

Tonhöhenmehrdeutigkeit, Tonverwandtschaft und Identifikation von Sukzessivintervallen

von E. Terhardt, G. Stoll, R. Schermbach und R. Parncutt
Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Universität München

Zusammenfassung

Das musikalische Phänomen der Tonverwandtschaft (Oktav-, Quint-, Quart-Verwandtschaft) wird in drei verschiedenartigen Hörversuchen untersucht. In der ersten Gruppe wird die Tonhöhenmehrdeutigkeit einzelner komplexer Töne erfaßt und beschrieben. Dabei zeigt sich, daß die Verteilung der miteinander konkurrierenden Tonhöhen eines komplexen Tones von dessen Teiltonaufbau abhängt. Es wird gezeigt, daß die im Experiment beobachteten Tonhöhenverwechslungen in der Tat auf sensorische Tonhöhenmehrdeutigkeit zurückzuführen sind und nicht etwa als Wirkung der empfundenen Tonverwandtschaft angesehen werden können; man kann vielmehr umgekehrt die Tonhöhenmehrdeutigkeit als psychoakustische Ursache der Tonverwandtschaft bezeichnen. Danach wird die Tonverwandtschaft zweier Töne durch die partielle Übereinstimmung ihrer Tonhöhenverteilungen bewirkt. Daraus folgt, daß Sinustöne nur sehr geringe sensorische Tonverwandtschaft aufweisen können. Die zweite Art von Experimenten betrifft die empfundene Ähnlichkeit von Tönen. Es wird gezeigt, daß Töne, welche im zuvor genannten Sinne verwandt sind, eine größere Ähnlichkeit aufweisen als andere. Bei Sinustönen wird nur ein sehr geringer Beitrag der harmonischen Beziehungen zur Ähnlichkeit gefunden, was die schwache Ausprägtheit ihrer maximal möglichen Tonverwandtschaft bestätigt. Der dritte Versuchstyp betrifft die Identifikation von Sukzessivintervallen. Die Erkennungsleistungen mit Sukzessivintervallen von Sinustönen unterscheiden sich von solchen mit komplexen Tönen nur wenig. Sie hängen zum einen von der Intervallweite, zum anderen von der Tonverwandtschaft ab. Daraus wird geschlossen, daß die Intervallerkennung überwiegend vom *erworbenen* Empfinden der Tonverwandtschaft, das heißt, „kognitiven“ Leistungen abhängt und nur wenig von sensorischen Charakteristika des Gehörs.

Pitch Ambiguity, Tone Affinity, and Identification of Successive Intervals

Summary

The phenomenon of tone affinity (i.e., octave-, fifth-, fourth-affinity) was investigated in three basically different types of experiment. In the first type, pitch ambiguity of isolated complex tones was measured and is described. It turns out that the pattern of pitches produced by a complex tone depends on the tone's part-tone composition. It is shown that the pitch confusions observed in the experiments are indeed to be explained by sensory pitch ambiguity; they cannot reasonably be regarded as an effect of tonal affinity. On the contrary, pitch ambiguity must be regarded as the psychoacoustic basis of tone affinity. According to this reasoning, pitch affinity of two tones is explained by the coincidence of some elements of the respective pitch patterns. Further, pure tones can show only very little sensory tonal affinity. The second type of experiment was concerned with similarity of tones. It is shown that tones which in the aforementioned sense have pronounced tonal affinity, are assessed more similar to each other than other pairs of tones. With pure tones, only a very small contribution of harmonic affinity to similarity was found; this confirms the conclusion that tone affinity of pure tones is weak. The third type of experiment was concerned with identification of successive intervals. Identification patterns obtained with pure tones are not much different from those obtained with harmonic complex tones. In both cases identification rate is dependent both on interval width and tone affinity. It is concluded that it is *acquired* tone affinity which affects interval identification, such that "cognitive" rather than sensory characteristics of the ear are essentially involved.

Ambiguïté de hauteur, parenté tonale et identification d'intervalles successifs

Sommaire

Trois différentes catégories de tests ont servi à étudier le phénomène musical de la parenté tonale (parenté d'octave, de quinte, de quarte).

Le premier groupe définit et décrit l'ambiguïté de hauteur tonale de sons complexes isolés. On y montre que la répartition des différentes hauteurs tonales contribuant à former un son complexe dépend de la structure des partiels qui le composent. Les confusions de hauteurs observées dans ces expériences se ramènent en fait à une ambivalence sensorielle et ne peuvent être considérées comme l'effet de la perception d'une parenté tonale; au contraire on peut désigner la polyvalence des hauteurs tonales comme la cause psycho-acoustique de la parenté tonale. Ainsi la parenté de deux sons est déterminée par une coïncidence partielle de leurs répar-

titions en hauteurs. Il s'ensuit que les sons sinusoïdaux ne peuvent donner lieu qu'à des manifestations très restreintes de parenté tonale sensorielle.

La deuxième espèce d'expériences concerne la perception de la ressemblance des sons. On y montre que des sons qui sont apparentés au sens précisé ci-dessus présentent entre eux des ressemblances plus grandes que des sons de parenté moindre. Pour des sons sinusoïdaux par exemple, il n'a été trouvé qu'un petit nombre de ressemblances en relations harmoniques, conformément aux faibles possibilités de leurs parentés tonales.

Le troisième type d'essais a traité de l'identification d'intervalles successifs. Sur ce point les sons sinusoïdaux ne se distinguent que peu des sons complexes. Les performances observées dépendent d'une part de la largeur des intervalles et de leur parenté tonale d'autre part. On en déduit que la reconnaissance des intervalles dépend avant tout du sentiment *acquis* de la parenté tonale, c'est-à-dire de capacités «cognitives», bien davantage que des caractéristiques sensorielles de l'ouïe.

1. Einleitung

Die musikalischen Tonintervalle der Oktav, Quint und Quart werden in der Musiktheorie als besonders konsonant angesehen. Konsonanz ist eine Qualität, welche aus mehreren Komponenten zusammengesetzt ist [3, 12]. Eine davon ist die sogenannte Tonverwandtschaft. Diese wiederum kann man als eine von mehreren Komponenten auffassen, welche zur Ähnlichkeit von Tönen beitragen. Die Ähnlichkeit beispielsweise der oktaverwandten Töne ist eine alltägliche Erfahrungstatsache. Man spricht auch von Äquivalenz der Töne und davon, daß dieselben eine bestimmte, musikalisch relevante Eigenschaft gemeinsam haben, nämlich das sogenannte Chroma [2, 8].

