

**Herbert Bruhn
Rolf Oerter
Helmut Rösing (Hg.)**

MUSIKPSYCHOLOGIE

Ein Handbuch



rowohlts enzyklopädie

www.rowohlt.de

Wechselwirkungen zwischen Schallereignissen

1. Maskierung

Alltäglich erfährt man die Maskierung, indem wichtige bzw. interessante Schälle durch andere übertönt werden. So kann die Stimme durch eine vorbeifahrende Straßenbahn verdeckt werden. Musiker (insbesondere Klavierbegleiter) müssen immer wieder darauf achten, daß sie die anderen Musiker nicht übertönen.

In der Psychoakustik wird die Stärke eines Störschalls gemessen, indem ein Sinuston (Testton) gleichzeitig oder kurz zeitversetzt gespielt wird und eine Versuchsperson den Schalldruckpegel so einstellt, daß sie den Testton gerade wahrnehmen kann. Verändert man die Frequenz, so ändert sich auch der Pegel des gerade wahrnehmbaren Testtons.

Simultanverdeckung

Trägt man die Pegel bei gleichzeitig gespielten Testtönen als Funktion der Frequenz auf, so erhält man ein Diagramm der *Mithörschwelle* des Störschalls. Die Mithörschwelle eines Sinustons wurde u. a. von Wegel & Lane (1924), Egan & Hake (1950) und von Zwicker (1982) gemessen. Im wesentlichen fand man, daß der Pegel eines gerade wahrnehmbaren Testtons steigt, wenn der Pegel des Störtöns größer bzw. das Intervall zwischen den beiden Tönen kleiner wird.

Die Mithörschwelle eines Sinustons wird erheblich durch Schwebungen beeinflusst. Auch Kombinationstöne können stören, die selbst dann auftreten können, wenn der Testton nicht zu hören ist. Bei kleineren Pegeln verdecken tiefe Schälle die hohen Schälle fast genauso stark wie umgekehrt. Bei höheren Pegeln dagegen wird die verdeckende Wirkung tieferer Schälle auf höhere Schälle größer als umgekehrt. Dies stimmt mit der musikalischen Erfahrung überein, daß z. B. eine laute Trompete tiefe Instrumente weniger verdeckt als eine laute Posaune hohe Instrumente. Genauso müssen bei lauten Rockkonzerten hohe Frequenzen mehr verstärkt werden als tiefe, damit alle Instrumente hörbar sind.

Die Mithörschwelle eines Klangs (musikalischer Ton) ist komplizierter als die eines Sinustons. Sie kann entweder direkt gemessen (Plomp, 1976) oder durch psychoakustische Modelle berechnet werden (Terhardt u. a., 1982). Ein vielversprechendes Modell ist die Fourier-t-Transformation (FTT), eine Art Fourieranalyse, die an das Frequenz- und Zeitaufklärungsvermögen des menschlichen Gehörs angepaßt wird (Heinbach, 1988).

Vor- und Nachverdeckung

Ein lauter Schall hat immer auch Einfluß auf nachfolgende Schallereignisse. Die *Nachhörschwelle* hat nach etwa fünf msec. immer noch die Höhe der *Simultanhörschwelle*. Erst dann fällt sie ab, bis 200 msec. nach dem Ende des Schalls die *Ruhehörschwelle* erreicht wird.

Musikalisch zu vernachlässigen ist die Vorverdeckung. Dennoch ist bemerkenswert, daß ein lauter Schall bis zu etwa 20 msec. in die Vergangenheit wirkt (Zwicker, 1982).

2. Schwebungen und Rauigkeit

Schwebungen entstehen entweder durch die Überlagerung von Sinustönen ähnlicher Amplitude und Frequenz oder durch die Amplitude bzw. Frequenzmodulation eines einzigen Sinustons. Beide Signale rufen ähnliche Empfindungen hervor, obwohl die physikalischen Unterschiede auf der Hand liegen (Plomp, 1976). Ist der Unterschied zwischen den Frequenzen zweier sich überlagernder Sinustöne kleiner als 20 Hz, dann hört man *Lautheitsschwankungen*; ist er größer als 30 Hz, empfindet man *Rauigkeit* (s. schon Helmholtz, 1863).

Lautheitsschwankungen sind für den Klang eines verstimmten Kla-

viere typisch (honky-tonk). Die Rauigkeit trägt in kleineren Mengen zur Fülle der Klangfarbe tieferer Töne bei. In größeren Mengen führt sie zum Dissonanzempfinden musikalischer Mehrklänge (→Konsonanz). Die Empfindung von Lautheitsschwankungen erreicht ein Maximum bei einer Schwebungsfrequenz um fünf Hz, unabhängig von der Trägerfrequenz (Terhardt, 1968). Dieser Wert entspricht ungefähr dem durchschnittlichen Tempo von Sprachsilben. Das Ergebnis kann als eine Folge der Anpassung des Gehörs an die Sprache betrachtet werden (Fastl, 1983).

