

Spektraltonhöhen Komplexer Töne: Psychoakustische Experimente und Berechnung der Ausprägtheit der Tonhöhe

W. Schmid, J. Chalupper

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München

1. Einführung und Übersicht

Einzelne Spektraltonhöhen, korrespondierend mit den Sinustönen eines per Teiltonsynthese erzeugten Komplexen Tons (KT) lassen sich unter bestimmten Umständen, insbesondere bei Förderung der „analytischen Tonhöhenwahrnehmung“ durch Lenkung der Aufmerksamkeit [1] neben der „Haupttonhöhe“ des KT mehr oder weniger deutlich wahrnehmen. In der vorliegenden Arbeit wird diese Deutlichkeit gemessen als „Ausprägtheit der Tonhöhe“ [2].

Vorgestellt werden Daten, die aus einem psychoakustischen Experiment mit spezieller Schallabfolge resultieren und anschließend ein einfacher Ansatz, der erlaubt, mit relativ guter Genauigkeit die Ausprägtheit der gemessenen Spektraltonhöhen „voraus-“zube-rechnen.

2. Psychoakustische Experimente

An den Hörversuchen nahmen acht Versuchspersonen teil (24-39 J., Median 26 J.). Alle waren in Hörversuchen geübt und mittels geeigneter Vorexperimente ausgewählt hinsichtlich ihrer Fähigkeit, „analytisch“ zu hören, d.h. hier: Spektraltonhöhen „herauszuhören“ und Tonhöhenabgleiche durchzuführen. (Schalle: digital synthetisiert, Teiltonphasenlagen der KT jeweils 0°, gaußförmige Hüllkurve mit $T_{0,0}=30\text{ms}$; Basisfrequenzen bzw. Frequenzen des tiefsten Teiltons bei GKT: 110, 370, 820 Hz, alle Teiltöne gleicher Pegel. Gesamtpegel: 60dB. Darbietung wie in [9], monotonisch.). Harmonischer Komplexer Ton (HKT): 6 Teiltöne; Residualklang (RK): wie HKT, jedoch fehlen Teilton 1 und 2; Gering harmonischer Komplexer Ton (GKT): Frequenzen so gewählt, daß „Gewichte“ [3] der tiefsten Virtuellen Tonhöhen, sowie Teiltonschwörungen minimal sind und die Auflösbarkeit der Teiltöne gegeben ist.

2.1. Ausprägtheit der Tonhöhe

Eine Kombination von Größenschätzung mit Ankerschall und Tonhöhenabgleich ermöglicht, mit großer Sicherheit zu gewährleisten, daß der jeweils „richtige“ Teilton hinsichtlich der Ausprägtheit seiner Tonhöhe beurteilt wurde:

Die VP hört zuerst zweimal ein Anker-Testschallpaar. (Schalldauern: 1,2 s, Pausendauern: 0,8 s). Anker ist ein Sinuston (50 dB); seine Frequenz entspricht derjenigen des zu beurteilenden Teiltones; der Anker „zeigt“ also (wg. Tonhöhenverschiebungen innerhalb des KT nur näherungsweise) auf einen Teilton [4]. Anschließend wird der Testschall 90 Sekunden lang als Dauerschall dargeboten. In dieser Zeit regelt die VP die Frequenz des Ankertons auf genau die Tonhöhe des Teiltons (im Testschall) ein. Danach erst bewertet sie die Ausprägtheit der Tonhöhe des Teiltons relativ zu derjenigen des Ankerschalls. Die VP kann dabei so oft sie will zwischen Test- und Ankerschall umschalten, sie ist keinem Zeitdruck ausgesetzt. Sie ruft dann per Tastendruck die nächste Sequenz ab. Eine Bewertung wurde als gültig eingestuft, wenn der eingeregelt Vergleichston weniger als einen musikalischen Ganzton von der Frequenz des zu beurteilten Teiltons abwich.

