

Tonhaltigkeit - Erläuterungen zum Weißdruck der DIN 45681

Lothar Schmidt¹, Dirk Sagemühl²

¹ Bayer Industry Services, 41538-Dormagen, Email: lothar.schmidt.ls@bayerindustry.de

² Bayer Industry Services, 41538-Dormagen, Email: dirk.sagemuehl.ds@bayerindustry.de

Einleitung

Im Januar 1992 wurde der erste Entwurf der DIN 45681 „Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen“ veröffentlicht [1]. Im November 2002 erschien der zweite Entwurf [2] mit zahlreichen Änderungen und Ergänzungen; darüber wurde auf der DAGA 2003 berichtet. Der in 2004 verabschiedete und im März 2005 erschienene Weißdruck [3] beinhaltet ebenfalls eine Reihe von Änderungen und Ergänzungen, die auf den Kommentaren zur letzten Entwurfsfassung beruhen; außerdem wurden neben den 12 tonhaltigen Geräuschbeispielen von Pompetzki [4] weitere 24 Geräuschbeispiele von Piorr [5] sowie Piorr und Klug [6] (insbesondere auch Geräusche von Windenergieanlagen, WEA) ausgewertet.

Weiterentwicklung im Weißdruck März 2005

Es gibt keine unterschiedlichen Verfahren mehr für stationäre und nicht stationäre Geräuschen. In dem gemeinsamen Verfahren werden mehrere zeitlich versetzte Schmalband-Mittelungsspektren über eine Messzeit von jeweils etwa 3 Sekunden berücksichtigt.

In den Entwürfen von 1992 und 2002 wird für stationäre Geräusche eine Mittelungszeit von mindestens 30 s gefordert; im Entwurf 2002 wird zusätzlich für instationäre Geräusche (z.B. bei WEA) die Mittelung von 12 aufeinander folgenden Analysen über jeweils 10 s gefordert. Auf Grund von Einwänden und Kommentaren zum letzten Entwurf wurden weitere, umfangreiche Untersuchungen mit vielen neuen Geräuschbeispielen, insbesondere auch solche von drehzahlvariablen WEA mit Mittelungszeiten zwischen 1s und 10 s durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die energetische Mittelung von 12 Spektren mit je 3 s Mittelungszeit die geringsten Abweichungen der berechneten Tonzuschläge zu den von Versuchspersonen vorgegebenen Tonzuschlägen ergab. Geringere Mittelungszeiten führen zu ungerechtfertigten Tonzuschlägen (typisch zu hoch). Bei längeren Mittelungszeiten werden schwankende und kurzzeitige Töne verwischt.

Die Mittelung über 12 Spektren wird grundsätzlich auch auf stationäre Geräusche angewendet. In Ausnahmefällen kann die Bestimmung des Tonzuschlages auf weniger als 12 Einzelspektren beruhen. Dann ist jedoch eine explizite Unsicherheitsbetrachtung erforderlich.

Präzisierung ungenauer Aussagen, robustere (weniger fehleranfällige) Rechenalgorithmen

- Einschränkung der Frequenzauflösung auf den Bereich $1,9 \text{ Hz} \leq \Delta f \leq 4,0 \text{ Hz}$

Im Entwurf 2002 wird die Frequenzauflösung (d.h. der Linienabstand) auf $\Delta f \leq 4\%$ der Frequenzgruppenbreite festgelegt. Beginnt der Analysierbereich bei 100 Hz, bedeutet dies $\Delta f \leq 4 \text{ Hz}$, beginnt der Analysierbereich aber z.B. erst bei 1000 Hz, gilt danach $\Delta f \leq 6,5 \text{ Hz}$. Bei der Anwendung des Entwurfes von 2002 hat sich gezeigt, dass der Linienabstand einen erheblich größeren Einfluss auf das Ergebnis hat als bis dahin angenommen. Dies gilt insbesondere bei sehr kleinen Linienabständen.

- Die Anzahl der zum mittleren Schmalbandpegel beitragenden Linien muss rechts und links der Tonlinie mindestens 5 betragen

Im Entwurf 2002 ist die Mindestanzahl von Linien, die zum mittleren Schmalbandpegel beitragen, auf 10 festgelegt worden. Diese Festlegung kann in bestimmten Situationen zu unsinnigen Ergebnissen führen. Bleiben auf jeder Seite der zu untersuchenden Spektrallinie mindestens 5 Spektrallinien übrig, können diese Fehler vermieden werden. Die Festlegung auf jeweils 5 Spektrallinien zu beiden Seiten, die schon im Entwurf 1992 enthalten war, wurde wieder aufgenommen.

- Die Anwendung eines Hanning-Fensters ist normativ festgelegt

Eine weitere Präzisierung erfolgte durch die Festlegung auf die Verwendung des Hanning-Fensters. Dadurch werden Abweichungen in den Ergebnissen auf Grund der Verwendung eines Rechteck-Fensters oder anderer Fenster vermieden.

Berücksichtigung weiterer (psychoakustischer) Ergebnisse

Die ANSI S1.13 enthält zwei Festlegungen, über die bereits auf der DAGA 2002 berichtet wurde, sie sind in den aktuellen Weißdruck übernommen worden:

- Geometrische Aufteilung der Eckfrequenzen von Frequenzgruppen relativ zu den Mittenfrequenzen,

Die Eckfrequenzen f_1 und f_2 einer Frequenzgruppe mit der Frequenzgruppenbreite Δf_c relativ zur Tonfrequenz werden geometrisch aufgeteilt, d.h., aus der geometrischen Beziehung der Tonfrequenz f_T zu den Eckfrequenzen

$$f_T = \sqrt{f_1 f_2} \quad (1)$$

errechnet sich die untere Eckfrequenz f_1 zu

$$f_1 = \left(-\frac{\Delta f_c}{2} + \frac{\sqrt{(\Delta f_c)^2 + 4f_T^2}}{2} \right) \quad (2)$$

und die obere Eckfrequenz f_2 zu

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

- Einführung eines zusätzlichen Kriteriums, wenn benachbarte Einzeltöne noch unterscheidbar sind

Beim Auftreten von nur zwei Tönen in einer Frequenzgruppe unterhalb einer Tonfrequenz von 1000 Hz unterscheidet das menschliche Ohr wesentlich kleinere Frequenzdifferenzen f_D als die halbe Frequenzgruppenbreite, die entsprechende Beziehung lautet:

$$f_D = 21 \cdot 10^{1,2 \left[\lg \left(\frac{f_T}{212 \text{ Hz}} \right) \right]^{1,8}} \text{ Hz} \quad (4)$$

Bei 1000 Hz geht f_D in die halbe Frequenzgruppenbreite über.

Ergänzungen

- Erweiterung des Untersuchungsbereiches zu kleineren Frequenzen von 100 Hz auf 90 Hz

Der Gültigkeitsbereich der Norm wurde von 100 Hz auf 90 Hz erweitert. Damit ist der Anschluss an die DIN 45680 gegeben. Diese behandelt die Beurteilung tieffrequenter Geräusche bis 90 Hz für Immissionen innerhalb von Gebäuden auch hinsichtlich des Auftretens von Einzeltönen. Ihre Kriterien zur Bewertung der Tonhaltigkeit werden in der Praxis auch außerhalb von Gebäuden für die Beurteilung tieffrequenter Geräusche verwendet.

- Betrachtung der Unsicherheit der Differenz ΔL

Ein umfangreiches neues Kapitel ist der Berechnung der Unsicherheit gewidmet. Ausgangspunkt der Überlegungen war, dass die Unsicherheit der Differenz ΔL so klein sein soll, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der Tonzuschlag K_T um zwei Stufen zu niedrig vergeben wird, unter 1% liegt (dass also beispielsweise statt eines Tonzuschlages von 4 dB ein Tonzuschlag von 2 dB vergeben wird). Wird die Differenz ΔL mit einem Grad des Vertrauens von 90% ermittelt, folgt daraus, dass die Unsicherheit u den Wert von 1,4 dB nicht überschreiten darf. Die Betrachtung der Unsicherheit der Differenz ΔL ist dahingehend vereinfacht, dass die Kollektive der Schmalbandpegel, die zum Tonpegel bzw. zum verdeckenden Geräusch beitragen, als nicht von der Unsicherheit betroffen betrachtet werden.

Ausgehend von

$$\Delta L = L_T - L_S - 10 \cdot \lg \left(\frac{\Delta f_c}{\Delta f} \right) - a_V \quad (5)$$

und einer Standardabweichung aller Schmalbandpegel von einheitliche $\sigma_L = 3$ dB kann die Standardabweichung $\sigma_{\Delta L_j}$ der Differenz ΔL_j des Spektrums j wie folgt berechnet werden (a_V wird als frei von Unsicherheit angenommen):

$$\sigma_{\Delta L_j} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^K (10^{0,1L_{T,i}} / \text{dB})^2}{\left(\sum_{i=1}^K 10^{0,1L_{T,i}} / \text{dB} \right)^2} + \frac{\sum_{i=1}^M (10^{0,1L_{S,i}} / \text{dB})^2}{\left(\sum_{i=1}^M 10^{0,1L_{S,i}} / \text{dB} \right)^2} \right) \sigma_L^2 + \left(4,34 \cdot \frac{\Delta f}{\Delta f_c} \cdot \text{dB} \right)^2} \quad (6)$$

Dabei sind die $L_{T,i}$ die Pegel der $i = 1$ bis K Schmalbandpegel, die zum ausgeprägtesten Ton des Spektrums j beitragen, die $L_{S,i}$ die $i = 1$ bis M Schmalbandpegel, die zum mittleren Schmalbandpegel in der Frequenzgruppe des ausgeprägtesten Tones beitragen. Δf_{c_j} ist die zugehörige Frequenzgruppenbreite, Δf ist der Linienabstand des Spektrums.

Die Standardabweichung der mittleren Differenz ΔL der $j = 1$ bis L Spektren wird daraus mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$\sigma_{\Delta L} = \frac{\pm \sqrt{\sum_{j=1}^L \left[10^{0,1\Delta L_j / \text{dB}} \sigma_{\Delta L_j} \right]^2}}{\sum_{j=1}^L 10^{0,1\Delta L_j / \text{dB}}} \quad (7)$$

Die erweiterte Unsicherheit beträgt

$$u = k \sigma_{\Delta L} \quad (8)$$

Der Erweiterungsfaktor k beträgt bei einem Grad des Vertrauens von 90% bei zweiseitigem Vertrauensbereich $k = 1,645$.

Eine Vielzahl von Untersuchungen hat gezeigt, dass unter diesen Annahmen auch bei schwankenden Geräuschen die oben genannte Unsicherheit bei Auswertung von 12 Spektren in der Regel erreicht wird. Deshalb wird bei einer Mittelung über 12 Spektren keine explizite Betrachtung der Unsicherheit gefordert. Bei stationären Geräuschen reichen häufig schon 5 Spektren zur Erreichung der geforderten Unsicherheit aus. In diesem Fall soll jedoch eine explizite Unsicherheitsbetrachtung durchgeführt werden.

Literatur

- [1] E-DIN 45681:1992 Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, