Ein Modell der Ausgeprägtheit der Tonhöhe in Theorie und Praxis

Markus Fruhmann

AG Technische Akustik, Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, TU München, E-Mail: fruhmann@ei.tum.de

Einleitung

Die psychoakustische Größe "Ausgeprägtheit der Tonhöhe" (AdT) [1] beschreibt die Deutlichkeit der Tonhöhe eines Schalls in Form einer globalen Empfindungsgröße. Sie ist dabei eng verwandt mit der Größe "Tonhaltigkeit", welche einzelne Schallkomponenten entsprechend ihrem Hervortreten aus dem Gesamtschall bewertet [2].
Aus zahlreichen Untersuchungen zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe gingen Merkmale dieser Wahrnehmung hervor, die in ein Modell zur Beschreibung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe einfliessen. Dieser Artikel stellt diese Merkmale und das gebildete Modell vor. Anschließend werden berechnete Daten Versuchsergebnissen zur Ausgeprägtheit der Tonhöhe gegenübergestellt.

Merkmale der AdT

Tabelle 1 zeigt für verschiedene Schalle diejenigen Größen, die zur qualitativen Beschreibung der Ausgeprägtheit der Tonhöhe verwendet werden können.

Signal	f_0	Δf	N_T	N_N	AM	FM
Sinus	X	O	X	O	O	O
AM-Sinus	X	O	X	O	X	O
FM-Sinus	X	O	X	O	O	X
harm. kompl. Ton	X	X	X	X	O	O
Bandpassrauschen	X	X	X	X	X	X
Residualklang	X	X	X	X	O	O

Tabelle 1: *Zusammenfassung der charakterisierenden Merkmale verschiedener Schallarten bezüglich der Wahrnehmung Ausgeprägtheit der Tonhöhe.*

Diese Merkmale beschreiben physikalische Schallgrößen: die spektrale Lage f_0, Bandbreite Δf sowie Amplituden- und Frequenzmodulationen. Diese können aufgrund aufgeprägter Modulation oder des statistischen Charakters von Rauschen entstehen. Darüberhinaus wird über die Lautheit der zu bewertenden Komponente N_T sowie des Schallanteils, der die Wahrnehmbarkeit der Tonhöhe stört N_N auf psychoakustische Größen zurückgegriffen.

Ein Modell der AdT

Ein Modell der Ausgeprägtheit der Tonhöhe muß die in Tabelle 1 aufgeführten Merkmale geeignet miteinander verknüpfen. Die dabei zu durchlaufenden Bearbeitungsschritte sind in Abbildung 1 als Blockschaltbild dargestellt.
Über eine gehörgerechte Spektraltransformation mithilfe der Fourier-t-Transformation [3] und nachfolgender Extraktion virtueller und spektraler Tonhöhen [4, 5] wird die Vorverarbeitung des zu bewertenden Schalls über etablierte Verfahren realisiert. Ein modifiziertes Verfahren entsprechend [6, 7] dient der Transformation in die Lautheit. Weitere Gewichtungen W aufgrund der psychoakustischen Größen Gesamtlautheit (W_N), Rauhigkeit W_R und Schwankungsstärke (W_F), Grundfrequenz (W_{f_0}) und Bandbreite (W_{BW}) führen zu dem Zusammenhang:

$$AdT \sim W_N \cdot W_{BW} \cdot W_F \cdot W_R \cdot W_{f_0} \cdot \frac{N_T}{N_N}$$

Dies stellt ein gewichtetes Verhältnis der Lautheit der zu bewertenden tonalen Komponente N_T und des Gesamtschalls N_N dar. Die Komponente, deren Lautheit über N_T beschrieben wird stellt dabei den Signalanteil dar, der der wahrgenommenen Tonhöhe zuzuordnen ist. Dieser ist, abgesehen von Verschiebungseffekten, über die Grundfrequenz f_0 bestimmt und wird im Folgenden als "Signalanteil" bezeichnet. Dieser wird als sinusartig angenommen und seine Lautheit wird über einen Sinuston entsprechender Frequenz und entsprechenden Pegels angenähert. Effekte gedrosselter Lautheit finden dabei keine Berücksichtigung.
Die psychoakustischen Größen Schwankungsstärke und Rauhigkeit werden über etablierte Verfahren und Modelle entsprechend [8] angenähert und in die entsprechenden Gewichtsfunktionen übergeführt. Als Maß der Bandbreite eines rauschhaften Signals wird die Standardabweichung des zur Grundfrequenz zu zählenden Maximums im Lautheits-Tonheits-Zeit Muster genutzt.

