

Tonhaltigkeit – Stand der E DIN 45681 einschließlich weiterer Ergänzungen

Dirk Sagemühl, Lothar Schmidt

Bayer AG Leverkusen; Email: dirk.sagemuehl.ds@bayerindustry.de

Einleitung

Im Januar 1992 wurde der erste Entwurf der DIN 45681 „Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen.“ veröffentlicht. Im November erschien der zweite Entwurf dieser Norm, Einspruchsfrist für diesen Entwurf ist 30.4.2003.

Der neue Entwurf beinhaltet folgenden Änderungen und Ergänzungen, die weitgehend auf Untersuchungen von Pompetzki [1] zurückgehen, der 14 tonhaltige Geräuschbeispiele aus der täglichen Praxis des LUA Essen 114 Versuchspersonen (VP) zu Beurteilung vorlegte:

1. Einführung eines frequenzabhängigen Verdeckungsmaßes $a_v(f)$
2. Änderung der Tonzuschläge in Abhängigkeit von der Differenz des Tonpegels zum Pegel des verdeckenden Geräusches in der Frequenzgruppe um die Tonfrequenz
3. Reduzierung der Frequenzauflösung auf höchstens 4% anstatt 8% der Frequenzgruppenbreite
4. Einführung eines Iterationsverfahrens zur Berechnung des mittleren Schmalbandpegels in der Frequenzgruppe des Tones
5. Addition der Tonpegel bei mehreren Tönen in einer Frequenzgruppe
6. Anwendung des Verfahrens zur Tonhaltigkeitsbestimmung auf A- bewertete Spektren
7. Anwendung der Hanning-Korrektur bei Addition von zwei oder mehr Pegeln
8. Mittelung der Differenzen $?L_j$ mehrerer zeitlich aufeinanderfolgender Kurzzeitspektren bei schwankenden Tonfrequenzen
9. Einführung von Kriterien für die Ausprägtheit eines Tones (maximale Bandbreite und minimale Flankensteilheit).

Die Punkte 1 bis 7 wurden mit ihren Auswirkungen auf die zu vergebenden Tonzuschläge bereits auf der DAGA 2000 [2] und der internoise 2001 [3] vorgestellt, ein Vergleich zu den Tonzuschlägen, die nach der ISO/CD 1996-2 vergeben werden, wurde auf der DAGA 2002 [4] gezogen. An dieser Stelle sollen die Punkte 8 und 9 und zwei weitere Ergänzungen vorgestellt werden, die für den Weißdruck vorgesehen sind:

10. Einführung eines zusätzlichen Kriteriums, wann benachbarte Einzeltöne noch unterscheidbar sind
11. Die Eckfrequenzen der Frequenzgruppen von Tonfrequenzen oberhalb 500 Hz liegen geometrisch zur Tonfrequenz.

Ergänzungen im Normentwurf vom November 2002

Mittelung der Differenzen $?L_j$ mehrerer zeitlich aufeinanderfolgender Kurzzeitspektren bei schwankenden Tonfrequenzen

Bei nichtstationären Geräuschen, beispielsweise bei Windenergieanlagen, bei denen die Tonfrequenz schwankt, wird die Tonenergie bei den bisher vorgesehenen Mittelungszeiten über einen breiten Frequenzbereich „verschmiert“. Um auch in diesen Fällen eine treffendere Beurteilung zu erzielen, schreibt der Entwurf analog zur ISO/DIS 1996-2 [5] für Geräusche mit schwankenden Tonfrequenzen die Ermittlung von 12 zeitlich aufeinanderfolgenden Schmalband-Mittelungsspektren über einen Messzeit von jeweils 10 s vor. Die Differenz ΔL errechnet sich aus dem energetischen Mittelwert der 12 Differenzen ΔL_j , $j=1,12$. Diese Differenz ΔL entspricht der Differenz ΔL für stationäre Geräusche. Bei nichtstationären Geräu-

schen werden die Kriterien für die Ausprägtheit eines Tones (s. nächster Punkt) nicht angewendet.

Ob ein Geräusch stationär ist oder nicht, muss der Anwender entscheiden. Das im Entwurf abgedruckte VBA- Programm enthält eine entsprechende Abfrage. Es ist nicht gelungen, diese Entscheidung aus den Spektren selbst abzuleiten.

Im Entwurf sind als Beispiel eines nichtstationären Geräusches die Spektren einer drehzahlvariablen Windenergieanlage wiedergegeben. Für ein Spektrum mit einer Mittelungsdauer von 30 s wird kein Tonzuschlag vergeben, die Tonzuschläge der einzelnen 10 s Spektren bewegen sich zwischen 0 und 4 dB. Aus dem energetischen Mittel der Differenzen ΔL_j ergibt sich für den hörbaren Einzelton ein Zuschlag von 1 dB.