Als mögliche psychophysikalische Grundlage der Tonverwandtschaft verdienen die folgenden beiden Erkenntnisse über die Tonhöhenwahrnehmung nähere Beachtung. Erstens hat sich gezeigt, daß das Gehör bei der Wahrnehmung der Tonhöhe komplexer Töne und Klänge (der Virtuellen Tonhöhe) stets harmonische Beziehungen unter den Spektralkomponenten unterstellt; in diesem Sinne sind die zugehörigen Tonhöhenintervalle, welche den Frequenzverhältnissen 1:2, 1:3, 1:4 usw. entsprechen, gewissermaßen als Systemparameter des zentralen Gehörs präsent [10, 11]. Zweitens zeigen sowohl die Musikpraxis als auch psychoakustische Untersuchungen und die Theorie der Virtuellen Tonhöhe übereinstimmend, daß die Tonhöhe einzelner musikalischer Töne in beträchtlichem Maße mehrdeutig ist in dem Sinne, daß unter anderem Oktav- und Quintverwechslungen auftreten [2, 4, 9, 11]. Bis vor kurzem ist offenbar kaum Notiz davon genommen worden, daß jene Mehrdeutigkeit nahezu zwangsläufig das Phänomen Tonverwandtschaft nach sich zieht und damit weitgehend erklärt [14]. Es scheint demnach bei näherer Betrachtung, daß die zuvor erwähnten „harmonischen Systemparameter“ des zentralen Gehörs speziell zur Tonverwandtschaft

weniger oder gar nicht beitragen, während sie beispielsweise für die Erklärung der musikalischen Akkordgrundtöne größte Bedeutung haben [11–13].

Die Tonhöhenmehrdeutigkeit bekommt unter diesen Gesichtspunkten eine erhebliche Bedeutung für das Verständnis der Wahrnehmung von Tonfolgen bzw. Melodien. Deshalb wurden zur Ergänzung der bisher verhältnismäßig spärlichen experimentellen Daten entsprechende Hörversuche durchgeführt; sie bilden den ersten Teil der vorliegenden Arbeit (Hauptabschnitt 2). Anschließend daran werden im dritten Hauptabschnitt einige experimentelle Ergebnisse von Ähnlichkeitsbeurteilungen von Tönen erläutert und mit der Tonhöhenmehrdeutigkeit in Zusammenhang gebracht. Schließlich wird im vierten Hauptabschnitt über ausführliche Hörversuche zur Identifikation von Sukzessivintervallen berichtet und es wird gezeigt, daß zwischen Tonhöhenmehrdeutigkeit, Tonähnlichkeit und Erkennung von Sukzessivintervallen Zusammenhänge bestehen.

2. Mehrdeutigkeit der Tonhöhe komplexer Töne

Unter einem komplexen Ton wird ein Schallsignal verstanden, welches wenigstens eine ausgeprägte Tonhöhenempfindung hervorruft und dessen Spektrum aus mehr als nur einem einzigen Teilton besteht [6]. Eine Ursache der Tonhöhenmehrdeutigkeit ergibt sich unmittelbar aus der Tatsache, daß mehrere Teiltöne vorhanden sind, die vom peripheren Gehör durch Spektralanalyse hörbar gemacht werden, so daß entsprechende, mehr oder weniger ausgeprägte Spektraltonhöhen auftreten, deren man durch „analytisches Hören“ gewahr werden kann. Darüber hinaus wird eine Anzahl Virtueller Tonhöhen gebildet. Diese entstehen durch „synthetisches“, also ganzheitliches Wahrnehmen, und zwar durch eine Art Rückschließen des zentralen Gehörs auf der Grundlage der vorhandenen beziehungsweise hörbaren Teiltöne [10, 15, 16].

2.1. Versuchsmethode

Die Mehrdeutigkeit der Tonhöhe wurde dadurch erfaßt, daß die Versuchspersonen zahlreiche Tonhöhenabgleiche vorzunehmen hatten, wobei die Darbietungszeit der komplexen Testtöne verhältnismäßig kurz (200 ms) gemacht wurde. Die Vpn wurden dabei zusätzlich unter Zeitdruck gesetzt, das heißt, angehalten, ihre Einstellung möglichst rasch vorzunehmen. Der Tonhöhenabgleich geschah in der Weise, daß zunächst der Testton binaural über Kopfhörer dargeboten wurde und unmittelbar nach dessen Abschalten die Vp einen ebenfalls binaural dargebotenen Sinuston in der Frequenz auf die spontan empfundene Tonhöhe abzugleichen hatte. Dabei wurde die Ausgangsstellung der Sinustonfrequenz von Darbietung zu Darbietung verändert und insbesondere einmal nach sehr tiefen, das andere mal nach sehr hohen Frequenzen gelegt.

Die Tonhöhenmessungen wurden mit zwei verschiedenen Typen harmonischer komplexer Töne durchgeführt, nämlich erstens solchen, deren Spektrum sich ausschließlich aus Teiltönen im Oktavabstand zusammensetzt, und zweitens „normalen“ komplexen Tönen, das heißt solchen, die aus einer vollständigen Reihe von Harmonischen zusammengesetzt waren.

2.2. Komplexe Töne mit Oktavspektren

Ein besonders hohes Maß an Mehrdeutigkeit weist die Tonhöhe komplexer Töne auf, welche ausschließlich aus denjenigen Harmonischen zusammengesetzt sind, welche zueinander im Frequenzverhältnis 2^n (n ganz) stehen; solche Teiltone werden der Kürze halber als Oktavspektren bezeichnet. Als „Grundfrequenz“ eines derartigen komplexen Tones sieht man zweckmäßigerweise die Frequenz des tiefsten vorhandenen Teiltones an. Bezeichnet man diese mit f_1 , dann haben die einzelnen Teiltöne die Frequenzen $2^n f_1$. Die untersuchten Testklänge bestanden aus maximal 8 derart spezifizierten Teiltönen, so daß $0 \leq n \leq 7$, und die Grundfrequenzen lagen im Bereich $30 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 60 \text{ Hz}$.

Die Schallpegel der Teiltöne waren in einem ersten Hörversuch alle gleich hoch und der Gesamtschallpegel wurde auf 50 dB eingestellt. In diesem Falle wurde in Kauf genommen, daß die tieferen Teiltöne in der Regel unter die Hörschwelle fielen. Um zu kontrollieren, welchen Einfluß dieser Sachverhalt auf die Ergebnisse hat, wurden in einem weiteren Versuch die Teiltonpegel entsprechend der Kurve gleicher Lautheit eingestellt und der Gesamtschallpegel so gewählt, daß die Lautheit der

komplexen Töne ungefähr dieselbe wie im ersten Versuch war. Es nahmen am ersten Versuch 8 Vpn, am zweiten 10 Vpn teil. Der Bereich, in welchem die Frequenz des Vergleichssinustones von der Vp verändert werden konnte, war 0 bis 2000 Hz. Der Vergleichston besaß dieselbe Lautheit wie der komplexe Testton. Die Darbietungszeit von Test- und Vergleichston war jeweils 200 ms, und die Darbietungen erfolgten binaural über freifeldentzerrte Kopfhörer DT48. Die Messungen wurden bei den Grundfrequenzen $f_1 = 30; 32,5; 35; 37,5; 40; 42,5; 45; 47,5; 50; 55; \text{ und } 60 \text{ Hz}$ durchgeführt. Bei jeder Grundfrequenz machte jede Vp im ersten Versuch 3, im zweiten 6 Einstellungen.

