länge der Luftsäule nicht durch Öffnen und Schließen von Ventilen variieren kann, erzeugt man die Naturtöne durch unterschiedliche Mund- und Lippenstellung beim Anblasen. Die hohe Tonlage der Barock-Trompete ergibt sich aus der Forderung nach möglichst vielen Tönen innerhalb einer Oktave; erst im Oktavbereich zwischen dem vierten und achten Oberton kommen drei Zwischentöne vor. Als Beispiel möge das Trompetensignal aus der dritten Leonoren-Ouvertüre dienen, das Beethoven nur aus Naturtönen aufgebaut hat (Menuhin 18).

Bei ausgedehnten schwingenden Körpern wie Platten oder Glocken gibt es auch nichtharmonische Obertöne, also Teilschwingungen, deren Frequenzen nicht in einem einfachen Zahlenverhältnis stehen. Glockenspiele oder sogar einzelne Glocken klingen daher oft dissonant.

Klangfarbe

Der schwingende Teil eines Musikinstrumentes muß die umgebende Luft in Bewegung setzen, damit der Schall unser Ohr erreichen kann. Eine schwingende Saite hat eine kleine räumliche Ausdehnung und trifft bei ihrer Bewegung nur wenig Luft. Wenn der Klang einer Violine trotzdem einen Konzertsaal ausfüllen kann, so liegt das daran, daß die Schwingungen der Saite durch den Steg auf den Violinkörper übertragen werden, der sie großflächig an die Luft weitergibt. Der Violinkörper ist selbst ein stark gedämpfter, schwingender Körper mit einer sehr komplexen Struktur von Teilschwingungen. Je nach Übereinstimmung der Obertöne der Saite mit denen des Körpers werden die Teiltöne unterschiedlich verstärkt oder abgeschwächt. Dieses beruht auf dem Prinzip der Resonanz: Eine kleine periodische Anregung mit der richtigen Frequenz kann eine große Masse zum Schwingen bringen; das wird bei der Pendeluhr oder beim Schaukeln deutlich, die durch kleine Impulse im richtigen Takt in Bewegung gehalten

werden. Die Kunst der Geigenbauer besteht darin, dem Geigenkörper die richtigen Resonanzfrequenzen zu geben.

Die Klangfarbe eines Instrumentes ergibt sich einerseits aus der Stärke, mit der die einzelnen Obertöne wiedergegeben werden. Bei Blasinstrumenten hängt das Obertonspektrum von der Form des Rohres und damit der Luftsäule ab. So klingt das zylindrische Rohr der Trompete anders als das konische Waldhorn und die Vielfalt der Orgelklänge wird durch die unterschiedlichen Formen der Orgelpfeifen erreicht. Andererseits erkennen wir ein Instrument daran, wie die Töne an- und abklingen. Beim Klavier beginnt der Klang laut mit dem Anschlag des Hammers um danach abzuklingen. Bei der Orel gerät die Luft im Inneren einer Pfeife nach dem Tastendruck erst langsam ins Schwingen. Klaviermusik, rückwärts abge spielt, klingt daher ähnlich wie Orgelmusik.

Konsonanz

Werden zwei Sinustöne mit nur leicht verschiedenen Frequenzen gleichzeitig gespielt, so hören wir nur einen Ton, dessen Lautstärke periodisch an- und abschwilt. Eine Weile sind beide Wellen in gleicher Phase und ihre Wirkungen verstärken sich; danach laufen die Phasen auseinander, bis ein Wellenberg der einen Schwingung mit einem Tal der anderen zusammenfällt, so daß sich die Wirkungen aufheben (Bild 6). Langsames An- und Abschwellen heißt Schwebung, schnelles nennt man Tremolo.