Einführung von Kriterien für die Ausprägtheit eines Tones (maximale Bandbreite und minimale Flankensteilheit)

Die Ausprägtheit (Deutlichkeit) eines auf Bandpassrauschen basierenden Tones im Verhältnis zu einem Sinuston mit einer Ausprägtheit von 100% hängt sowohl von der spektralen Bandbreite [6] (s. Bild 1) als auch von der Flankensteilheit [7] dieses Bandpassrauschens ab. Je größer die Bandbreite ist, desto geringer ist seine Ausprägtheit. Im Entwurf wurde diese Ausprägtheit auf mindestens 75% festgelegt. Daraus ergibt sich eine erforderliche Mindest-Flankensteilheit von 27 dB/Oktave.

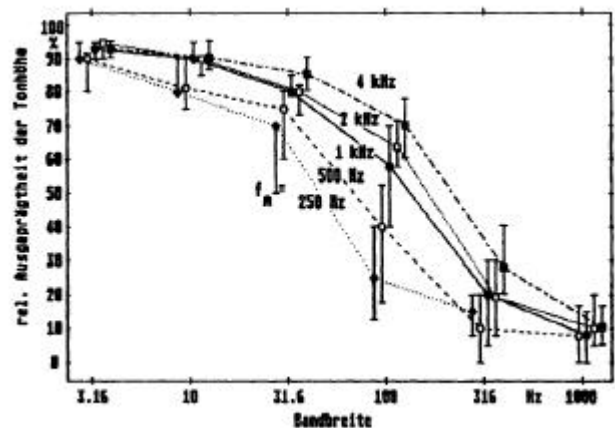


Bild 1: Ausprägtheit der Tonhöhe von Bandpass-Rauschen mit verschiedenen Bandbreiten bei Mittenfrequenzen f_m relativ zur Ausprägtheit der Tonhöhe eines Sinustones mit der Frequenz f_m [6]

Untersuchungen an einer Reihe weiterer Geräusche, die von Hellweg und Nobile [8] zur Entwicklung der Prominent Ratio Method der ANSI S1.13 [9] benutzt und für die Untersuchungen zur E DIN 45681 zur Verfügung gestellt wurden, haben gezeigt, dass dieses Kriterium zu scharf ist. Auf einen deutlich hörbaren Ton wurde von den VP ein Tonzuschlag von 4 dB vergeben; das VBA- Programm der E DIN 45681 erkannte diesen Ton (ebenfalls mit 4 dB Zuschlag) erst bei einer Ausprägtheit von 70%. Die Flankensteilheit beträgt dann 24 dB/Oktave. Im Weißdruck werden die entsprechenden Algorithmen angepasst.

Weitere Ergänzungen im Weißdruck 2003

Einführung eines zusätzlichen Kriteriums, wann benachbarte Einzeltöne noch unterscheidbar sind.

Im vorliegenden Entwurf wird um jeden gefundenen Ton die betreffende Frequenzgruppe gebildet und die Tonpegel aller weiteren Töne, die in dieser Frequenzgruppe auftreten, addiert. Die maximale Frequenzdifferenz zwischen den Tönen entspricht der halben Frequenzgruppenbreite. Dies entspricht auch dem Auflösungsvermögen des menschlichen Gehörs; liegen die Töne weiter auseinander, werden sie getrennt wahrgenommen und müssen auch getrennt beurteilt werden. Treten in einer Frequenzgruppe allerdings nur zwei Töne auf, so unterscheidet das Gehör im Frequenzbereich unter 1000 Hz wesentlich kleinere Tondifferenzen. Beide Zusammenhänge gehen aus Bild 2 hervor:

Die durchgezogene Linie repräsentiert die Frequenzgruppenbreite nach Zwicker als Funktion der Tonfrequenz, die gestrichelte Linie gibt an, wie groß der Unterschied der Tonfrequenzen sein darf, um vom Gehör wahrgenommen zu werden, wenn neben dem dominanten Ton mehrere weitere Töne in der Frequenzgruppe auftreten (die Kurve ist gemittelt zwischen den Abhängigkeiten von harmonischen und nicht harmonischen Tönen). Treten nur zwei Töne in einer Frequenzgruppe auf, so kann das Gehör Töne unterscheiden, deren Tonfrequenzdifferenz oberhalb der gepunkteten Linie liegt. In diesem Fall müssen diese beiden Töne auch getrennt beurteilt werden.