Ergebnisse zeigt Abb. 1 (Quadrat): Beim HKT und beim GKT nimmt die Ausprägtheit der Tonhöhe mit wachsender Teiltonnummer ab. Bemerkenswert ist, daß beim RK eine sehr geringe Ausprägtheit der Tonhöhe für die 1. und die 2. Teiltonnummer ermittelt wurde. Die Teiltöne 1 und 2 sind zwar im Spektrum nicht existent, jedoch müßten deutliche Virtuelle Tonhöhen wahrnehmbar gewesen sein. Die Daten eines weiteren Hörversuchs mit denselben Schallen aber anderem Ablauf erbrachten Werte für die rel. Ausprägtheit der Tonhöhe für die 1. bzw. die 2. Teiltonnummer von ca. 30 bzw. ca. 40 %. Diesmal „zeigte“ der Ankerton zuerst nicht jeweils auf einen (physikalisch präsenten) Teilton, sondern die VPen konnten bei randomisierter Startfrequenz des Sinus-Vergleichstons den Einregelvorgang völlig frei durchführen. Die mit dieser zweiten Prozedur ermittelten Werte zeigen nun das Vorhandensein von Virtuellen Tonhöhen, die zu den Teiltonnummern 1 und 2 passen. Dies steht wiederum in gutem Einklang mit berechneten Werten für Spek-

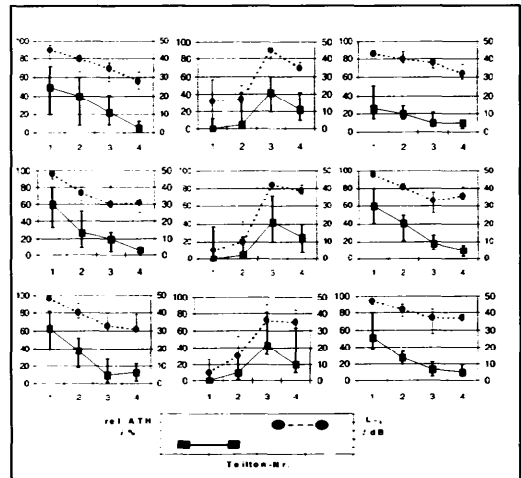


Abb. 1: Rel. Ausprägtheit der einzelnen Tonhöhen Komplexer Töne und Pegel L_{TV} der gleichlauten und gleichhohen Vergleichstöne (s. Text) in Abhängigkeit der Teiltonnummer.

Links: HKT; Mitte: RK; rechts: GKT.

Basisfrequenzen: ob.: 110 Hz; Mi.: 370 Hz; unt.: 820 Hz.

traltonhöhen-gewichte [3] und mit Frequenztonhöhen-Histogrammen. Offenbar fördert diese anfängliche Zeigerwirkung das „analytische Hören“ der Spektraltonhöhen so sehr, daß Virtuelle Tonhöhen nahezu nicht mehr wahrgenommen werden.

Festzuhalten bleibt, daß die zuerst genannte Versuchsmethode in ausgezeichneter Weise dazu geeignet ist, Spektraltonhöhen zu untersuchen. Verwechslungen mit Virtuellen Tonhöhen scheinen aufgrund des beschriebenen Befundes sehr unwahrscheinlich.

2.2. Pegel des Vergleichstons

Die Lautheit eines Sinustons kann bei simultaner „Stör“-Schalldarbietung deutlich reduziert werden. Als Maß für diese gedrosselte Lautheit [5] kann der Pegel eines gleichlaut eingestellten Sinustons dienen (s. z.B. [6]). Für einen Teilton eines KT bedeutet dies, daß seine Lautheit von den jeweils anderen Teiltönen gedrosselt werden kann.

Anstelle des oben beschriebenen Tonhöhenabgleichs führten nun dieselben Versuchspersonen bei den o.g. KTen einen Lautheitsabgleich mit dem Vergleichssinuston durch. Die Frequenzen des teilton-spezifischen Vergleichstons wurden aus dem arithmetischen Mittel der VP-individuell im ersten Experiment ermittelten Frequenzen gewonnen. Resultat sind Werte für den „Pegel L_{TV} des gleichlauten Sinustons, der die gleiche Tonhöhe besitzt, wie der zu beurteilende Teilton“.

Ergebnisse zeigt Abb. 1 (runde Symbole). Über den Teilton-Nummern aufgetragen haben die Pegelwerte L_{TV} nahezu denselben Verlauf wie jene der Ausprägtheit der Tonhöhe. Insbesondere war die Spektraltonhöhen ablangt, weisen die L_{TV} -Werte recht geringe Streuungen auf. Erwartungsgemäß größer sind sie wegen bekannter interindividueller „Hör-Präferenzen“ (Spektraltonhöhen/Virtuelle Tonhöhen) bei Virtuellen Tonhöhen des RKs. Obwohl die VPen berichteten, die Bewertung der GKT falle ihnen schwerer als die der HKT oder RK, sind die Streuungen der Meßwerte nicht größer.

