

Akzentuierende Wirkung von „Zeigertönen“ auf Spektraltonhöhen Komplexer Töne

W. Schmid

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation. TU München

1. Analytische Wahrnehmung von Tonhöhen

Seit langer Zeit ist bekannt, daß nicht nur die „Haupttonhöhe“ Komplexer Töne wahrgenommen werden kann, sondern -unter geeigneten Umständen- auch weitere „Nebentonhöhen“ [1]. Durch (bewußte und) gezielte Steuerung der Aufmerksamkeit können Spektral-Tonhöhen einzeln „herausgehört“ werden. Diese „analytische Tonhöhenwahrnehmung“ kann durch Training und auch durch bestimmte Arten der Schalldarbietung gefördert werden.

Dabei kann unterschieden werden, ob ein Komplexer Ton (KT) selbst manipuliert wird, um die Wahrnehmung einer (oder mehrerer) bestimmter Tonhöhen zu erleichtern, oder ob der KT dazu in eine, in bestimmter Weise zeitlich strukturierte, „akustische Umgebung“ mit weiteren Schalle gebracht wird.¹

Der erste Fall ist z.B. gegeben bei Teilton-Pegelerhöhung, -Modulation oder -Verstimmung [2]. Die solcherart gesteigerte Deutlichkeit läßt auch Melodiekonturen, die mittels dieser Tonhöhen realisiert werden, besser erkennen [3].

Der zweite Fall - und mit diesem beschäftigt sich die vorliegende Arbeit - ist gegeben, wenn der Schall selbst nicht verändert wird, aber eine oder mehrere (Spektral-)Tonhöhen anders wahrgenommen werden aufgrund eines vorausgehenden „Zeigertons“².

H. von Helmholtz hat die „Zeigerton“-Methode beschrieben: „Will man anfangen, Obertöne zu beobachten, so ist es ratsam, unmittelbar vor dem Klang, der analysiert werden soll, ganz schwach diejenige Note erklingen zu lassen, welche man aufsuchen will [...]“ [4].

Wichtig ist nun hierbei u.a., welche Frequenz bzw. -Abweichung ein Zeigerton haben muß, damit er den fraglichen Teilton (noch) hervorheben kann. Die Klärung dieser Frage ist insbesondere auch im Zusammenhang von Untersuchungen zur Ausprägtheit von Spektraltonhöhen wichtig, da die hierbei meist verwendeten Ankerschalle oft auch gleichzeitig tonhöhen-anzeigende Wirkung haben (z.B. [5]).

2. Testschalle, Darbietung und Meßmethode

Verwendet wurden digital synthetisierte harmonische Komplexe Töne (HKT): Basisfrequenzen 164 bzw. 392 Hz, 20 Teiltöne. Die Pegel der Teiltöne Nr. 1-10 waren gleich, ab Teilton Nr. 11 fiel der Pegel jeweils um 6 dB ab. (Startphasenlage bei der Synthese jeweils 0°). Dargeboten wurden diese Schalle (gaußförmige Hüllkurve, $T_G=10$ ms) diotisch über einen freifeldentzerrten [6] Kopfhörer (Beyer DT 48) mit einem Pegel von 73 dB für die Experimente in Abschnitt 3 und mit 62 dB für jene in Abschnitt 4. In allen Experimenten wurde die Konstellation, bestehend aus Zeiger- bzw. Adaptor- und Testschall (HKT), jeweils um zu starkes Sicheinprägen einzelner Tonhöhen zu vermeiden, randomisiert um $V = -3; 0; +2$ Halböne dargeboten. Die Daten, die zu den so kollektiv-verschobenen Konstellationen gehören, wurden zusammen ausgewertet. Verwendet wurde die psychometrische Methode „Größenschätzung mit Ankerschall“. In den Diagrammen werden Mediane und Interquartilbereiche dargestellt, die aus den Einzelmesswerten aller Sitzungen hervorgingen..

3. Vorexperimente

3.1 Versuchspersonen und Vorexperiment 1

V. Helmholtz schreibt hierzu, daß „[...] ein musikalisch geübtes Ohr die Obertöne nicht notwendig leichter und sicherer hört, als ein ungeübtes. [...] Doch hat ein musikalisch geübter Beobachter darin

einen wesentlichen Vorzug [...], daß er sich leicht vorstellt, wie die Töne klingen müssen, welche er sucht, während der Ungeübte sie immer wieder angeben muß, um ihren Klang frisch in der Erinnerung zu haben“ [4].