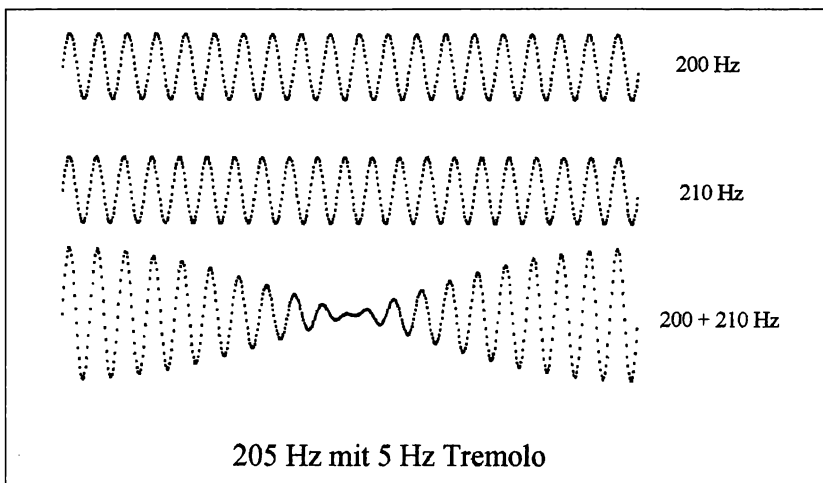


Bild 6
Schwebungen.

Vergrößert man den Abstand der beiden Frequenzen, so wird das Tremolo immer schneller, bis es nicht mehr als solches empfunden wird. Im Basilar-membran des Innenohres werden dann nahe beieinander liegende Nervenzellen gereizt, das Gehirn ist irritiert, es kann nicht entscheiden, ob ein Ton wechselnder Lautstärke gehört wird oder zwei unterschiedliche Töne. Die Situation ist unangenehm, dissonant. Vergrößert man den Frequenzunterschied weiter, so löst sich der Konflikt, beide Töne werden deutlich getrennt gehört. Zwei Sinustöne, die sich um mehr als eine kleine Terz unterscheiden, klingen konsonant und stehen ihre Frequenzen in einem noch so krummen Verhältnis zueinander. Bild 7 zeigt den Verlauf der Konsonanz als Funktion des Frequenzverhältnisses (Pierce).

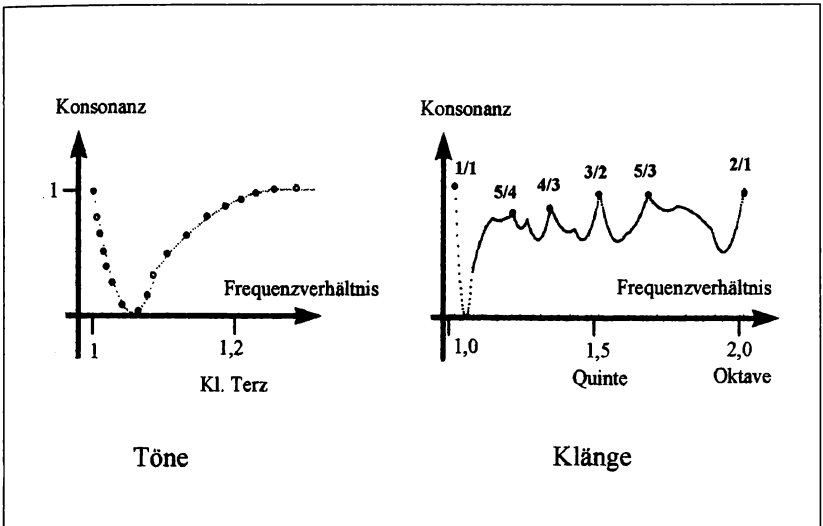


Bild 7
Konsonanz als Funktion des Frequenzintervalls

Anders liegt der Fall, wenn wir die Sinustöne durch Klänge ersetzen. Dann kann es zu Dissonanzen bei allen beteiligten Teiltönen kommen. Addiert man die Konsonanzwerte der ersten sechs harmonischen Obertöne und trägt sie als Funktion des Verhältnisses der Grundfrequenzen auf, so ergibt sich der im rechten Teil in Bild 7 dargestellte Verlauf. Man erkennt deutlich die Spitzen in der Konsonanz bei Oktave und Quinte und etwas geringer bei Terz, Quart und großer Sexte, alles Intervalle, die wir schon in der Naturtonreihe kennengelernt hatten.