Nach Plomp (1976) erreicht die Rauigkeitsempfindung zweier Sinustöne einen Höhepunkt bei einem Frequenzunterschied von ca. $\frac{1}{4}$ der kritischen Bandbreite (→ Aufbau von Außen-, Mittel- und Innenohr). Bei Frequenzunterschieden, die außerhalb der kritischen Bandbreite liegen, empfindet man keine Rauigkeit. Die kritische Bandbreite entspricht bei höheren Frequenzen etwa drei Halbtönen, bei tieferen Frequenzen etwa 50 bis 100 Hz (Zwicker, 1982; Moore & Glasberg, 1983).

Rakowski (1982), der die Ergebnisse von mehreren Autoren zusammenfaßt, deutet auf eine alternative Beziehung hin: Dem Frequenzunterschied bei maximaler Rauigkeit entspricht ungefähr die doppelte Quadratwurzel der Frequenz des tieferen Tons. Bei 100 Hz (kontra-G) ist die Rauigkeit bei einem Frequenzunterschied von ca. 20 Hz bzw. drei Halbtönen maximal; bei 400 Hz (g') bei einem Frequenzunterschied von ca. 40 Hz bzw. zwischen einem und zwei Halbtönen.

Diese Ergebnisse gelten nur bei Sinustönen. Bei Terhardt (1968), Zwicker (1982) und Aures (1984) wird die Rauigkeit eines Klangs (also eines musikalischen Tons oder Akkords) aus Frequenzbeiträgen gebildet, die von der Amplitudenmodulation innerhalb einer kritischen Bandbreite abhängen. Zu musiktheoretischen Zwecken reicht es aus, ein einfacheres Modell zu benutzen. Nach ihm wird die Rauigkeit eines Klangs direkt von seinem Spektrum eingeschätzt (Plomp, 1976; Kameoka & Kuriyagawa, 1969; Hutchinson & Knopoff, 1978). Allerdings sollten dabei Beiträge, die innerhalb einer kritischen Bandbreite entstehen, anders zusammengefaßt werden als Beiträge verschiedener kritischer Bandbreiten (Vos, 1986).

Die Dissonanz eines musikalischen Akkords hat noch eine zweite psychoakustisch begründete Komponente, die als *Grundtonmehrdeutigkeit* aufgefaßt werden kann (Parncutt, 1988). Dazu kommen willkürliche Konditionierungseffekte. Der am Klavier gespielte Zweiklang c'-h'

(große Septime) z. B. klingt wegen seiner hohen Rauigkeit und Grundtonmehrdeutigkeit sehr dissonant. Fügt man eine große Terz e' hinzu, wird zwar die Rauigkeit noch etwas stärker, die Grundtonmehrdeutigkeit aber nimmt ab. Darum wirkt der Dreiklang letztlich konsonanter als der Zweiklang (\rightarrow Konsonanz).

Nach Helmholtz (1863) wird die Intonation musikalischer Intervalle weitgehend durch die Rauigkeit bestimmt. Diese Hypothese wurde durch neuere Arbeiten (z. B. Shackford, 1961, 1962; Hagerman & Sundberg, 1980; Roberts, 1986; Keislar, 1991) in Frage gestellt. Man geht jetzt davon aus, daß die Intonation durch einen Kompromiß zwischen mehreren Kriterien bestimmt wird (Terhardt, 1976). Vor allem die Vertrautheit der wohltemperierten Stimmung spielt eine wichtige Rolle bei der Intonation in der abendländischen Musik (\rightarrow Konsonanz).

3. Zentrale Schwebung

Schwebungen sind gewöhnlich *monaural*: Zwei Primärschälle (z. B. Sinustöne) werden gleichzeitig einem oder beiden Ohren dargeboten. Die Rauigkeit, die solche Schwebungen hervorruft, scheint im Innenohr auf der Basilarmembran zu entstehen (Terhardt, 1968). Sinustöne können auch dichotisch dargeboten werden (jedem Ohr je ein Sinuston). Entstehen Schwebungen, so liegt ihr Ursprung im zentralen Nervensystem. Denn beim Hören eines Sinustons ist die Aktivität bestimmter Nervenfasern mit der Periode des Tons synchronisiert (Wever & Bray, 1937). Binaurale Schwankungen scheinen folglich aus den periodischen Variationen des Zeitmusters von Nervenimpulsen zu entstehen.