Die Frequenzeinstellungen lagen, wie erwartet, überwiegend dicht bei den Werten $2^n f_1$, denn es ist nahezu ausschließlich die Oktavlage, hinsichtlich welcher diese Klänge mehrdeutig sind. Fig. 1 gibt einen exemplarischen Überblick über die Ergebnisse. Dargestellt ist die relative Anzahl von Frequenzeinstellwerten, die innerhalb eines Bereichs von 20% um die einzelnen Frequenzwerte $2^n f_1$ lagen. Weil die Ergebnisse bei allen Grundfrequenzen demselben Schema folgen, wurden in Fig. 1 nur diejenigen für die Grundfrequenzen 30, 40, 50 und 60 Hz dargestellt. Die Säulen gehören zum ersten Versuch, die Kreise zum zweiten. Durch Addieren der relativen Häufigkeitswerte innerhalb ein- und derselben Grundfrequenz kann man feststellen, daß in der Tat die meisten Einstellungen bei den Frequenzen $2^n f_1$ lagen, denn die betreffenden Summen liegen bei allen Grundfrequenzen über 80%. Weiterhin zeigt Fig. 1, daß kein erkennbarer Unterschied zwischen den Ergebnissen der beiden Versuche besteht. Die Tatsache, daß die tieferen Teiltöne der Testklänge im ersten Versuch unhörbar, im zweiten dagegen überschwellig waren, macht offensichtlich keinen Unterschied. Dies ist nur dann überraschend, wenn man von der Annahme ausgeht,

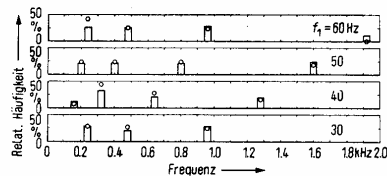


Fig. 1. Tonhöhenverteilungen komplexer Töne mit Oktavspektren (Vergleichstoneinstellungen). Es wurden nur diejenigen Einstellwerte erfaßt, welche innerhalb eines Bereichs von 20 Hz Breite um die Frequenzen $2^n f_1$ lagen, wobei f_1 die Frequenz des tiefsten Teiltones ist. Säulen: Gleiche Schallpegel aller Teiltöne; Gesamtpegel des komplexen Tones 50 dB. Kreise: Gleiche Lautstärkepegel der Teiltöne. Vergleichston: Sinus; Schallpegel 60 dB.

daß die Versuchspersonen die *Spektraltonhöhen* der einzelnen Testklangkomponenten eingestellt hätten. Das Auftreten von Spektraltonhöhen hängt in der Tat davon ab, daß die zugehörigen Teiltöne überhaupt hörbar sind. Im Rahmen der Theorie der Virtuellen Tonhöhe ist jene Annahme jedoch nicht selbstverständlich. Vielmehr ist davon auszugehen, daß die wahrgenommenen Tonhöhen im allgemeinen Virtuelle Tonhöhen sind, also solche, welche von verschiedenen Spektraltonhöhen abgeleitet werden. Wie die Theorie der Virtuellen Tonhöhe zeigt, entsprechen die mehrdeutigen Werte jener Virtuellen Tonhöhen ebenso den Frequenzen $2^n f_1$ wie die Spektraltonhöhen der Teiltöne. Jedoch besteht der Unterschied, daß das Auftreten einer Virtuellen Tonhöhe bei einem bestimmten Wert $2^n f_1$ im Prinzip davon unabhängig ist, ob dort eine hörbare Spektralkomponente vorhanden ist, oder nicht.

In Fig. 2 sind die zusammengefaßten Resultate beider Versuche in einer anderen Form dargestellt. Wie erwähnt, wurde bei jeder der angegebenen Grundfrequenzen eine Serie von Häufigkeitswerten gewonnen, welche ihrerseits den Frequenzen $2^n f_1$ ($n=0$ bis 7) zugeordnet sind. Diese Häufigkeitswerte sind in Fig. 2 bei den zugehörigen Absolutfrequenzen eingetragen, und zwar als Ziffern. Dieselben geben die Oktavnummer n an. Wenn beispielsweise bei der Frequenz 300 Hz und einer Häufigkeit von etwa 38% die Ziffer 3 eingetragen ist, so bedeutet dies, daß bei einem Testklang der Grundfrequenz $300 \cdot 2^{-3}$ Hz = 37,5 Hz innerhalb der Toleranz von 20% die tonhöhenäquivalente Frequenz von 300 Hz in 38% aller Fälle eingestellt wurde.

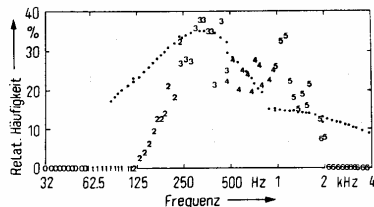


Fig. 2. Tonhöhenverteilung komplexer Töne mit Oktavspektren. Relative Häufigkeit, mit welcher verschiedene Vergleichstonfrequenzen eingestellt wurden. Meßpunkte aller verwendeter Grundfrequenzen (s. Text) und beider Versuche zusammengefaßt. Die Ziffern geben die Ordnungszahl n der Einstellwerte bezüglich der jeweiligen Grundfrequenz f_1 an nach der Beziehung $f = f_1 2^n$. Punkte: Nach [15] berechnete Ausprägtheitsverteilung der Tonhöhen der Testschalle; die in willkürlichen Einheiten berechneten Gewichte wurden dazu proportional den experimentell ermittelten Häufigkeiten gesetzt (Ordinate).

Die Tonhöhenwahrnehmung von harmonischen komplexen Tönen, deren Spektrum in der beschriebenen Weise ausschließlich aus Teiltönen im Oktavabstand besteht, kann demnach zusammenfassend wie folgt beschrieben werden.

- Die angegebenen Tonhöhen entsprechen in keinem Falle der Frequenz des tiefsten objektiv vorhandenen Teiltones. Dabei ist zu beachten, daß diese Frequenz (die „Grundfrequenz“) stets kleiner oder gleich 60 Hz war.
- Falls ein Teil der tieferen Teiltöne unter die Hörschwelle fällt (was im ersten Versuch möglich war), so entspricht die Tonhöhe gleichwohl nicht der Frequenz des tiefsten gerade noch hörbaren Teiltones. Dies folgt daraus, daß auch im zweiten Versuch (in welchem alle Teiltöne überschwellig waren) keine Tonhöhe unterhalb 125 Hz angegeben wurde.
- Die tonhöhenäquivalenten Frequenzen liegen überwiegend dicht bei den Werten $2^n f_1$, also den Frequenzen der Teiltöne. Wie oben gesagt, bedeutet dies aber nicht, daß die einzelnen Tonhöhen jeweils allein durch den entsprechenden Teilton hervorgerufen werden.
- Die Auswahl, welche das Gehör unter den zahlreichen möglichen Tonhöhen dieser Testklänge trifft, richtet sich im wesentlichen nach der Absolutfrequenz. Das heißt: Unabhängig von Grundfrequenz und Oktavnummer werden die Tonhöhen im Bereich 200 Hz bis 1,5 kHz empfunden. Eine deutliche Bevorzugung weisen tonhöhenäquivalente Frequenzen um 300 Hz auf.