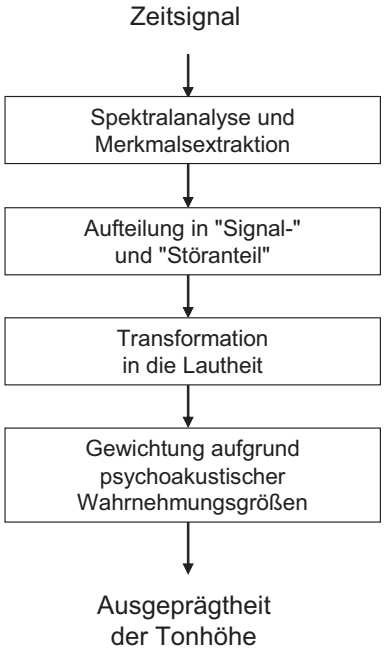

Abbildung 1: *Blockschaltbild des Modells der AdT.*

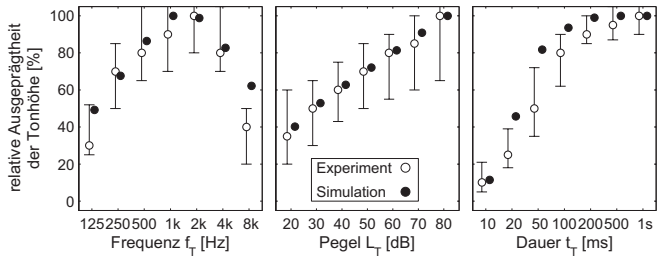

Abbildung 2: *Versuchsergebnisse und Simulation der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von Sinustönen abhängig von Frequenz, Pegel und Dauer nach [9].*

Verifikation des Modells

Zur Beurteilung der Qualität des erstellten Modells werden nachfolgend einige Ergebnisse aus Hörversuchen mit den entsprechenden Berechnungen der Ausgeprägtheit der Tonhöhe verglichen.
Abbildung 2 zeigt zunächst die grundsätzlichen Abhängigkeiten der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von Sinustönen von deren Frequenz, Pegel und Dauer [9]. Diese können vom Modell qualitativ und auch quantitativ nachvollzogen werden. Die berechneten Werte liegen überwiegend innerhalb der Interquartilbereiche der Versuchsergebnisse und weichen lediglich für sehr kurze Schalldauern ($t_T <$ 100 ms) etwas von diesen ab.
Abbildung 3 zeigt Daten harmonisch komplexer Töne im Vergleich zu Berechnungen des Modells. Eine Erhöhung der Anzahl Harmonischer führt bei den Modellberechnungen analog zu den Versuchsergebnissen zu einer Abnahme der AdT, wobei die Eigenschaft geringerer Abnahme bei höheren Grundfrequenzen vom Modell qualitativ und quantitativ korrekt nachvollzogen wird.
Für harmonisch komplexe Töne mit bis zu vier entfernten untersten Harmonischen ist die Ausgeprägtheit der (virtuellen) Tonhöhe in Abbildung 4 dargestellt [10]. Die grundsätzliche Abnahme der Ausgeprägtheit der Tonhöhe mit zunehmender Anzahl entfernter Harmonischer sowie die geringere Abnahme bei steigender Grundfrequenz wird vom Modell korrekt nachvollzogen. Für die Grundfrequenzen $f_0 = 125$ bzw. 250 Hz liegen die berechneten Werte innerhalb bzw. nahe bei den Interquatrtilbereichen der Versuchsergebnisse. Für eine Grundfrequenz $f_0 = 500$ Hz wird jedoch eine zu geringe Abnahme der Ausgeprägtheit der Tonhöhe im Vergleich zu den experimentell ermittelten Daten berechnet.