Binaurale Schwebungen unterscheiden sich von monauralen Schwebungen in mancherlei Hinsicht (s. Terhardt, 1968; Oster, 1973). Die Rauigkeit monauraler Schwebungen ist am stärksten bei Tönen über 1000 Hz. Binaurale Schwebungen dagegen sind oberhalb von 1000 Hz kaum hörbar. Sie wirken am stärksten bei Tönen zwischen 400 und 500 Hz. Sie verschwinden bei Frequenzunterschieden, die größer sind als etwa 35 Hz (Licklider u. a., 1959; Perrot & Nelson, 1969).

Binaurale Schwebungen wirken im allgemeinen schwächer als monaurale. Monaurale Schwebungen klingen am stärksten bei Sinustönen gleicher Amplitude. Binaurale Schwebungen können sogar empfunden werden, wenn einer der zwei Töne unterhalb der Schwelle liegt. Monaurale Schwebungen werden durch Störgeräusche verdeckt, binaurale ver-

674 Leistungen des Gehörs

stärkt. Ein weiteres Merkmal binauraler Schwebungen ist, daß sie sich im Kopf des Zuhörers zu bewegen scheinen. Das deutet auf eine Verbindung zur Richtungswahrnehmung hin (\rightarrow Hören im Raum).

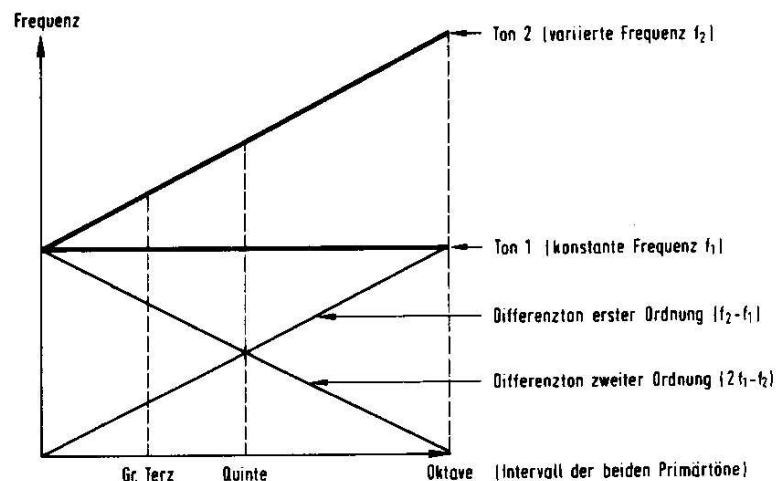
Eine weitere Art von Schwebungen, die einen zentralen Ursprung zu haben scheinen, sind die *Schwebungen verstimmter Konsonanzen* (Rigden, 1974; Plomp, 1976; Rossing & Dols, 1976). Sie unterscheiden sich von anderen Schwebungsarten hinsichtlich der Größe des Intervalls zwischen den betreffenden Tönen. Die Primärfrequenzen entsprechen annähernd einem einfachen Verhältnis, z. B. 2 : 3 (Quinte). Die Schwebungen entstehen durch die geringfügige Abweichung vom reinen Verhältnis. Sie können monaural (Normalfall) wie auch binaural gehört werden, sind aber immer nur schwach ausgeprägt. Plomp (1976) konnte zeigen, daß diese Schwebungen nicht durch harmonische Verzerrungen im Innenohr zu erklären sind. Er kam zu dem Schluß, daß sie wahrscheinlich auf ähnliche Weise entstehen wie binaurale Schwebungen. Zudem könnten Kombinationstöne dabei eine Rolle spielen.

4. Kombinationstöne und subjektive Töne

Kombinationstöne (auch Differenztöne) entstehen im Innenohr. Sie können als *nichtlineare Verzerrungen* des Gehörs aufgefaßt werden (Helmholtz, 1863). Sie sind gleicher Art wie die nichtlinearen Verzerrungen, die die Wiedergabetreue eines Lautsprechers oder Mikrophons verschlechtern.

Die Frequenz eines Kombinationstons ist immer eine einfache arithmetische Kombination der Frequenzen zweier simultan klingender Sinustöne bzw. Tonkomponenten (Teiltöne). Nennt man die tiefe Frequenz f_1 und die höhere Frequenz f_2 , so haben die wichtigsten Kombinationstöne die Frequenzen $f_2 - f_1$ (*quadratischer* Kombinationston) und $2f_1 - f_2$ (*kubischer* Kombinationston). Quadratische Kombinationstöne sind nur bei hohen Schallpegeln hörbar, kubische dagegen auch bei geringen Pegeln (Goldstein, 1967; Zwicker, 1982). Der effektive Pegel beider Arten von Kombinationstönen hängt in hohem Maß von der beurteilenden Person ab (s. Abbildung).

