

Musikalische Harmonie

Physik – Physiologie – Psychologie

H.G. Dosch und H.J. Specht
Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg

Der Versuch, auch eine rationale Erklärung für den Zauber der Musik zu finden ist so alt wie die westliche Wissenschaft. Max Born nennt in der Tat die Entdeckung des Pythagoras von Samos [vdW43], dass den harmonischen Intervallen Oktav, Quint und Quart die Zahlenverhältnisse 1:2, 2:3 und 3:4 entsprechen, die älteste wissenschaftliche Erkenntnis des Abendlandes. Aber auch Schönberg schreibt in seiner Harmonielehre [Sch22]: „Das Material der Musik ist der Ton ... Vielleicht ist es unhaltbar, aus ... dem Ton allein alles ableiten zu wollen, was die Physik der Harmonie ausmacht. Einige Eigentümlichkeiten wird man aus ihm schon entnehmen können.“

In dem Vortrag wurde gezeigt, dass tatsächlich einige der wichtigen Grundsätze der Harmonielehre physikalische und psychophysische Wurzeln haben. Er gliederte sich in drei Teile: Eine kurze Einführung in die wichtigsten Grundlagen, eine Erklärung der oben erwähnten Entdeckung des Pythagoras, die auf Helmholtz [Hel63] zurückgeht und in neuerer Zeit von Plomb [Plo76] verfeinert wurde, und schliesslich als delikatesten Teil die Begründung der Harmonielehre, die auf Rameau [Ram22, Ram60, Ale52] zurückgeht und in den letzten Jahrzehnten besonders durch das Konzept der Grundton-Erkennung [Sch71] eine wichtige psychophysische Stütze fand [Pie92, Ter98].

Für den Vortrag war die enge Verzahnung von experimenteller Demonstration und theoretischer Interpretation ganz wesentlich. Es soll daher nicht versucht werden, hier die Themen in einem Artikel zusammenzufassen, sondern wir geben nur eine Gliederung des Vortrags mit stichwortartiger Beschreibung sowie eine Literaturliste.

Einleitung

Am Piano wurden die behandelten Konzepte vorgeführt: Tonhöhe, Lautstärke, Konsonanz und Dissonanz, harmonische Intervalle.

Die Schalldruck Kurve eines Sinus-Tons, der z. B. mit einer Stimmgabel erzeugt werden kann, zeigt zwei charakteristische Grössen: Amplitude und Periode.

Der komplexe Klang eines Musikinstruments zeigt eine unregelmäßige, aber immer noch periodische Schalldruck Kurve.

Die Fourier-Zerlegung kann als Zerlegung eines komplexen Tones in Sinus-Töne betrachtet werden [Ohm43]. Dass dies immer möglich ist, besagt das berühmte mathematische Theorem von J. B. Fourier. Der benutzte Fourier-Analysator zeigt in realzeit die Fourier-Zerlegung eines Tons den man gleichzeitig hört.

Man kann an ihm demonstrieren, das grob die folgende Entsprechung gilt:

Die Tonhöhe ist bestimmt durch Frequenz, d.h. die inverse Periode, die Lautstärke durch die Amplitude und die Klangfarbe durch die spektrale Zusammensetzung.

Das Ohr kann als Frequenzanalysator betrachtet werden, Sinus-Töne verschiedener Frequenz erregen verschiedene Stellen der Basilarmembran in Innenohr und regen damit verschiedene Neuronen an (Tonotopie).

Konsonanz

Zwei Sinus-Töne: Der Sinnes-Eindruck zweier gleichzeitig angebotener Sinus-Töne hängt sehr von dem Unterschied der Tonhöhen ab. Für kleine Frequenzunterschiede hört man deutliche Schwebungen, für grössere Unterschiede einen rauhen Ton und schliesslich, bei einer Tonhöhendifferenz von mehr als einem Ganzton, zwei getrennte Töne, die sich nicht beeinflussen. Das lässt sich sehr schön demonstrieren und kann auch mit Hilfe des sowohl psychoakustisch als auch sinnesphysiologisch begründeten Konzepts der „kritischen Bandbreite“ [ZF99] erklärt werden. Unterscheiden sich die Töne in ihrer Frequenz um mehr als die kritische Bandbreite, so werden sie deutlich getrennt gehört. Die kritische Bandbreite ist im mittleren und oberen Frequenzbereich (oberhalb Tenorlage) etwa eine kleine Terz und entspricht etwa dem Abstand von 1 mm auf der Basilarmembran. Sie hängt im Bass sehr von der Frequenz ab und ist in den tiefsten Lagen grösser als eine Quint. Dies ist der Grund dafür, dass in der musikalischen Literatur bis zum 20. Jahrhundert Terzen im Bass selten vorkommen. Man kann sich davon leicht an jeder Partitur überzeugen.

Dieses Zweitonverhalten ist auch der Grund für die pythagoräischen Zahlenverhältnisse. Man muss dieses Zweitonverhalten nur auf das gesamte Obertonspektrum anwenden. Dann findet man zum Beispiel dass bei der Septim der Grundton des oberen Tones mit dem 1. Oberton des unteren Tones reibt. Bei dem vollkommensten harmonischen Intervall, der Oktav, reiben sich weder der Grundton noch die Obertöne. Damit lässt sich für jedes Intervall der Dissonanzgrad berechnen, der mit dem musikalischen und psychophysischen gut übereinstimmt. Es sei angemerkt, dass neuere Auswertungen z. B. einer japanischen Forschergruppe die alten Rechnungen Helmholtzens sehr gut bestätigen. Der Befund ist wohl unabhängig vom Kulturkreis.