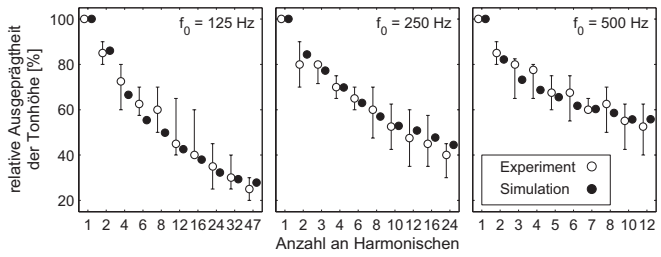

Abbildung 3: *Versuchsergebnisse und Simulation der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von harmonisch komplexen Tönen.*

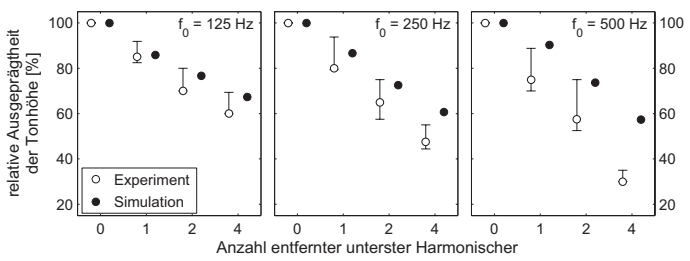

Abbildung 4: *Versuchsergebnisse und Simulation der AdT von harmonisch komplexen Residualtönen nach [10].*

Ausblick

Das eingeführte Modell der Ausgeprägtheit der Tonhöhe kann prinzipielle Abhängigkeiten dieser Wahrnehmungsgröße qualitativ und quantitativ nachvollziehen. Berechnete Daten für Sinustöne, harmonisch komplexe Töne und harmonisch komplexe Residualtöne zeigen identische Verläufe der Ergebnisse aus Hörversuchen und Simulation.
Im Vergleich zur "Tonhaltigkeit", wie sie beispielsweise in DIN 45 681 [2] beschrieben wird, bietet die Ausgeprägtheit der Tonhöhe den Vorteil, die Deutlichkeit der Tonhöhe eines Schalls als psychoakustische Größe wiederzugeben. Im Hinblick auf eine psychoakustisch korrekte Geräuschbeurteilung von Produktgeräuschen und Industrielärm kann die Ausgeprägtheit der Tonhöhe wichtige Impulse geben.

Danksagung

Der Autor dankt Prof. Dr.-Ing. H. Fastl für die Unterstützung der Forschungsarbeiten. Diese Arbeit wurde im Rahmen der Forschergruppe "Hörobjekte" FA 140/1 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literaturverzeichnis

[1] H. Fastl, G. Stoll: Scaling of Pitch Strength. Hearing Research **1** (1979) 293–301.

[2] DIN45681: Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen.

[3] E. Terhardt: Fourier Transformation of time signals: conceptual revision. Acustica **57** (1985) 242–256.

[4] E. Terhardt: Calculating Virtual Pitch. Hearing Research **1** (January 1979) 155–182.

[5] E. Terhardt, G. Stoll, M. Seewann: Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. JASA **71** (1982) 679–688.

[6] E. Paulus, E. Zwicker: Programme zur automatischen Bestimmung der Lautheit aus Terzpegeln oder Frequenzgrupppenpegeln. Acustica **27** (1972) 253–264.

[7] J. Chalupper, H. Fastl: Dynamic Loudness Model. Acta Acustica / Acustica **88** (2002) 378–386.

[8] E. Zwicker, H. Fastl: Psychoacoustics: Facts and Models. 2nd ed. Springer Verlag, 1999.

[9] H. Fastl: Pitch Strength of pure tones. 13th international congress on acoustics, Yugoslavia (1989) 11–14.

[10] M. Fruhmann, F. Kluiber: On the pitch strength of complete and incomplete harmonic complex tone. Fortschritte der Akustik - DAGA '05 (2005) 467–468.