Wie schon angedeutet, ist anzunehmen, daß die mehrdeutigen Tonhöhen im wesentlichen Virtuelle Tonhöhen sind, welche aus den hörbaren Teiltönen (das heißt im wesentlichen, den höheren Teiltönen) durch „subharmonische Koinzidenzdetektion“ [10] gebildet werden. Die Ausprägtheit der einzelnen, miteinander konkurrierenden Tonhöhen kann, ebenso wie die Tonhöhen selbst, mit dem früher beschriebenen Tonhöhenberechnungsverfahren [15] berechnet werden. Das Ergebnis ist in Fig. 2 punktiert eingetragen. Weil das Berechnungsverfahren die Tonhöhenausprägtheit durch Gewichte in willkürlichem Maßstab kennzeichnet, wurde zur Anpassung an die experimentell gefundene Häufigkeitsverteilung das höchste vorkommende Gewicht der relativen Häufigkeit 35% zugeordnet und die übrigen Gewichte darauf normiert. Auf die Angabe der Oktavnummern wurde der Übersicht wegen verzichtet, da sie demselben Schema folgt wie bei den Versuchsdaten. Man erkennt eine vollkommene Übereinstimmung der Grundtendenzen insofern, als

die berechneten Tonhöhenverteilungen vollständig die oben unter a) bis d) angegebenen Charakteristika aufweisen. Eine deutliche quantitative Abweichung zwischen den berechneten Tonhöhen gewichten und den empirischen Häufigkeiten wird allerdings bei tonhöhenäquivalenten Frequenzen unterhalb etwa 250 Hz erkennbar. Das Berechnungsverfahren weist eine Überbewertung tiefer Tonhöhen auf, beziehungsweise sagt zum Teil tiefe Tonhöhen voraus, welche zwar der Höhe nach möglich und sinnvoll sind, jedoch im Experiment nicht mit entsprechender Häufigkeit gefunden wurden.

2.3. Harmonische komplexe Töne

Unter einem harmonischen komplexen Ton wird ein Schallsignal verstanden, dessen Spektrum aus einer vollständigen Reihe von Harmonischen besteht, so daß die Teiltonfrequenzen durch $f_n = n f_b$ gegeben sind (f_n = Frequenz des n -ten Teiltone; f_b = Grundfrequenz). Um überhaupt von einem harmonischen komplexen Ton sprechen zu können, muß man streng genommen die Grundfrequenz von vorn herein vorgeben, denn „Harmonizität“ der Teiltöne (im hier betrachteten mathematisch-formalen Sinne des Wortes) läßt sich nur in bezug auf eine bestimmte Grundfrequenz definieren.

Nach der in 2.1 beschriebenen Methode wurden harmonische komplexe Töne mit den Grundfrequenzen 60, 120, 180, 240, 300, 450, 600, 900, 1200, 1500 und 2100 Hz untersucht. Die komplexen Töne wurden als periodische Rechteckimpulse kurzer Dauer erzeugt und mit einem Filter für gleichmäßig-anregendes Rauschen (Frequenzgang -3 dB/Okt. oberhalb 500 Hz) frequenzgangbewertet. Der Darbietungsschallpegel war 60 dB und die Darbietungen erfolgen in diesem Falle monotonisch. 8 Vpn führten bei jeder Grundfrequenz je 6 Einstellungen des Vergleichssinustones durch.

Die einzelnen Einstellwerte wurden innerhalb eines 0,2 Frequenzgruppen breiten Frequenzintervalls zusammengefaßt. Durch kontinuierliches Verschieben dieses Intervalls auf der Frequenzachse wurden die in Fig. 3 dargestellten Verteilungen gewonnen. Hinsichtlich des Ordinatenwerts ist zu beachten, daß jenes Intervall als Funktion der Frequenz variiert. Im Bereich $f < 500$ Hz ist es angenähert konstant und beträgt etwa 20 Hz; oberhalb 1 kHz ist seine Weite ungefähr 4% der Frequenz.

Aus dem Auftreten mehrerer Maxima unterschiedlicher Höhe geht hervor, daß die Tonhöhe der vollständigen komplexen Töne in der Tat mehrdeutig ist. Eine genauere Untersuchung ergibt, daß der Frequenzabstand zwischen benachbarten

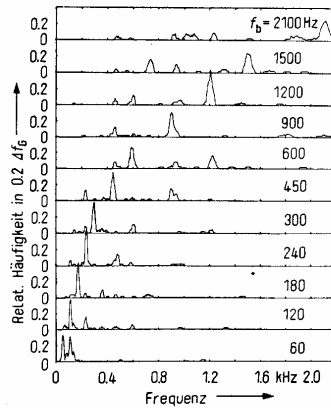


Fig. 3. Kontinuierliche Tonhöhenverteilungen harmonischer komplexer Töne mit den angegebenen Grundfrequenzen f_b . Abszisse: Eingestellte Frequenzen des Vergleichs-Sinustones, d.h. Mittelwert des Summationsintervalls. Ordinate: Relative Häufigkeit der Einstellwerte innerhalb des Summations-Frequenzintervalls von 0,2 Frequenzgruppen Breite.

Maxima angenähert demjenigen von Oktaven, Quinten und einigen weiteren musikalischen Grundintervallen entspricht. Wegen der unvermeidlichen Einstellungenauigkeiten, sowie wegen des Einflusses von Tonhöhenverschiebungen [10] kann nicht erwartet werden, daß die genannten Frequenzabstände *genau* den zugehörigen Verhältnissen kleiner ganzer Zahlen (d.h., 1:2, 2:3, 3:4) entsprechen. Um trotz dieser Abweichungen die musikalischen Beziehungen zwischen den miteinander konkurrierenden Tonhöhen deutlich zu machen, wurde die Lage der Nebenmaxima jeweils in Bezug auf das Hauptmaximum in Halbtonkategorien ausgedrückt und in Fig. 4 dargestellt. Die Ordinatenwerte entsprechen denen von Fig. 3 und die Rechtecksäulen kennzeichnen die Lage eines Maximums mit Halbtongenauigkeit relativ zum Hauptmaximum. Man kann folgende Beobachtungen zusammenfassen.

- Die Hauptwerte der Tonhöhe entsprechen in allen untersuchten Fällen der Grundfrequenz im oben angegebenen Sinne des Wortes.
- Als Nebenwerte treten vor allem Tonhöhen auf, welche mit dem Hauptwert die aus der Musiklehre bekannten „konsonanten“ Intervalle bilden. Zählt man die in Fig. 4 jeweils bei ein- und derselben Grundfrequenz erkennbaren Intervalle zusammen, so findet man 13mal die Oktav (12 Halböne), 4mal die kleine Sext (8 ht), 3mal die Quint (7 ht), 4mal die Quart (5 ht), 3mal die

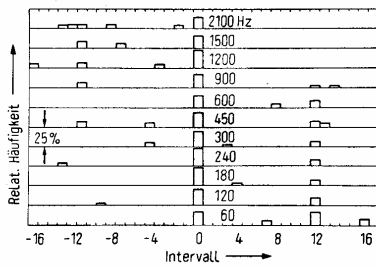


Fig. 4. Kategorisierte Darstellung der Ergebnisse von Fig. 3. Dem jeweiligen Tonhöhenhauptwert (höchstes Maximum in Fig. 3) wurde die relative Tonkategorie 0 zugeordnet (Abszisse in Fig. 4). Die Nebenmaxima von Fig. 3 wurden durch Rundung ihrer Frequenzen auf $\pm 3\%$ in die entsprechenden Halbtonkategorien (Intervall in Halbtonen ht) eingeordnet. Ordinate: Relative Häufigkeit wie in Fig. 3.

große Terz (4 ht) und 3mal die kleine Terz (3 ht).

- c) Wenn die Grundfrequenz tief ist, liegen die Nebenwerte oberhalb des Hauptwerts, wenn die Grundfrequenz hoch ist, liegen sie darunter. Diese Tendenz entspricht offenbar der bei komplexen Tönen mit Oktavspektren beobachteten Konzentration der eingestellten Tonhöhen auf den Bereich um 300 Hz (vgl. Fig. 2).

Da die in Fig. 3 und 4 gezeigten Tonhöhenverteilungen sich von einer Grundfrequenz zur anderen mit gewissen Unregelmäßigkeiten ändern, ist anzunehmen, daß die Verteilungen noch mit unsystematischen Einflüssen behaftet sind, insbesondere hinsichtlich der weniger gewichtigen Nebenwerte. Um eine höhere statistische Zuverlässigkeit der Tonhöhenverteilungen zu erzielen, müßte der Untersuchungsaufwand offenbar noch deutlich erhöht werden. Jedoch sind die vorstehend zusammengefaßten wesentlichen Charakteristika der Tonhöhenmehrfachdeutigkeit für die Zwecke der vorliegenden Arbeit ausreichend gesichert.

2.4. Tonhöhenmehrfachdeutigkeit und Tonverwandtschaft

Was den Zusammenhang zwischen Tonhöhenmehrfachdeutigkeit und Tonverwandtschaft betrifft, so bedarf zunächst die Frage der Klärung, welcher der beiden Effekte als Ursache und welcher als Wirkung anzusehen ist. Da die Oktav- und Quintähnlichkeit sowohl im westlichen Kulturkreis also auch bei primitiven Kulturen vorhanden sind (wobei zunächst offenbleibt, welches ihre Ursachen sind), besteht auf den ersten Blick die Möglichkeit, daß

die beobachtete Tonhöhenmehrfachdeutigkeit eine *Auswirkung* der Tonverwandtschaften wäre, welche ihrerseits möglicherweise das Ergebnis einer mehr oder weniger willkürlichen Entwicklung der Musikkultur sein könnten. Dies würde bedeuten, daß man die beobachtete Tonhöhenmehrfachdeutigkeit einzelner Töne als „Artifakt“ anzusehen hätte, derart, daß die Tonhöhen der Töne an sich eindeutig wären und nur insofern zum Teil miteinander verwechselt würden, als sie gegebenenfalls die betreffenden Verwandtschaften aufweisen. Diese Hypothese wird jedoch durch folgende beide Tatsachen widerlegt.

Erstens hängt die Struktur der Tonhöhenverteilung, die sich im Experiment ergibt, offensichtlich und systematisch von der Teiltonzusammensetzung der untersuchten Töne ab (vgl. die Unterschiede zwischen dem ersten und zweiten Experiment). Dies wird besonders deutlich erkennbar, wenn man in Betracht zieht, daß die wahrgenommene Tonhöhe eines einzelnen Sinustones fast vollkommen eindeutig ist, so daß Sinustöne verschiedener Frequenz so gut wie nie miteinander verwechselt werden, insbesondere auch dann nicht, wenn die Frequenzen sich wie 1:2, 2:3 usw. verhalten. Zweitens liefert die Theorie der Tonhöhenwahrnehmung [10, 15], deren Struktur aus zahlreichen psychoakustischen Daten verschiedener Art entwickelt wurde, ganz von selbst eine Beschreibung der Tonhöhenmehrfachdeutigkeiten, welche weitgehend den experimentellen Beobachtungen gerecht wird.

Als Erklärung für die beobachteten Tonhöhenverwechslungen einzelner komplexer Töne bleibt demnach die Schlußfolgerung, daß jeder der Töne mehrere Tonhöhen zugleich hervorruft, welche miteinander konkurrieren. Diese Tonhöhenmehrfachdeutigkeit ist als ein sensorisches, das heißt, durch die Mechanismen der Tonhöhenwahrnehmung bedingtes Phänomen anzusehen. Die Tonhöhenverwechslungen sind nicht die Folge der Tonverwandtschaften, sondern die in den Verwechslungen zutage tretende Tonhöhenmehrfachdeutigkeit ist offenbar Ursache der Verwandtschaften. Dies kann man sich so vorstellen, daß bei geeigneter Teiltonzusammensetzung beziehungsweise Grundfrequenz verschiedene komplexe Töne mehrere Tonhöhen miteinander gemeinsam haben können, wodurch eine partielle Übereinstimmung der „Tonhöhengestalten“ der Töne zustandekommt. Anzahl und individuelle Ausprägtheit der gemeinsamen Tonhöhen sind dann sinnvollerweise als Bestimmungsgrößen des Verwandtschaftsgrades anzusehen. Daraus ergibt sich offensichtlich und in Übereinstimmung der Musiktheorie, daß die Oktavverwandtschaft am engsten ist, wonach die Quint-, Quart-, Sext- und Terzverwandtschaften folgen.

Die Tonverwandtschaft, welche nach dieser Hypothese zunächst vor allem durch die Kombination physikalischer mit auditorischen Eigenschaften harmonischer komplexer Töne begründet wird, kann sich auf Sinustöne übertragen, indem durch häufiges Wahrnehmen komplexer Töne die verwandten Tonhöhenintervalle im Gedächtnis bleiben. Es ist deshalb nicht überraschend, wenn bei erwachsenen Versuchspersonen auch mit Sinustönen ein gewisses Maß von Tonverwandtschaft beobachtet wird.

3. Ähnlichkeit von Tönen

Die Verwandtschaft zweier Töne im Sinne partieller Übereinstimmung der Tonhöhenverteilungen stellt eine Ähnlichkeit her, welche ihrerseits experimentell untersucht werden kann. Dabei ist zu beachten, daß die Ähnlichkeit wahrgenommener Objekte stets „mehrdimensional“, das heißt, vom Zusammenwirken einer Anzahl sensorischer Eigenschaften der Objekte abhängig ist. Musikalische Töne können sich in mannigfacher Hinsicht voneinander unterscheiden oder umgekehrt einander ähnlich sein, beispielsweise in Lautheit, Klangfarbe und Haupttonhöhe. Wenn also in Hörversuchen die Ähnlichkeit von je zwei Tönen beurteilt wird, so hängt das Ausmaß, in welchem eine einzelne Komponente (im vorliegenden Zusammenhang ist dies die Tonverwandtschaft) sich auf die Ergebnisse auswirkt, stark vom Vorhandensein, der Variationsbreite und dem relativen Gewicht der übrigen Komponenten ab. Unter Beachtung dieses Vorbehalts ist es sinnvoll, Tonpaare auf ihre auditive Ähnlichkeit zu untersuchen. Falls sich dabei die Tonverwandtschaften zeigen, kann dies zumindest qualitativ als Bestätigung der zuvor erläuterten Zusammenhänge aufgefaßt werden. Wenn andererseits die Ergebnisse der Ähnlichkeitsbeurteilung die Tonverwandtschaften nicht unmittelbar widerspiegeln, so ist dies kein schlüssiger Gegenbeweis, sondern kann daran liegen, daß die Tonverwandtschaft von anderen Ähnlichkeitsbestimmenden Einflüssen überdeckt wird.

Es gibt eine große Zahl von Untersuchungen, welche für die vorliegende Fragestellung von Bedeutung sind [1-5, 17]. Die Ergebnisse von Kallmann [5], welche die Ähnlichkeit von Sinustönen beschreiben, sind besonders bemerkenswert, weil sich in den Ähnlichkeitsurteilen keine der Tonverwandtschaften widerspiegelt. Vielmehr nimmt die Ähnlichkeit monoton mit dem Frequenzabstand (bzw. der musikalischen Intervallweite) ab. Dieses Resultat kann wie folgt interpretiert werden. Zwei

Sinustöne können sich außer in der Amplitude lediglich in der Frequenz voneinander unterscheiden. Damit ist auch die Zahl der auditorischen Parameter, welche an der Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit der beiden Töne beteiligt sein können, gering. Im wesentlichen kann es sich nur um die Tonhöhe handeln. Kallmanns Ergebnis zeigt somit, daß im Vergleich zur Unähnlichkeit, die sich allein aus dem Tonhöhenunterschied ergibt, die Tonverwandtschaft eine untergeordnete Rolle spielt. Die Empfindung der Tonverwandtschaft ist bei Sinustönen offenbar nur schwach ausgeprägt, wie das nach den Überlegungen des Abschnitts 2.4 zu erwarten war.

In unseren eigenen Experimenten, welche an anderer Stelle ausführlich geschildert werden [7], wurde ein Vielzahl verschiedener Töne verwendet, und zwar Sinustöne und harmonische komplexe Töne mit verschiedener Teiltonzusammensetzung. Die Vpn hatten im Hörversuch nacheinander die Ähnlichkeit von Tönen zu beurteilen, welche sich nicht nur in der Tonhöhe, sondern auch der Klangqualität voneinander unterschieden. Für Sinustöne ergab sich dabei eine schwache Tendenz, Töne im Oktavabstand ein wenig ähnlicher zu beurteilen als die Nachbarintervalle (Septim, None). Im großen und ganzen zeigte sich aber in Übereinstimmung mit [5], daß die Tonverwandtschaft sich in der Ähnlichkeit von sukzessiven Sinustönen nur schwach oder gar nicht widerspiegelt. Es wurde weiterhin ein systematischer Unterschied zwischen Musikern und Nichtmusikern gefunden, derart, daß Musiker einen deutlicheren Einfluß der Tonverwandtschaft zeigen als Nichtmusiker. Die Ähnlichkeitsurteile harmonischer komplexer Töne weisen dagegen einen deutlichen Einfluß der Tonverwandtschaft auf. Als Beispiel zeigt Fig. 5 Ähnlichkeitsschätzungen für Sukzessivintervalle von Klaviertönen als Funktion der Intervallweite in Halbtönen (ht). Jeder Meßpunkt

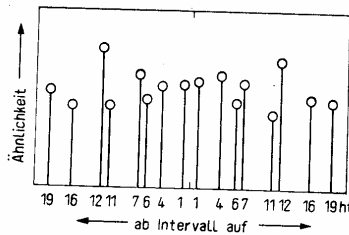


Fig. 5. Ähnlichkeits-Schätzwerte (Ordinate, willkürlicher Maßstab) von Klaviertönen, welche in Sukzessivdarbietung die an der Abszisse angegebenen Intervalle bildeten (auf- bzw. absteigende Reihenfolge), nach [7]. Intervalle in Halbtönen (ht).

beruht auf 44 Schätzungen jeder Vp. Man kann erkennen, daß der bereits mit Sinustönen gefundenen monotonen Abnahme der Ähnlichkeit mit wachsender Intervallweite der Einfluß der Tonverwandtschaft überlagert ist, derart, daß die große Terz (4 ht), die Quint (7 ht) und die Oktav (12 ht) signifikant hervortreten. Mit *synthetischen* harmonischen Komplexen Tönen verschiedener Spektren fanden Parncutt und Stoll [7] im Prinzip dasselbe.

Zusammenfassend kann man folgern, daß der Anteil der Tonverwandtschaft an der Tonähnlichkeit allgemein bei harmonischen komplexen Tönen deutlich größer ist als bei Sinustönen. Dies bestätigt die Vermutung, daß die Tonverwandtschaft bei harmonischen komplexen Tönen ausgeprägter ist als bei Sinustönen.

4. Identifikation von Sukzessivintervallen

Zwei innerhalb kurzer Zeit aufeinanderfolgende Töne stellen eine Art Minimalmelodie und insofern eine Grundeinheit dar. Dieselbe wird im folgenden, dem üblichen Sprachgebrauch folgend, als Sukzessivintervall bezeichnet. Verschiedene Sukzessivintervalle unterscheiden sich durch ihre Weite, das heißt, die Anzahl von Halbtonschritten (bzw. Bruchteile davon). Im folgenden wird über Hörversuche zur Erkennung von Sukzessivintervallen berichtet und es werden die Ergebnisse insbesondere unter dem Gesichtspunkt der möglichen Einflüsse von Tonhöhenmehrdeutigkeit und Tonverwandtschaft diskutiert.

4.1. Versuchsmethode

Die Aufgabe, Sukzessivintervalle nach Gehör zu identifizieren, kann als ein Test des sogenannten relativen Gehörs bezeichnet werden, vorausgesetzt, daß man dabei das Wiedererkennen der dargebotenen Töne anhand ihrer absoluten Tonhöhe verhindert. Solches Wiedererkennen ist über die relativ kurzen Zeitspannen hinweg, die zwischen den einzelnen Darbietungen liegen, auch Nicht-Absoluthörern möglich. Deshalb wurden die Sukzessivintervalle den Vpn in zufällig wechselnder Tonlage dargeboten. Nach der Darbietung eines Testintervalls sollte die Vp auf dem Manual einer elektronischen Orgel das gehörte Intervall in immer derselben Tonlage angeben. Dazu wurde die Versuchsperson veranlaßt, indem der jeweils erste Ton des reproduzierten Intervalls (c^1) fest vom versuchssteuernden Computer vorgegeben wurde. Die Vpn waren dadurch gezwungen, zunächst das Testintervall als Ganzes zu identifizieren und es danach auf

den festen Bezugston c^1 zu transponieren. Die Vpn hatten dazu beliebig viel Zeit und hatten die Möglichkeit, das Testintervall mehrmals abzurufen. Sowohl der Zeitaufwand als auch die Zahl der verlangten Wiederholungen wurden zwecks zusätzlicher Auswertung vom Steuerrechner registriert. Die Darbietungen erfolgten binaural über Kopfhörer DT48 mit einem Schallpegel von etwa 75 dB, und die sukzessiven Töne hatten je 1 s Dauer.

4.2. Ergebnisse

In einem ersten Experiment wurden die Testintervalle auf die Maximalgröße einer Oktav beschränkt. Das heißt, es wurden sämtliche zwölf innerhalb einer Oktave möglichen Intervalle dargeboten, und zwar in zufälliger Auswahl aus dem Tonbereich c^1 bis c^3 . Die Antwort der Vp erfolgte durch Reproduktion des Intervalls auf dem fest vorgegebenen Ton c^1 . Das Experiment wurde in zwei getrennten Durchgängen, und zwar einmal mit Sinustönen, das zweite Mal mit harmonischen komplexen Tönen durchgeführt. Die 10 beteiligten Vpn waren alle musikinteressiert, jedoch mit unterschiedlicher Musizierpraxis; sie waren weder Berufsmusiker noch Musikstudenten. Innerhalb jedes Durchganges hatte jede Vp jedes der zwölf Testintervalle viermal zu erkennen.

Fig. 6 zeigt die mittleren Erkennungsraten für die beiden Durchgänge. Daran sind folgende Merkmale beachtenswert.

- a) Die Ergebnisse mit Sinustönen unterscheiden sich von denen mit komplexen Tönen im wesentlichen, dadurch, daß die Erkennungsraten im

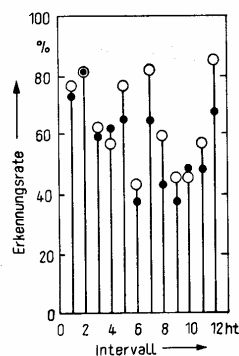


Fig. 6. Identifikation von Sukzessivintervallen. Punkte: Sinustöne; Kreise: harmonische komplexe Töne. Intervall (Abszisse) in Halbtonen (ht). Versuch mit 10 Vpn und maximal 12 ht Intervallgröße.

Mittel etwas geringer sind. Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß daran die während des Experiments zunehmende Übung der Vpn beteiligt ist (der Versuch mit Sinustönen wurde zuerst gemacht).

- b) Die Erkennungssicherheit nimmt im Mittel mit wachsender Intervallgröße ab. Jedoch ist ein deutlicher Einfluß der Tonverwandtschaft zu erkennen: Oktav, kleine Sext, Quint und Quart wurden sicherer erkannt als ihre Nachbarintervalle. Dies gilt sowohl für Sinustöne auch komplexe Töne.

Ein weiteres Experiment wurde ausschließlich mit harmonischen komplexen Tönen durchgeführt. Daran nahmen außer der ersten Gruppe von 10 Vpn weitere 13 Vpn teil, und zwar 12 Musikstudenten und ein Professor für Gehörbildung. Die untersuchten Intervalle wurden dem Tonbereich f^0 (174 Hz) bis g^3 (1568 Hz) in zufälliger Auswahl entnommen. Ansonsten waren die Versuchsbedingungen dieselben wie oben. Fig. 7 zeigt das mittlere Ergebnis der 23 Vpn. Darin sind wieder die Einflüsse von Intervallgröße einerseits und Tonverwandtschaft andererseits deutlich zu erkennen. Wegen der großen Zahl von geübten Vpn und Intervallreproduktionen kann dieses Resultat als gesichert und typisch angesehen werden.

Die über alle Vpn und Intervalle gemittelten Erkennungsraten betragen im ersten Versuch (maximale Intervallgröße 12 ht; 10 Vpn) mit Sinustönen 59%, im selben Versuch mit komplexen Tönen 66%. Im letzten Versuch (maximale Intervallgröße 24 ht; 23 Vpn; komplexe Töne) waren es ebenfalls 66%. Die geringste Erkennungsrates einer Vp war im letzten Versuch 17%, die höchste 99%. Im letzten Experiment erreichten von den 23 Vpn nur fünf Erkennungsraten von mehr als 90%. Eine Durchsicht der individuellen Ergebnisse zeigte eine fast vollkommene Korrelation mit der musikalischen Aktivität und Gehörbildung.

Fig. 8 zeigt exemplarisch die Verteilung der reproduzierten Intervalle für einige Testintervalle (kleine Terz bis Oktav). Daraus geht hervor, mit welchen Intervallen Verwechslungen stattfanden. Die Daten entstammen dem letzten Versuch mit 23 Vpn. Sie zeigen, daß die Intervalle mindestens bis zur Weite einer Oktave (12 ht) im wesentlichen mit solchen *ähnlicher Weite* verwechselt wurden. Schließt man aus der Verwechselbarkeit von Sukzessivintervallen auf deren Ähnlichkeit, so folgt daraus, daß sie einander umso ähnlicher sind, je weniger sie in der Größe voneinander abweichen. Verwechslungen solcher Intervalle, die einander im Konsonanzgrad ähnlich sind (im wesentlichen also Oktav und

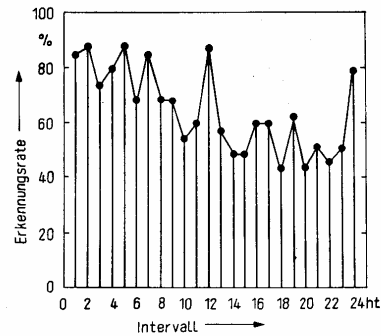


Fig. 7. Identifikation von Sukzessivintervallen. Harmonische komplexe Töne, mit 23 Vpn und maximal 24 ht Intervallgröße.

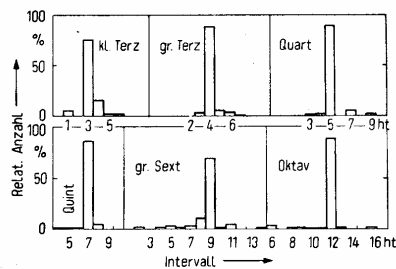


Fig. 8. Häufigkeitsverteilungen der reproduzierten Intervalle für die exemplarisch ausgewählten angegebenen Sukzessivintervalle. Versuch mit 23 Vpn und maximal 24 ht Intervallgröße.

Quint), finden praktisch nicht statt. Wie Fig. 8 weiter zeigt, ist die Intervallweitentoleranz bei den „konsonanten“ Intervallen (Oktav, Quint) besonders klein. Das heißt, daß das Gehör für Intonationsfehler dieser Intervalle besonders empfindlich ist, eine bekannte Erfahrung [2]. Die höheren Erkennungsraten der „konsonanten“ Intervalle sind mit verminderten Fehleinschätzungen der Intervallweite verknüpft.

Bei Intervallen, die größer als etwa 15 ht sind, wurden auch Verwechslungen mit kleineren, harmonisch verwandten Intervallen beobachtet. Insbesondere wurde in etwa 10% der Fälle die Doppeloktave als Einfachoktave reproduziert. Diese Tendenz ist auf die sehr weiten Intervalle beschränkt und den zuvor beschriebenen Charakteristika überlagert.

4.3. Schlußfolgerungen und Diskussion

Offenbar gibt es in der Tat Zusammenhänge zwischen der Wahrnehmung von Sukzessivintervallen auf der einen Seite und Tonverwandtschaft, beziehungsweise Tonhöhenmehrdeutigkeit auf der anderen. Die Zusammenhänge lassen sich qualitativ wie folgt andeuten.

Die Erkennung von Sukzessivintervallen kann man offenbar auffassen als einen Prozeß, welcher auf der Wahrnehmung der Verschiebung beruht, welche die gesamte Tonhöhenverteilung beim Übergang vom einen zum anderen Ton erfährt. Diese Verschiebung ist in mancher Hinsicht vergleichbar mit der Ortsverschiebung einer visuell wahrgenommenen Gestalt. Aus der Tendenz der Erkennungsrate, im Mittel mit wachsender Intervallgröße, das heißt, wachsender Verschiebung abzunehmen, kann man schließen, daß die Identifikation eines Sukzessivintervalls zum Teil von einer Schätzung der Verschiebungsweite abhängt. In der weiteren Tatsache, daß tonverwandte Intervalle sicherer erkannt werden als andere, zeigt sich deutlich ein Einfluß der Tonverwandtschaft. Da jedoch nach Fig. 6 die Intervallerkennung nicht wesentlich davon abhängt, ob Sinustöne oder harmonische komplexe Töne verwendet werden, kann von einem unmittelbaren Einfluß der Tonhöhenmehrdeutigkeit (sozusagen dem sensorischen Aspekt der Tonverwandtschaft) keine Rede sein. Somit bleibt die Schlußfolgerung, daß die Sukzessivintervall-Erkennung im wesentlichen vom erworbenen Empfinden der Tonverwandtschaft abhängt. Die Intervallerkennung scheint eine „kognitive“ Leistung des zentralen Gehörs zu sein. Die geschilderten Ergebnisse vertragen sich schlecht mit der Vorstellung, daß das sogenannte relative Gehör im wesentlichen auf elementaren Mechanismen des Gehörs beruht. Zur Vertiefung und eingehenden Überprüfung der angedeuteten Zusammenhänge wird es nötig sein, quantitative Modellvorstellungen zu entwickeln und weitere Hörversuche durchzuführen.

(Eingegangen am 7. Oktober 1985.)

Literatur

- [1] Allen, D., Octave discriminability of musical and non-musical subjects. *Psychonomic Science* 7 [1967], 421.
- [2] Bachem, A., Tone height and tone chroma as two different pitch qualities. *Acta Psychologica* 7 [1950], 80.
- [3] Deutsch, D., *The psychology of music*. Academic Press, New York 1982.
- [4] Idson, W. L. and Massaro, D. W., A bidimensional model of pitch in the recognition of melodies. *Perception Psychophysics* 24 [1978], 551.
- [5] Kallman, H. J., Octave equivalence as measured by similarity ratings. *Perception Psychophysics* 32 [1982], 37.
- [6] NTG-Empfehlung 1704. Terminologie der Psychoakustik. *Nachr. Techn. Z.* 37 [1984], 673.
- [7] Pamcutt, R. und Stoll, G., Harmonic relationship in similarity judgements of successive complex tones. *Inst. of Electroacoustics, Technical University, München*, in preparation (1986).
- [8] Revesz, G., Nachweis, daß in der sog. Tonhöhe zwei voneinander unabhängige Eigenschaften zu unterscheiden sind. *Nachr. d. Ges. d. Wiss. Göttingen, Math.-physikal. Klasse* 1912.
- [9] Ritsma, R. J., The "octave deafness" of the human ear. *Report Inst. f. Perception (IPO), Eindhoven* 1 [1966], 15.
- [10] Terhardt, E., Zur Tonhöhenwahrnehmung von Klängen. I/II. *Acustica* 26 [1972], 173.
- [11] Terhardt, E., Pitch, consonance, and harmony. *J. Acoust. Soc. Amer.* 55 [1974], 1061.
- [12] Terhardt, E., Ein psychoakustisch begründetes Konzept der Musikalischen Konsonanz. *Acustica* 36 [1976], 121.
- [13] Terhardt, E., Die psychoakustischen Grundlagen der musikalischen Akkordgrundtöne und deren algorithmische Bestimmung. In „Tiefenstruktur der Musik“, *Festschrift Fritz Winckel, Techn. Universität Berlin* 1982, p. 23.
- [14] Terhardt, E., Musikwahrnehmung und elementare Hörempfindungen. *Audiol. Akustik* 22 [1983], 52 und 86.
- [15] Terhardt, E., Stoll, G., and Seewann, M., Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *J. Acoust. Soc. Amer.* 71 [1982], 679.
- [16] Terhardt, E., Stoll, G., and Seewann, M., Pitch of complex signals according to virtual-pitch theory: tests, examples, and predictions. *J. Acoust. Soc. Amer.* 71 [1982], 671.
- [17] Thurlow, W. R. und Erchul, W. P., Judged similarity in pitch of octave multiples. *Perception Psychophysics* 22 [1977], 177.