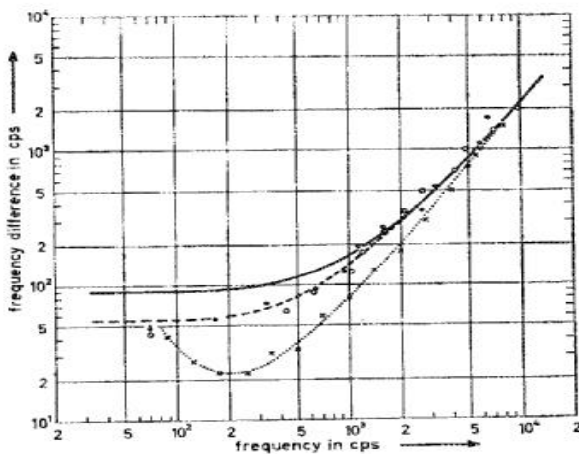


Bild 2: Hörbarkeitsgrenzen von Tonfrequenzdifferenzen mehrerer Töne (gestrichelte Kurve) und zweier Töne (gepunktete Kurve) im Vergleich zur Frequenzgruppenbreite nach Zwicker [10]

Die Verlauf der gepunkteten Kurve kann durch die folgende Gleichung (1) nachgebildet werden:

$$f_D = 21 \cdot 10^{1,2 \left[\lg \left(\frac{f_T}{212} \right) \right]^{1,8}} \quad (1)$$

Bei 1000 Hz geht diese Kurve in die halbe Frequenzgruppenbreite über. Diese Ergänzung ist in der ANSI S1.13 enthalten und soll im Weißdruck des Entwurfes als einschränkende Bedingung für die Addition der Tonpegel zweier Töne in einer Frequenzgruppe aufgenommen werden.

Die Eckfrequenzen der Frequenzgruppen von Tonfrequenzen oberhalb 500 Hz liegen geometrisch zur Tonfrequenz.

Die Frequenzgruppenbreite ist im Frequenzbereich unter 500 Hz nahezu konstant, oberhalb 500 Hz nimmt sie exponentiell zu. Die

ANSI S1.13 schreibt deshalb (allerdings für den gesamten Frequenzbereich) eine geometrische Aufteilung der Eckfrequenzen relativ zur Mittenfrequenz vor (analog zur Mittenfrequenz von Terzen und Oktaven). Die Gleichungen der unteren Eckfrequenz f_1 und der oberen Eckfrequenz f_2 als Funktion der Frequenzgruppenbreite Δf_c lauten für eine geometrische Aufteilung:

$$f_1 = 0,5 \left[-\Delta f_c + \sqrt{\Delta f_c^2 + 4f_T^2} \right] \quad (2)$$

$$f_2 = f_1 + \Delta f_c \quad (3)$$

Eine arithmetische Aufteilung im Frequenzbereich unter 500 Hz und eine geometrische Aufteilung oberhalb 500 Hz führt zu einer Unstetigkeit der Definitionen der Eckfrequenzen bei 500 Hz. Werden beide Eckfrequenzen f_1 bzw. f_2 der Frequenzgruppe um den Betrag Δf

$$\Delta f = 5 \cdot 10^{-7} f_T^2 + 2 \cdot 10^{-3} f_T - 0,5 \quad (4)$$

gegenüber der arithmetischen Aufteilung zu höheren Frequenzen hin verschoben, so ergeben sich für den Definitionsbereich der Tonfrequenz der E DIN 45681, also den Bereich oberhalb 100 Hz, die folgenden maximalen Abweichungen gegenüber der exakten arithmetischen bzw. geometrischen Aufteilung:

| Bereich: | arithmetisch | | geometrisch | |
|----------------------|--------------|------|-------------|------|
| Mittenfrequenz in Hz | 100 | 500 | 500 | 8000 |
| Abweichung in Hz | +0,3 | -0,7 | +2,6 | -2,1 |

Tabelle 1: Maximale Abweichungen der Eckfrequenzen bei kontinuierlichem Verlauf gegenüber den exakten Werten bei arithmetischer und geometrischer Aufteilung

Diese Abweichungen können als gering betrachtet werden, so dass Gl. (4) eine gute und stufenlose Näherung für den gesamten Frequenzbereich darstellt.

Literaturhinweise

- [1] Pompetzki, W.: Vergleich der Tonhaltigkeit nach DIN 45681 mit subjektiven Bewertungen, DAGA '98, 224-225
- [2] Sagemühl, D.: Überarbeitung der E DIN 45681 (Tonhaltigkeit), DAGA '01, 482-483
- [3] Sagemühl, D. und Schmidt, L.: Revision of E DIN 45681 (Tonality), interneise '01, 2665-2070
- [4] Sagemühl, D. und Schmidt, L.: Behandlung der Tonhaltigkeit unter Berücksichtigung der E DIN 45681, DAGA '02, 122-123
- [5] ISO/CD 1996-2 (2001): Acoustics - Descriptions, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of environmental noise levels
- [6] Wiesmann, N. und Fastl, H.: Ausgeprägtheit der Tonhöhe und Frequenzunterschiedsschwellen von Bandpass-Rauschen, DAGA '91, 505-508
- [7] Zwicker, E. und Fastl, H.: Psychacoustics - Facts and Models, Springer 1999
- [8] Hellweg, R.D., und Nobile, M.A.: Modification to procedures for determining prominent discret tones, interneise 2002
- [9] ANSI S1.13 (1999): Measurement of Sound Pressure Levels in Air
- [10] Plomb, R.: The ear as a frequency analyzer, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 36, 1964, 1628-1636