In der Musik sind Kombinationstöne nur selten hörbar, da sie gewöhnlich durch andere Töne maskiert werden (Plomp, 1976; Zwicker, 1982). Wenn sie auftreten, wirken sie in der Regel störend – z. B. bei Flöten, die ohne Vibrato gespielt werden. Die These Hindemiths (1937), daß der



Entstehung von Differenzttönen erster und zweiter Ordnung, dargestellt am Zusammentreffen eines konstanten Tons f_1 mit einem sich verändernden Ton f_2

Grundton eines Akkords ein Kombinationston sei, ist kaum haltbar. Vielmehr kann der Grundton als eine Art *Tonhöhengestalt* verstanden werden (Terhardt, 1976; → Konsonanz; → Strukturmodelle).

Früher hat man geglaubt, daß die Tonhöhe eines *Residualtons* (ein Klang ohne Grundton) durch Kombinationstöne zu erklären ist. Schouten (1938) hat diese These widerlegt. Neuere Versuche zeigten, daß die Tonhöhe eines Residualtons wahrscheinlich im zentralen Nervensystem und nicht im Innenohr entsteht (Houtsma & Goldstein, 1972).

Reinecke (1961) und Maronn (1964) untersuchten eine Art der Tonempfindung, die sie *sekundäre Tonqualitäten* bzw. *binaural wahrgenommene Tonqualitäten* nannten. In ihren Versuchen hörten Musiker zwei Sinustöne, jeweils einen im linken und einen im rechten Ohr. Das Intervall dazwischen entsprach einem einfachen Frequenzverhältnis. Viele Versuchspersonen berichteten, daß sie zusätzlich einen dritten hörten. Dieser Ton lag meistens höher als die beiden dargebotenen Töne. Einige Versuchspersonen hörten beim Intervall einer kleinen Terz einen Ton, der um einen Tritonus, eine Quinte oder eine kleine Sexte oberhalb

676 Leistungen des Gehörs

des tieferen Tons lag. Wegen der großen Unterschiede der Ergebnisse verschiedener Versuchspersonen kann man folgern, daß diese Töne ihren Ursprung nicht in der Physiologie haben, sondern auf musikalischer Prägung beruhen.

5. Schlußfolgerungen

Die musikalische Rolle der hier dargestellten Hörphänomene sollte nicht überbewertet werden. In musikalischen Aufführungen sind normalerweise die Töne, die in den Noten stehen (und keine zusätzlichen), hörbar. Phänomene wie die Kombinationstöne sind eher für die Psychoakustik als für die Musikwissenschaft interessant. Es gibt jedoch eine Hörillusion, die in tonaler Musik regelmäßig auftritt und die musikalische Struktur wesentlich beeinflusst. Das ist die virtuelle Tonhöhe (Terhardt, 1972, 1976; auch Grund-, Perioden- oder Residualtonhöhe genannt).

Sie unterscheidet sich von den anderen beschriebenen Hörempfindungen, weil ihre Eigenschaften in erster Linie durch die Hörerfahrung bestimmt sind. Das Gehör lernt, aus den unteren (hörbaren) Teiltönen von einem harmonischen Klang die Grundtonhöhe zu extrahieren (→ Klang – Ton – Akkord). Diese Erfahrung überträgt sich auf musikalische Intervalle und Akkorde. So kann bei der Orgel ein besonders tiefes Baßregister simuliert werden, indem man zwei Töne im Quintabstand spielt. Die Wahrnehmung von virtuellen Tönen stellt eine Art *Konditionierungseffekt* dar (Parncutt, 1989). Die Konditionierung des Gehörs durch die ständige Auseinandersetzung mit alltäglichen und musikalischen Klängen ist weitaus wichtiger für die Musikwahrnehmung als die Physiologie des Gehörs.

Literatur

- Aures, W. (1985). Der sensorische Wohlklang als Funktion psychoakustischer Empfindungsgrößen. *Acustica*, 58, 282–290.
- Egan, J. P. & Hake, H. W. (1950). On the masking pattern of a simple auditory stimulus. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 622–630.
- Fastl, H. (1983). *Proceedings of the International Congress on Acoustics*, Paris.
- Goldstein, J. L. (1967). Auditory nonlinearity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 41, 676–689.
- Hagerman, B. & Sundberg, J. (1980). Fundamental frequency adjustment in barbershop singing. *Journal of Research in Singing*, 4, 3–17.