¹ korrekter wäre hier die Formulierung „wie das zu beurteilende auditive Objekt“, da eine VT keine direkte Entsprechung im Teiltonspektrum besitzt.

Tabelle 1: Übersicht über die Rechenverfahren

Berechnung	EingangsgröÙe(n)	repräsentiert durch	AusgangsgröÙe(n)	repräsentiert durch	Berechnungsstrategie / Algorithmus	Bemerkung
Lautheit von Testton (T) und Störschall/Maskierer (M)	T ----- M	(Terz-)Pegel, Frequenz ----- (Terz-) Pegel-Spektrum	spezifische Lautheits-Tonheits-Muster von T und M	N _T (z) ----- N _M (z)	Lautheitsberechnung nach DIN 45631 [7]	Berechnung basiert auf Terzpegel
gedroselte Lautheit des Testtons	tonheits-spezifische Lautheit von T und M	N _T (z) ----- N _M (z)		N _{PT} (z)	Zwicker 1963 [5] mit Näherungsverfahren: Zwicker 1987 [8]	Veränderungen des Verfahrens durch (u.a.) Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit des Verdeckungsmaßes a _v
Pegel eines zum gedroselten Testton gleichlauten und gleichfrequenten Sinustons	1. Schritt: gedroselte Lautheit von T 2. Schritt:	N _{PT} (z) ----- L _{TV} (f _T)		L _{TV} (f _T)	Kurven gleicher Lautheit [11] ----- Korrektur bzgl. Teiltondiskrimination: s. Text (1)	
rel. Ausprägtheit der Tonhöhe des gedroselten Teiltons	Pegel und Frequenz des Vergleichstons	L _{TV} (f _T)	rel. ATH von T	ATH _{rel} (f _T)	Regressionskurve, gebildet aus den experimentell ermittelten Wertepaaren von ATH- u. L _{TV} (siehe auch [9])	„Pegel des Ankertons spielt keine Rolle“ (2)

3. Berechnungsverfahren

Wegen der gefundenen Abhängigkeiten zwischen ATH und Pegel L_{TV} für jeden einzelnen Teilton, liegt es nahe, ein zweiteiliges Rechenschema zur Ermittlung der rel. ATH zu entwickeln. Im ersten Teil wird über die gedroselte Lautheit des Testtons der Wert für L_{TV} ermittelt. Im zweiten Teil wird versucht, die gemessenen Werte für die ATH rechnerisch zu gewinnen. Die Auftrennung empfiehlt sich aus deswegen, weil jeder Funktionsblock getrennt optimiert werden kann. (u.a. in Experimenten mit anderen Testschall(T)-/Störschall(M)-Kombinationen). Von dem umfangreicheren Rechenmodell sind (aus Platzgründen) in Tabelle 1 nur die Funktionsblöcke und Signalverarbeitungsprinzipien zusammengestellt, die geeignet sind, die gewonnenen Daten unter den Versuchsbedingungen, die oben beschrieben sind, mathematisch nachzuvollziehen². Hierzu einige Erklärungen: ad (1): Da das gewählte Lautheitsberechnungsverfahren nicht für die Berechnung „selektiver“ Lautheiten von Teiltonen gedroselter Töne optimiert wurde. (Terzpegelspektrum!), resultieren je nach Art der spektralen Lage der Teiltonen Pegel L_{TV}, die von den experimentell ermittelten Werten abweichen. Der Funktionsblock ermittelt den nächstliegenden Teilton im „Störschall“ und berechnet in Abhängigkeit dieses Abstandes eine Dämpfung für L_{TV}. Diese Dämpfung (bzw. Gewichtsfunktion) leitet sich (pragmatischerweise) ab aus Messungen zur Teiltondiskrimination [10].

$$g = 1 - e^{-(x+0.002)} \quad \text{mit } x = \Delta f / \Delta f_{\text{min}}(f_T) - 1$$

(Δf: Teiltonabstand; Δf_{min}(f_T) Teiltondiskriminationsschwelle). ad (2): Viele Experimente [13, 14] belegen, daß die rel. Ausprägtheit der Tonhöhe eines lautheitsgedroselten Testtons nicht vom Pegel des Ankertons abhängt³. Er kann deswegen hier für die weitere Berechnung außer acht gelassen werden.⁴ Bsp.: rel. ATH_T sei 40. Das bedeutet: die rel. ATH des Testtons beträgt 40% derjenigen des auf gleiche Tonhöhe eingestellten Ankerschalls, der beliebigen Pegel haben kann.

