

## DER WOHLKLANG: EINE FUNKTION VON SCHARFE, RAUHIGKEIT, KLANGHAFTIGKEIT UND LAUTHEIT

W. Aures

Lehrstuhl für Elektroakustik der Technischen Universität München

### 1. Einleitung

Aus früheren Untersuchungen der sensorischen Konsonanz /1/ und des Wohlklangs /2,3,4/ ist bekannt, daß der Wohlklang durch Rauigkeit, Schärfe, Lautheit und Klanghaftigkeit beeinflusst wird. Es wurden jedoch meist nur qualitative Angaben über deren Einfluß gemacht. Hier soll über Untersuchungen des quantitativen Zusammenhangs zwischen den elementaren psychoakustischen Empfindungsgrößen und dem Wohlklang berichtet werden. Zunächst folgen kurze Erklärungen der genannten Empfindungen:

Ein Schall wird als scharf empfunden, wenn er vorwiegend bei hohen Frequenzen Spektralanteile besitzt (z.B. Hochpaßrauschen). Ein fluktuierender Schall besitzt Rauhigkeit, wenn die Fluktuationen im Bereich zwischen 20 Hz und 300 Hz liegen (z.B. amplituden- oder frequenzmodulierte Schalle). Die Klanghaftigkeit ist ein Maß für den Anteil tonaler Spektralkomponenten in einem Schall (im Gegensatz zu einem Geräusch).

### 2. Meßmethode

Die untersuchten Schalle wurden so ausgewählt, daß eine große Variationsbreite hinsichtlich der 4 Empfindungsgrößen bestand. Es handelte sich dabei um Sinustöne und um Bandpaßrauschen mit den Bandbreiten 30 Hz und 1 kHz in 5 verschiedenen Frequenzlagen (500 Hz, 1kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz) und um Hochpaßrauschen ( $f_u = 2$  kHz). Diese Schalle wurden bei einer Modulationsfrequenz von 70 Hz mit 5 verschiedenen Modulationsgraden ( $m = 0$ ,  $m = 0,5$ ,  $m = 0,7$ ,  $m = 0,85$  und  $m = 1$ ) amplitudenmoduliert. Zusätzlich wurden harmonische Klänge, wie z.B. synthetisch erzeugte Vokale und Bandpaßklänge untersucht. Die Schalle wurden bei 4 verschiedenen Lautheiten (2, 7, 14 und 28 sone) dargeboten.

Die Meßmethode zur Bestimmung der psychoakustischen Empfindungsgrößen und des Wohlklangs war die Größenschätzung. Dabei mußten die Versuchspersonen in mehreren Meßreihen mit Hilfe von Ankerschallen die entsprechenden Empfindungen skalieren. Die Schalle wurden den VPn in einer schallgeschützten Meßkabine über Kopfhörer beidohrig dargeboten. Anker- und Testschall waren je 1 s lang, getrennt durch eine Pause von 0,8 s. Nach einer weiteren Pause von 1 s wurde das Schallpaar wiederholt. Die dargestellten Meßergebnisse sind Mittelwerte aus mehreren Meßreihen, an denen jeweils 8 VPn teilnahmen.

### 3. Abhängigkeit des Wohlklangs von den Empfindungsgrößen

Um den Zusammenhang zwischen dem Wohlklang und einer einzelnen Empfindungsgröße zu ermitteln, darf jeweils nur diese eine Größe geändert werden, während die anderen konstant gehalten werden. Da das jedoch im Experiment zum Teil nur sehr schwer zu realisieren ist, wurden die einzelnen Abhängigkeiten rechnerisch ermittelt. Zunächst wurde das für Schalle mit einer Lautheit von 14 sone durchgeführt.