Harmonie

Perzeption und Apperzeption (Helmholtz)

Obwohl ein komplexer Ton in viele Sinus-Töne zerlegt werden kann, wird er durchaus als ein Klang empfunden. Nur wenn man seine Aufmerksamkeit darauf richtet, nimmt man die einzelnen Komponenten tatsächlich wahr: die Oktav, die Duodezim, die Doppeloktav, Octodezim (Doppeloktav plus Terz) und so weiter. Dies lässt sich mit dem Fourier-Analysator und einem Synthetizer, aber auch im Selbsttest am Klavier, sehr schön demonstrieren. Diese Verschmelzung vieler Obertöne zu einem einheitlichen Klang tritt aber nur auf, wenn die einzelnen Komponenten im harmonischen Verhältnis zum Grundton stehen, also ihre Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches des Grundtons ist. Bei „gestreckten Obertönen“ z. B. bildet sich kein einheitlicher Klang.

Grundtonerkennung.

Lange war die Meinung vorherrschend, dass die Frequenz des Grundtons die Tonhöhe bestimmt und die Obertöne nur die Klangfarbe. Allerdings wollte schon Schönberg die Trennung in Tonhöhe und Klangfarbe nicht so einfach zulassen. Es stellt sich tatsächlich heraus, dass die Tonhöhe unverändert bleibt, wenn man

aus einem komplexen Ton den Grundton und benachbarte Obertöne wegschneidet. Was tatsächlich die Tonhöhe bestimmt, ist immer noch umstritten und lässt sich wohl nur mit Hilfe neurophysiologischer Untersuchungen näher festlegen. Ein hoffnungsvolles Instrument dazu ist das Magnetoencephalogramm, bei dem die durch die Nervenströme erzeugten Magnetfelder gemessen werden. Wir sind selbst an solchen Untersuchungen beteiligt [Sch. et al. 02].

Basse fondamentale

Der „basse fondamentale“ von Rameau ist genau der unter Umständen fehlende Grundton eines Akkords. Und tatsächlich lässt sich zu jedem Stück die Melodie des Fundamentalbasses, die aus Wechseln zwischen Tonica, Dominanter und Subdominanter der betreffenden Tonart besteht, sehr leicht konstruieren. Dies wurde an den ersten Takten von Mozart, KV 545 vorgeführt.

Zusammenfassung

Die vorgestellten Begriffe lassen sich sehr schön an einem 4-stimmigen Choral von Bach akustisch – und mit Hilfe des Fourieranalysators auch optisch – darstellen. Einmal werden nur die Intervalle zwischen den Noten gestreckt. Dabei tritt dann sensorisch Dissonanz und melodische Anharmonie auf, die einzelnen Töne verschmelzen aber, da die Obertöne harmonisch sind. In einer zweiten Änderung wurden die musikalischen Intervalle beibehalten, aber die Obertöne gestreckt. Hier herrscht ebenfalls sensorische Dissonanz, aber melodische Harmonie. Allerdings verschmelzen die Töne nicht, es klingt ein bisschen wie ein Glockenspiel. In einer dritten Änderung wurden die musikalischen Intervalle und die Obertöne im gleichen Masse gestreckt. Es liegt dann sensorische Konsonanz vor, d.h. keine Obertöne reiben aneinander. Hingegen gibt es keine melodische Harmonie, und die Töne verschmelzen nicht. Wegen des Zerfalls der Einzeltöne scheint der Choral in der zweiten und dritten Änderung viel mehr als 4 Stimmen zu enthalten.

Literatur

- [Ale52] Jean le Rond d' Alembert. *Éléments de Musique Théorique et Pratique*. David, Le Breton, Durand, Paris, 1752.
- [Hel63] Hermann Helmholtz. *Die Lehre von den Tonempfindungen*. Vieweg, Braunschweig, 1 edition, 1863.
- [Ohm43] Georg Simon Ohm. Über die Definition des Tones. *Annalen der Physik und Chemie*, 59:513, 1843.
- [Pie92] J.R. Pierce. *The Science of Musical Sound*. Freeman, 2 edition, 1992.
- [Plo76] R. Plomb. *Aspects of Tone Sensation*. Academic Press, London, 1976.
- [Ram22] Jean Philippe Rameau. *Traité de l'Harmonie, Réduite à ses Principes naturels*. Balian, Paris, 1722.
- [Ram60] J-P. Rameau. *Nouvelles réflexions sur le principe sonore*. 1760.

- [Sch22] Arnold Schoenberg. *Harmonielehre*. Wien, 1922.
- [Sch71] J.F. Schouten. The Residue Revisited. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34:1418, 1971.
- [Sch.et al. 02] P. Schneider, M. Scherg, H.G. Dosch, H.J. Specht, A. Gutschalk, and A. Rupp. Morphology of heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. 2002.
- [Ter98] Ernst Terhardt. *Akustische Kommunikation*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- [vdW43] B.L. van der Warden. Die Harmonielehre der Pythagoreer. *Hermes, Z. f. klass. Philologie*, 78:163, 1943.
- [ZF99] E. Zwicker and H. Fastl. *Psychoacoustics*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2 edition, 1999.