Dur-Tonleiter

Wegen des soeben gezeigten Konsonanzen liegt es nahe, von den Naturtönen ausgehend ein Tonsystem aufzubauen. Die Oktave empfindet man dem Grundton sehr ähnlich, sie bringt nichts Neues, es sind daher Intervalle innerhalb der Oktave zu suchen. Die ersten von der Oktave abweichenden Intervalle der Naturtonreihe sind Quinte und große Terz: Die Obertöne vier, fünf und sechs bilden den sogenannten Dur-Dreiklang, den Grundstock aller Dur-Tonleitern. Die Frequenzen verhalten sich wie 4:5:6, oder wenn man den tiefsten Ton auf 1 normiert, so haben die drei Töne die Frequenzen $1,5/4$ und $3/2$. In der C-Dur Tonleiter haben diese Töne die Namen C, E und G. Auf G wird ein neuer Dur-Dreiklang aufgebaut, die Frequenzen sind dann $3/2$, $3/2 \cdot 5/4 = 15/8$ und $3/2 \cdot 3/2 = 9/4$. $9/4$ ist größer als 2, der zugehörige Ton liegt außerhalb der Oktave. Er wird deshalb um eine Oktave erniedrigt, das heißt seine Frequenz wird auf $9/8$ halbiert. Die Töne mit den Frequenzen $15/8$ und $9/8$ heißen H und D. Damit haben wir die fünf Töne C, D, E, G und H innerhalb einer Oktave. Zwei weitere gewinnen wir, indem wir den Dreiklang C-E-G nach unten um einen Dur-Dreiklang erweitern, so daß sein höchster Ton mit dem C übereinstimmt. Die Frequenzen der beiden anderen Töne ergeben sich zu $5/6$ und $2/3$. Ihre Frequenzen werden verdoppelt, damit sie in den gewünschten Oktavraum fallen. Dieses sind die Töne A und F mit den Frequenzen $5/3$ und $4/3$. Die Reihe dieser Töne, nach aufsteigender Frequenz geordnet und um die Oktave über dem Grundton ergänzt, bilden die C-Dur-Tonleiter C-D-E-F-G-A-H-C'. Zeichnet man die zugehörigen Frequenzen im logarithmischen Maßstab auf – dadurch werden gleiche Intervalle gleich groß dargestellt (Bild 8) –, so erkennt man zwischen den aufeinanderfolgenden Tönen fünf große und zwei kleine Abstände.

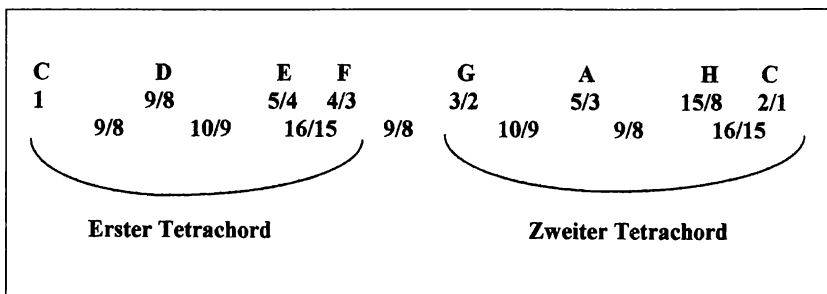


Bild 8

Dur-Tonleiter mit Angabe der Frequenzintervalle zum Grundton und zum vorausgehenden Ton.

Die großen Abstände entsprechen den geringfügig unterschiedlichen Frequenzverhältnissen 10:9 und 9:8, sie werden Ganzschritte genannt, die kleinen mit dem Verhältnis 16:15 heißen Halbschritte. Vier Töne mit zuerst zwei Ganzschritten und abschließend einem Halbschritt bilden einen Tetrachord. Mit diesen Bezeichnungen ergibt sich, daß die C-Dur-Tonleiter aus zwei Tetrachorden besteht, die im Abstand eines Ganzschrittes aufeinander folgen und diese Folge der Schritte charakterisiert alle Dur-Tonleitern. Die C-Dur-Tonleiter wird auf den weißen Tasten eines Klaviers gespielt, die Ganzschritte erkennt man an den dazwischen liegenden schwarzen Tasten. Das Tonsystem, das man erhält wenn man an den untersten und obersten Ton der C-Dur-Tonleiter weitere Tonleitern anschließt, genügt noch nicht allen musikalischen Ansprüchen. Die ersten Töne der G-Dur-Tonleiter sind mit den vorhandenen Tönen zu spielen, am Schluß von E nach G' brauchten wir aber einen Ganzschritt und dann einen Halbschritt, während die C-Dur-Tonleiter zuerst den Halbschritt von E nach F liefert. Das F muß durch einen erhöhten Ton, der Fis genannt wird, ersetzt werden, von dem aus dann ein Halbschritt zum G' führt. Baut man jeweils auf der Quinte wieder eine Dur-Tonleiter auf, so füllen sich nach und nach die Lücken zwischen den Ganzschritten, so daß man im Oktavraum zwölf Halbschritte hat. Will man mit möglichst wenig verschiedenen Frequenzintervallen auskommen, so ergibt sich beim größeren Ganzschritt (9:8) die Zerlegung in 25:24 und 27:25, beim kleineren (10:9) die Zerlegung in 25:24 und 16:15. Dabei kann man das Intervall 25:24 als erstes oder zweites bei der Zerlegung wählen und bekommt so die erste oder zweite chromatische Tonleiter, die beide die Oktave in 12 Halbschritte unterteilen.