Deshalb hatten die VPen in einem Vorexperiment die Aufgabe, die relative Ausprägtheit der Tonhöhe, die sie „in dem nachfolgenden HKT hörten“, relativ zu jener des Zeigertons zu beurteilen (Schalldauern: 1000ms, Pausendauer: 200ms).

Abbildung 1 zeigt, daß die drei Mitglieder der VP-Gruppe A offen-

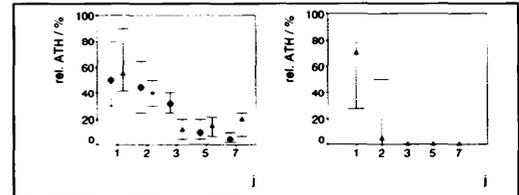


Abb. 1: Rel. Ausprägtheit der Tonhöhe in Abhängigkeit der Teilton-Nummer j für zwei Versuchspersonengruppen.

Links: VP-Gruppe A, rechts: VP-Gruppe B (nur $f_b = 392$ Hz; Basisfrequenzen f_b : 164 Hz (Kreise), 392 Hz (Dreiecke).

sichtlich in der Lage waren, die Spektraltonhöhen mit -wie zu erwarten war- nach höherer Teiltonnummer abnehmender Ausprägtheit wahrzunehmen, die drei Mitglieder der Gruppe B jedoch nicht. Die teilweise relativ großen Interquartilbereiche rühren von interindividuellen Unterschieden her. Die VP-spezifischen Streuungen der Meßwerte liegen bei nur ca. $\pm 10\%$. Die nicht abgebildeten Meßwerte der weiteren Gruppe C (3 Personen) liegen bzgl. der Mediane ungefähr bei denen der Gruppe A, streuen aber bei höherer Teiltonnummer wesentlich mehr. Im folgenden sind daher (wenn nicht anders angegeben) nur die Meßwerte der Gruppe A dargestellt. Alle VPen waren musikalisch gut gebildet, es zeigte sich aber, daß gerade die VPen der Gruppe A die weitaus meiste Erfahrung mit Hörversuchen hatten, in denen die „analytische Tonhöhenwahrnehmung“ gefordert worden war.

3.2 Vorexperiment 2: Pausendauer

In einem zweiten orientierenden Experiment wurde die Pausendauer zwischen Zeigerton (=Anker) und HKT in grober Abstufung variiert.

Abb. 2 zeigt, daß die Pausendauer von ca. 100ms auf mindestens bis

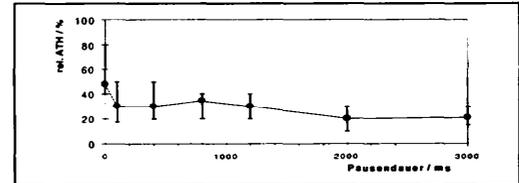


Abb. 2: Abhängigkeit der rel. Ausprägtheit der Tonhöhe von der Dauer der Pause zwischen Zeigerton (Z) und Komplexem Ton. ($f_b=392$ Hz; $f_z=2f_b$). Schalldauern: 1200ms. (18 VPen).

ca. 3000ms verlängert werden kann; die Ausprägtheit der Tonhöhe der „herausgehörten“ Spektraltonhöhe nimmt dann nur um ca. 10% ab. (Eine Pausendauer von 0 ms entspricht dem hier nicht behandelten Fall der Einsatzasynchronität eines Teiltons.)

3.3 Vorexperiment 3: Dauer des Zeigertons

Der Einfluß der Dauer des Zeigertons ist für Werte im untersuchten Bereich von 200 ms bis 2000ms mit fast verschwindend geringen Abweichungen nahezu konstant. (Die Untergrenze von 200 ms ergibt sich aus [8].) Auf eine graphische Darstellung der Meßwerte kann daher verzichtet werden.

¹ Daß diese Einteilung aber nicht zwingend ist, ist Ausdruck der hierarchischen Organisation der Tonhöhenwahrnehmung [1]. Es kann beispielsweise auch argumentiert werden, es handle sich bei einem Komplexen Ton, der einen frequenzmodulierten Teilton enthält, um einen FM-Sinuston, der zusätzlich zu einem zweiten (anderen) Schall wahrgenommen wird.