4. Ergebnisse

Die im Hörversuch gemessenen und berechneten Werte für die rel. ATH stimmen in fast allen Fällen sehr gut überein. Dies gilt auch für die GKTe. Erwartungsgemäß treten aber wegen der verwendeten Terzfilterstruktur größere Abweichungen u.a. dann auf, wenn Teiltonfrequenzen große Frequenzabstände zur nächsten Filtermittelfrequenz aufweisen. Andererseits wurde das Rechenmodell anstelle von komplexen Tönen auch mit Rauschen als drosselndem Schall

getestet (Rauschen gem. [G], unmod. Testtöne) und lieferte auch hier mit Abweichungen von 10 bis 20 % die mit VPen gewonnenen Daten.

5. Zusammenfassung

Dieses Rechenschema (mit all seinen Vereinfachungen, Plausibilitätsüberlegungen und Unvollkommenheiten einerseits, relativ guten bis sehr guten Resultaten andererseits) möchten die Autoren als Diskussionsbeitrag für weitere Überlegungen zum Thema „Ausprägtheit der Tonhöhe“ verstanden wissen.

➤ Aus den Meßdaten läßt sich jedoch ableiten, daß die Ausprägtheit der Tonhöhe einer Spektraltonhöhe eines komplexen Tons von der wahrgenommenen Lautheit des betreffenden Teiltons abhängt, jedoch eine (zusätzliche) spektrale Gewichtung⁵ erfährt.

Die Verfasser danken den Versuchspersonen, Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für hilfreiche Anmerkungen und Herrn Dipl.-Ing. D. Födlmeier für Konstruktion und Programmierung des Systems für Tonhöhenabgleiche.

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] Fastl, H., and Stoll, G., Scaling of pitch strength. Hearing Research 1, 293-301 (1979). [3] Terhardt, E., Calculating virtual pitch. Hearing Research 1, 155-182 (1979). [4] Schmid, W., Akzentuierende Wirkung von „Zeitertönen“ auf Spektraltonhöhen komplexer Töne. DAGA 98 (in diesem Band). [5] Zwicker, E., Über die Lautheit von ungedroselten und gedroselten Schallen. Acustica 13, 194-211 (1963). [6] Deuter, K., Gedroselte Lautheit bei tiefen, mittleren und hohen Frequenzen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'88. Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 577-580 (1988). [7] DIN 45631 (März 1991): Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum. Verfahren nach E. Zwicker. [8] Zwicker, E., Berechnung partiell maskierter Lautheiten auf der Grundlage von ISO 532 B. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'87. Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 181-184 (1987). [9] Chalupper, J., Schmid, W., Akzentuierung und Ausprägtheit von Spektraltonhöhen bei harmonischen komplexen Tönen. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Dt. Ges. f. Akustik e.V. Oldenburg, 357-358 (1997). [10] Plomp, R., The Ear as a Frequency Analyzer. J. Acoust. Soc. Am. 36, 1628-1636 (1964). [11] Zwicker, E., Fastl, H., Psychoacoustics, Facts and Models. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1990. [12] Fastl, H., Pitch strength of pure tones. In: Proc. 13. ICA Belgrade. Vol. 3, 11-14 (1989). [13] Schmid, W., Zur Ausprägtheit der Tonhöhe gedroselter und amplitudenmodulierter Sinustöne. In: Fortschritte der Akustik, DAGA 97, Dt. Ges. f. Akustik e.V. Oldenburg, 355-356 (1997). [14] Hesse, A., Zur Ausprägtheit der Tonhöhe gedroselter Sinustöne. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '85. Verl.: DPG-GmbH, Bad Honnef, 535- 538 (1985).

² darüberhinausgehende Berechnungsschritte sind u.a.: Berücksichtigung von unterschiedlicher Frequenz von Ankerschall und Test-(Teil-)Ton durch spektrale Gewichtung, kontin. Übergang zum ungedroselten Testton.

³ Messungen der rel. ATH mit sehr kleinen Ankerpegel stehen noch aus!

⁴ findet aber sehr wohl bei (hier nicht beschriebenen) Berechnungsschritten zur ATH von ungedroselten Tönen Beachtung.

⁵ (Vgl. [12]; w.g. gleicher Frequenz von Ankerton und Teilton tritt sie hier nicht in Erscheinung.)