Die Dur-Tonleitern unterscheiden sich nicht allein in der Tonhöhe wegen ihrer unterschiedlichen Anfangstöne, sondern vor allem durch die Lage der größeren und kleineren Ganz- und Halbschritte. Beginnt man die Tonleiter jeweils auf der Quarte der letzten – und das entspricht einer Quinte abwärts –, so füllen sich auch die Lücken, leider mit kleinen Frequenzabweichungen. Bei Instrumenten deren Höhen kontinuierlich verändert werden können, lassen sich alle Tonleitern exakt spielen. Bei Tasteninstrumenten müssen Kompromisse eingegangen werden, die eingefügten Halbschritte sind Mittelwerte. Noch weiter ging Werckmeister 1691 mit der Einführung der temperierten Stimmung. Hier wird die Oktave in 1 gleich große Intervalle eingeteilt, die ein Frequenzverhältnis von Eins zur zwölften Wurzel aus Zwei haben (ungefähr 1:1.05946). Damit sind beliebige Modulationen zwischen den Tonleitern möglich, es entfallen aber die charakteristischen Unterschiede zwischen den Tonarten und außer der Oktave kommen keine reinen Frequenzverhältnisse vor. Allerdings ist die Abweichung der wohl-

temperierten Quinte vom Verhältnis Drei zu Zwei sehr gering. Tabelle 2 vergleicht die Frequenzen von C- und D-Dur-Tonleiter und der wohltemperierten Tonleiter. Die Abweichungen gegenüber C-Dur sind in Cent angegeben, ein Cent ist der hundertste Teil eines Halbschrittes der temperierten Skala.

C-Dur	Rel. Freq.	D-Dur	Rel. Freq.	Abweichung [Cent]	Temperiert Rel. Freq.	Abweichung [Cent]
C	1,0000	D	1,0000	0,0	1,0000	0,0
D	1,1250	E	1,1111	-21,5	1,1225	-3,9
E	1,2500	Fis	1,2346	-21,5	1,2599	13,9
F	1,3333	G	1,3333	0,0	1,3348	2,0
G	1,5000	A	1,4815	-21,5	1,4983	-2,0
A	1,6667	H	1,6667	0,0	1,6818	15,6
H	1,8750	Cis	1,8519	-21,5	1,8877	11,7
C'	2,0000	D	2,0000	0,0	2,0000	0,0

*Tabelle 2
C-Dur, D-Dur und temperierte Tonleiter im Vergleich.*

Die physikalischen Aspekte der Musik sind so umfangreich, daß in diesem Beitrag nur eine kleine Auswahl sehr vereinfacht dargeboten werden konnte. Dem Interessierten seien besonders die beiden im Spektrum der Wissenschaft erschienenen Bücher empfohlen.

Literatur

- DTV-Lexikon der Physik in 10 Bänden (1970). Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & CO. KG, München.
- MENUHIN, Jehudi (1988): Yehudi Menuhin erklärt die Instrumente des Orchesters. EMI Electrola GmbH, Köln. Compact Disc.
- PIERCE, John R.: Klang Musik mit den Ohren eines Physikers. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg.
- POHL, R.W. (1955): Einführung in die Physik, Band 1, Mechanik, Akustik und Wärmelehre, 13. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- WINKLER, Klaus: Die Physik der Musikinstrumente. Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Matreier Gespräche - Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Wilheminenberg](#)

Jahr/Year: 1999

Band/Volume: [1999](#)

Autor(en)/Author(s): Nagel Klaus

Artikel/Article: [Physikalische Aspekte der Musik 30-42](#)