- Heinbach, W. (1988). Aurally adequate signal representation: The part-tone time-pattern. *Acustica*, 67, 113–121.
- Helmholtz, H. von (1863). *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig: Vieweg.
- Hindemith, P. (1937). *Unterweisung im Tonsatz*. Mainz: Schott.
- Houtsma, A. J. M. & Goldstein, J. L. (1972). The central origin of the pitch of complex tones: Evidence from musical interval recognition. *Journal of the Acoustical Society of America*, 51, 520–529.
- Hutchinson, W. & Knopoff, L. (1978). The acoustical component of western consonance. *Interface*, 7, 1–29.
- Kameoka, A. & Kuriyagawa, M. (1969). Consonance theory. *Journal of the Acoustical Society of America*, 45, 1451–1469.
- Keislar, D. F. (1991). *The relevance of beating partials for musical intonation*. Proceedings of the Intern. Computer Music Conference, Montreal, 202–205.
- Licklider, J. C. R., Webster, J. C. Hedlun, J. M. (1950). On the frequency limits of binaural beats. *Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 468–473.
- Maronn, E. (1964). *Untersuchungen zur Wahrnehmung sekundärer Tonqualitäten bei ganzzahligen Schwingungsverhältnissen*. Regensburg: Bosse.
- Moore, B. C. J. & Glasberg, B. R. (1983). Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. *Journal of the Acoustical Society*, 74, 750–753.
- Oster, G. (1973). Auditory beats in the brain. *Scientific American*, 229 (4), 94–102.
- Parncutt, R. (1988). Revision of Terhardt's model of the root(s) of a musical chord. *Music Perception*, 6, 65–94.
- Parncutt, R. (1989). *Harmony: A Psychoacoustical Approach*. Berlin: Springer.
- Perrot, D. & Nelson, M. (1969). Limits for the detection of binaural beats. *Journal of the Acoustical Society of America*, 46, 1477–1481.
- Plomp, R. (1976). *Aspects of Tone Sensation. A Psychophysical Study*. London: Academic Press.
- Rakowski, A. (1982). Psychoacoustic dissonance in pure-tone intervals: Disparities and common findings. In Dahlhaus, C. & Krause, M. (Hrsg.), *Tiefenstruktur der Musik* (S. 51–67). Technische Universität Berlin.
- Reinecke, H.-P. (1961). *Experimentelle Beiträge zum musikalischen Hören*. Habil. Hamburg.
- Rigden, J. (1974). Variations of sound intensity for mistuned consonances. *Journal of the Acoustical Society of America*, 55, 1095–1097.
- Roberts, L. A. (1986). Consonance judgements of musical chords by musicians and untrained listeners. *Acustica*, 62, 163–171.
- Rossing, T. & Dols, K. (1976). Second-order beats between complex tones. *Catgut Acoustical Society Newsletter*, 25, 17–18.

- Schouten, J. F. (1938). The perception of subjective tones. *Proc. Kon. Ned. Akad. Wetensch.*, 41, 1086–1093.
- Shackford, C. (1961, 1962). Some aspects of perception. *Journal of Music Theory*, 5, 162–202; 6, 66–90, 295–303.
- Sorge, G. A. (1745). *Vorgemach der musikalischen Komposition*. Lobenstein: Verlag des Autors.
- Tartini, G. (1754). *Trattato di musica secondo la vera scienza dell'harmonia*. Padova.
- Terhardt, E. (1968). Über akustische Rauigkeit und Schwankungsstärke. *Acustica*, 20, 215–224.
- Terhardt, E. (1972). Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. *Acustica*, 26, 173–199.
- Terhardt, E. (1976). Ein psychoakustisch begründetes Konzept der musikalischen Konsonanz. *Acustica*, 36, 121–137.
- Terhardt, E. (1985). Fourier transformation of time signals: Conceptual revision. *Acustica*, 57, 242–256.
- Terhardt, E., Stoll, G. & Seewann, M. (1982). Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 71, 679–688.
- Vos, J. (1982). The perception of pure and mistuned musical fifths and major thirds: Thresholds for discrimination, beats, and identification. *Perception & Psychophysics*, 32, 297–313.
- Wegel, R. L. & Lane, C. E. (1924). The auditory masking of one pure tone by another and its probable relation to the dynamics of the inner ear. *Physical Review*, 23, 266–285.
- Wever, E. G. & Bray, C. W. (1937). The perception of low tones and the resonance-volley theory. *Journal of Psychology*, 3, 101–114.
- Zwicker, E. (1982). *Psychoakustik*. Berlin: Springer.

Richard Parncutt