² Andere, durch bestimmte zeitliche Strukturen der Schallabfolge bedingte Arten bzw. Änderungen der Schallwahrnehmung (zeitl. Maskierung [6], Zeitfehler [7] u.v.a.) werden hier nicht thematisiert.

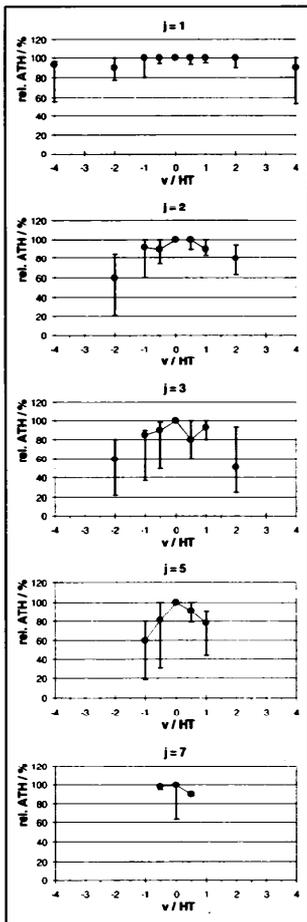


Abb. 3: Relative Ausgeprägtheit der Tonhöhe eines HKTs, die durch einen vorausgehenden Zeigerton angezeigt wird, in Abhängigkeit seiner Verstimmung v. Ankerschall ist der jeweilige Zeigerton.

4. Einfluß einer Frequenzverstimmung des Zeigertons

Mit Kenntnis der o.a. Randbedingungen wurde in diesem Experiment versucht, zu ermitteln, wie stark ein Zeigerton gegenüber der Frequenz des Teiltons des HKT verstimmt werden kann, damit er noch „akzentuierend“ und damit die Ausgeprägtheit der betreffenden Spektraltonhöhe steigend wirksam ist. Die Schallsequenz (alle Schalldauern: 1000ms) war folgende:

- Zeigerton 1:** Frequenz f_{z1v} (mit $v = 0$), also auf die Frequenz der j-ten Harmonischen des HKT gerichtet;
- Pause** 1000ms;
- HKT:** Basisfrequenz f_{bh} [⇒ Produktion des Ankerschalls];
- Pause** 4000ms;
- Zeigerton 2:** Frequenz f_{z2v} (mit $v \neq 0$); ent-

spricht damit der Frequenz der j-ten Harmonischen des HKT, ist ihr gegenüber aber um v Halbtöne verschoben; **Pause** 1000ms

HKT: Basisfrequenz f_{bh} [⇒ Produktion des Testschalls]

Pause (beliebig lang) zur Eingabe des Wertes.

Es wurden die Sequenzen mit den folg. Parametern randomisiert dargeboten, wobei jede der drei VPen jede Sequenz viermal beurteilt: V: Verschiebung des Gesamtkomplexes, siehe Abschnitt 2; j: Teilton (Harmonische) -Nummer ($j=1:2:3:5:7$); f_{bh} : Basisfrequenz des HKT; bei $v=0$ ist $f_{bh}=164\text{Hz}$ bzw. $f_{bh}=392\text{Hz}$; v: Verstimmung³ des Zeigertons gegenüber der entsprechenden Harmonischen ($v=0; \pm 0,5; \pm 1; \pm 2; \pm 4$ Halbtöne). Dementsprechend berechnet sich die Frequenz des (verstimmten) Zeigertons zu:

$$f_{z2v} = f_{bi} \cdot \left(\sqrt[2]{2}\right)^V \cdot j \cdot \left(\sqrt[2]{2}\right)^V$$

Zur Erklärung dieser Schallabfolge: Die erste Halbsequenz liefert den Bezugswert für die rel. Ausgeprägtheit der Tonhöhe wegen (vermuteter) maximaler Akzentuierungswirkung durch den „passenden“ Zeigerton (dessen Tonhöhe sich die VP gut merken sollte); die Ausgeprägtheit der entsprechenden, im folgenden HKT herausge-

hört Tonhöhe, habe für die VP den Wert „100“ (Anker). Die relativ große Pause hat sich als günstig erwiesen, um sich das Gehör besser merken zu können. Den nächsten -verstimmten- Zeigerton sollte die VP quasi „nebenbei“ hören, ihn nicht besonders beachten. Der nun folgende HKT sollte „sehr aufmerksam“ gehört werden. Die VP war hier aufgefordert, einen relativen Wert für die Ausgeprägtheit der Tonhöhe zu vergeben, die sie sich eingangs gemerkt hat. Die nächste Sequenz konnte die VP durch Tastendruck abrufen.

Trotz des relativ schwierigen Versuchsablaufs, der von den VPen sehr hohe Konzentration erforderte, resultierten Werte der VP-Gruppe A mit erstaunlich geringen Streuungen. Abbildung 3 zeigt die für beide Basisfrequenzen zusammengefaßten Daten, nach Teiltönen aufgeteilt.

Unter der Annahme, daß die internen Tonhöhenabweichungen im HKT klein sind (s. dazu [1]) gegenüber den hier gemessenen Auswirkungen einer Zeigertonverstimmung auf die Ausgeprägtheit der Tonhöhe, ist festzustellen, daß die Daten für die rel. ATH für den 1. Teilton ($j=1$) ein breites Plateau bilden. Eine starke (4 HT) Verstimmung eines Zeigertons gegenüber der Nominalfrequenz hat nur einen minimal verschlechternden Einfluß auf die Heraus hörbarkeit dieser Tonhöhe. Der Grund dafür könnte die „Überlagerung“ von starker virtueller und spektraler Tonhöhe sein. Bereits beim 2. Teilton, und in etwas deutlicherer Ausprägung beim 3. und noch deutlicher beim 5. Teilton ist zu beobachten, daß die akzentuierende Wirkung bereits bei einer Zeigerton-Verstimmung um einen Viertelton gegenüber der nominellen Teiltonfrequenz im Mittel um ca. 10 bis 20 % nachläßt. Allerdings ist auch bei optimalen Bedingungen für die Hörbarkeit der Tonhöhe beim 5. Teilton die rel. Ausgeprägtheit dieser Tonhöhe im Vergleich zu jener eines Sinustons so gering, daß Daten für $j \geq 5$ stark an Signifikanz in Bezug auf den Akzentuierungseffekt verlieren (s. dazu die Daten der ersten orientierenden Experimente in Abb. 1 links).

5. Schlußbemerkung

Es wurde gezeigt, daß die Ausgeprägtheit einer Spektraltonhöhe durch die Wahl der physikalischen Parameter des Zeigertons beeinflusst werden kann. Als relativ unkritisch erwiesen sich Pausendauer zwischen Zeigerton und Testschall sowie die Dauer des Zeigertons (falls sie größer ist als 200 ms). Einer Frequenzverstimmung eines Zeigertons sollte jedoch insbesondere bei Experimenten, die z.B. „mit einem Zeigerton auf eine Tonhöhe deuten“, deren Ausgeprägtheit gemessen werden soll, Beachtung geschenkt werden. Sie darf die o.a. Werte nicht überschreiten.

Der Verfasser dankt allen Versuchspersonen, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl, sowie Herrn Dipl.-Ing. J. Chalupper für die Durchführung eines Teils der Hörversuche.

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204 „Gehör“ München gefördert.

Literatur

- [1] Terhardt, E., Akustische Kommunikation, Berlin [u.a.]: Springer, 1998.
- [2] Chalupper, J., Schmid, W., Akzentuierung u. Ausgeprägtheit von Spektraltonhöhen bei harmonischen Komplexen Tönen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Dt. Ges. f. Akustik e.V. Oldenburg, 357-358 (1997).
- [3] Baumann, U., Über die Hörbarkeit einzelner Teiltöne in Melodien aus harmonisch-komplexen Klängen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'94, Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 1017-1020 (1994).
- [4] von Helmholtz, H., Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik, Georg Olms Verlagsbuchhandlung Hildesheim, 1968. (Reprograf, Nachdruck der 6. Aufl., Braunschweig 1913).
- [5] Schmid, W., Chalupper, J., Spektraltonhöhen Komplexer Töne: Psychoakustische Experimente und Berechnung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe, DAGA 98 (in diesem Band).
- [6] Zwicker, E., Fastl, H., Psychoacoustics, Facts and Models, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1990.
- [7] Hellbrück, J., Hören, Göttingen, Hogrefe, 1993.
- [8] Fastl, H., Pitch strength of pure tones. In: Proc. 13. ICA Belgrade, Vol. 3, 11-14 (1989).

³ Die maximale, im Experiment nutzbare Verstimmung nimmt mit zunehmender Teilton-Nummer ab! (vgl. Abb. 3). Bei Mißachtung der Restriktion wäre die Zuordnung „verstimmter Zeigerton → Teilton“ nicht mehr eindeutig.