Bei amplitudenmodulierten Schallen ändert sich im wesentlichen nur die Rauig-

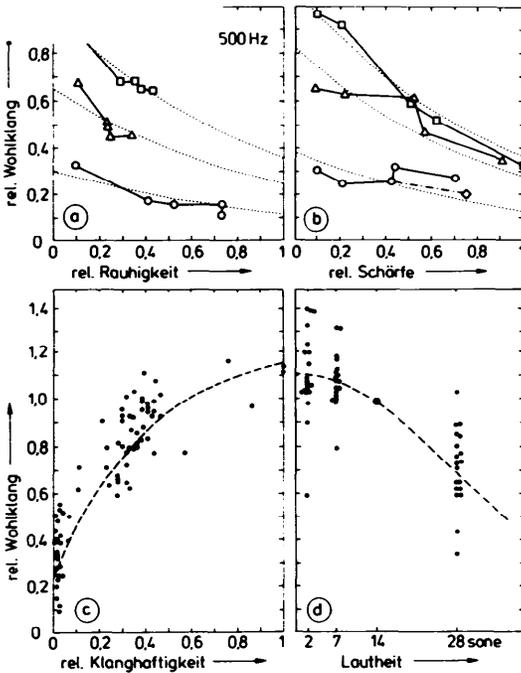


Abb. 1. Abhängigkeit des Wohlklangs von den Empfindungsgrößen. - Sinuston ( $\square$ ), BP-Rauschen ( $\Delta$ ),  $\Delta f = 1$  kHz ( $\circ$ ).

- a) Abhängigkeit von der Rauigkeit am Beispiel von  $f_m = 500$  Hz.  
 b) Abhängigkeit von der Schärfe.  
 c) Abhängigkeit von der Klanghaftigkeit.  
 d) Abhängigkeit von der Lautheit.

den Verlauf für die 3 dargestellten amplitudenmodulierten Schalle, wobei  $W(R=0)$  jeweils durch den minimalen quadratischen Abstand der Meßdaten von den Kurven bestimmt ist. Bezieht man die Abhängigkeit der Klanghaftigkeit vom Modulationsgrad in die Betrachtungen ein, so ergibt sich für die Abhängigkeit des relativen Wohlklanges von der relativen Rauigkeit  $W = W(R=0) \cdot e^{-0,7 R}$ .

Abb. 1b zeigt den Zusammenhang zwischen dem relativen Wohlklang und der relativen Schärfe. Die mit den durchgezogenen Linien verbundenen 5 Meßdaten beziehen sich jeweils auf die 5 verschiedenen Frequenzlagen (von links nach rechts aufsteigende Frequenzen, beginnend mit 500 Hz). Bei den eingetragenen relativen Wohlklangswerten wurde die Abhängigkeit des Wohlklangs von der Rauigkeit durch Division der Meßwerte für den Wohlklang durch die Funktion  $e^{-R}$  rechnerisch eliminiert. Die Abhängigkeit von der relativen Schärfe  $S$  läßt sich mit den in Abb. 1b gepunktet eingezeichneten Funktionen  $W = W(R=0, S=0) \cdot e^{-1,08 S}$  annähern.  $W(R=0, S=0)$  wurde ebenfalls durch den minimalen quadratischen Abstand der Kurven von den jeweiligen Meßdaten bestimmt. Da das 1 kHz breite Bandpaßrau-

keit mit dem Modulationsgrad, Schärfe und Lautheit bleiben annähernd konstant. Ein gewisser Einfluß der Amplitudenmodulation auf die Klanghaftigkeit ist zwar zu beobachten, soll aber zunächst unberücksichtigt bleiben. Abb. 1a zeigt die Abhängigkeit des Wohlklangs von der Rauigkeit am Beispiel von amplitudenmodulierten Sinustönen und Bandpaßrauschen bei 500 Hz. An der Abszisse ist die psychoakustisch gemessene relative Rauigkeit aufgetragen, an der Ordinate der relative Wohlklang. Die 5 Meßdaten jeder Kurve gehören zu den 5 verschiedenen Modulationsgraden (aufsteigend von links nach rechts, beginnend mit  $m = 0$ ). Die Rauigkeit steigt mit wachsendem Modulationsgrad, der Wohlklang nimmt mit steigender Rauigkeit (bzw. Modulationsgrad) ab. Anhand der Ergebnisse von 80 amplitudenmodulierten Schallen

wurde der Zusammenhang zwischen relativer Rauigkeit  $R$  und relativem Wohlklang  $W$  durch die Funktion  $W = W(R=0) \cdot e^{-R}$  angenähert. Die punktiert eingezeichneten Kurven in Abb. 1a zeigen

schen in den Frequenzlagen 4 und 8 kHz größere Klanghaftigkeit besitzt als die anderen Schalle, wurde die Schärfe des Hochpaßrauschens (Raute) zur Approximation der Beziehung zwischen Schärfe und Wohlklang verwendet.

In Abb 1c ist für 80 Schalle die Abhängigkeit des Wohlklangs von der Klanghaftigkeit dargestellt. Mit steigender Klanghaftigkeit  $K$  steigt auch der Wohlklang an. Die Abhängigkeit von Rauigkeit und Schärfe wurde durch die Division der Meßwerte für den Wohlklang durch die Funktion  $e^{-1,08 S} \cdot e^{-0,7 R}$  eliminiert. Die so berechneten Werte lassen sich durch die gestrichelt eingezeichnete Kurve  $(1,24 - e^{-2,43 K})$  annähern.

Die beschriebenen Abhängigkeiten des Wohlklangs von Rauigkeit, Schärfe und Klanghaftigkeit wurden bei der konstanten Lautheit von 14 sone gemessen. Die Lautheitsabhängigkeit ihrerseits hat den in Abb. 1d dargestellten Einfluß. Bei Lautheiten unter  $N = 14$  sone ist nur ein schwacher Einfluß auf den Wohlklang zu erkennen, der erst bei großen Lautheiten stärker wird. Die gestrichelte Kurve erhält man aus der Beziehung  $W = 1,125 \cdot e^{-(0,024 N)^2}$ .

Der Einfluß der Lautheit darf nicht isoliert von den anderen Empfindungsgrößen betrachtet werden. Der Lautheitseinfluß spiegelt ja in erster Linie die relativ starke Abhängigkeit des Wohlklangs vom Schallpegel wider. Rauigkeit und Schärfe sind aber ihrerseits ebenfalls pegelabhängig. Eliminiert man den Einfluß von Rauigkeit und Schärfe auf den Wohlklang, so hat man damit auch schon einen Großteil der Pegelabhängigkeit entfernt. Der verbleibende Rest äußert sich in der in Abb. 1d gezeigten Kurve.

Faßt man die geschilderten Einflüsse zusammen so ergibt sich ein aus den Meßdaten der Empfindungsgrößen berechneter relativer Wohlklang  $W'$

$$W' = 1,125 \cdot e^{-0,7 R} \cdot e^{-1,08 S} \cdot (1,24 - e^{-2,43 K}) \cdot e^{-(0,024 N)^2} \quad (1)$$

Die Korrelation zwischen dem psychoakustisch gemessenen und dem berechneten Wohlklang beträgt 96,1 %. Das bedeutet, daß für die untersuchten Schalle der Wohlklang tatsächlich im wesentlichen durch die Empfindungsgrößen Rauigkeit, Schärfe, Klanghaftigkeit und Lautheit bestimmt ist.

#### 4. Berechnung des Wohlklanges aus dem Schallsignal

Mit Hilfe von Modellen zur Berechnung der 4 Empfindungsgrößen wurde der Wohlklang aus dem Schallsignal bestimmt. Für die Lautheit wurde das Lautheitsberechnungsverfahren von Zwicker /5/ verwendet, und für die Schärfe ein in einigen Details modifiziertes Berechnungsverfahren nach v. Bismarck /6/.

Die Klanghaftigkeit ergibt sich mittels eines Verfahrens, das die hörbaren tonalen und schmalbandigen Komponenten eines Schalles ermittelt und in Abhängigkeit von Frequenzlage, Pegelüberschuß und Bandbreite aufaddiert. Diese Funktion wird dann mit dem Verhältnis der Lautheit des Geräuschanteiles des Schallspektrums (aus dem alle tonalen Komponenten entfernt wurden) zur Gesamtlautheit verknüpft. Im Berechnungsverfahren der Rauigkeit werden nach einer gehörbezogenen Filterung in 24 Frequenzgruppen die Hüllkurvenschwankungen der Erregung ermittelt. Aus den für die Rauigkeit relevanten Hüllkurvenschwankungen zwischen 20 und 300 Hz wird die Teilrauigkeit für die einzelnen Frequenzgruppen gebildet. Durch

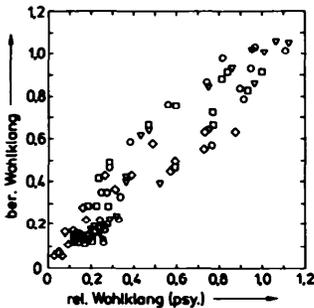
Verknüpfung der Teilrauhigkeiten ergibt sich die Gesamtrauhigkeit. In den psychoakustischen Daten wurden bisher nur relative Größen der Empfindungen betrachtet. Die Berechnungsverfahren liefern für die Bezugsschalle die in Tabelle I angegebenen absoluten Werte. Um die berechneten absoluten Empfindungs-

Empfindung	Schallgrößen	berechnete Empfindungs-Werte
Rauhigkeit	$f_{Tr}=1$ kHz, $f_{mod}=70$ Hz, $m=1$ , $N=14$ sone	1,28 asper
Schärfe	$f=8$ kHz, $N=14$ sone	9,6 acum
Klanghaftigkeit	$f=500$ Hz, $N=14$ sone	1
Lautheit	$f=1$ kHz, $L=40$ dB	1 sone

Tab. I. berechnete absolute Empfindungswerte für die Bezugsschalle der psychoakustischen Messungen und in Gl. (1).

größen in Gl. (1) verwenden zu können, müssen sie mit den in Tab. I angegebenen Bezugswerten normiert werden. Gl. (1) wurde so umgeformt, daß die Normierungsgrößen in die Konstanten der Exponenten mit einbezogen wurden. Der Wohlklang  $W_{ber}$  ergibt sich dann aus den absoluten Empfindungsgrößen zu

$$W_{ber} = c \cdot e^{-0,55 R} \cdot e^{-0,113 S} \cdot (1,24 - e^{-2,2 K}) \cdot e^{-(0,023 N)^2} \quad (2)$$



Es wird definiert, daß ein 1 kHz-Ton mit dem Pegel  $L = 60$  dB den Wohlklang  $W_{ber} = 1$  besitzen soll. Damit ergibt sich in Gl. (2) die Konstante  $c = 1$ . In Abb. 2 wird der mit Hilfe des Berechnungsverfahrens und Gl. (2) berechnete Wohlklang mit den psychoakustischen Meßdaten verglichen. Die Korrelation von 94,3 % zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Daten.

Abb. 2. Vergleich zwischen dem psychoakustisch gewonnenen und dem berechneten Wohlklang für 80 Schalle verschiedener Lautheit ( $N = 2$  sone ( $\nabla$ ), 7 sone ( $\circ$ ), 14 sone ( $\square$ ), 28 sone ( $\diamond$ )).

### Literatur

- 1/ Terhardt, E., Ein psychoakustisch begründetes Konzept der Musikalischen Konsonanz. *Acustica* 36, S. 121 (1976).
- 2/ Terhardt, E. und Stoll, G., Bewertung des Wohlklangs verschiedener Schalle. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '78, VDE-Verlag, Berlin, S. 519 (1978).
- 3/ Terhardt, E. und Stoll, G., Skalierung des Wohlklangs (der sensorischen Konsonanz) von 17 Umweltschallen und Untersuchung der beteiligten Hörparameter. *Acustica* 48, S. 247 (1981).
- 4/ Aures, W., Wohlklangsbeurteilung von Kirchenglocken. In: Fortschritte der Akustik, DAGA '81, VDE-Verlag, Berlin, S. 733 (1981).
- 5/ Zwicker, E., Über psychologische und methodische Grundlagen der Lautheit. *Acustica* 8, S. 237 (1981).
- 6/ v. Bismarck, G., Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. *Acustica* 28, S. 159 (1974).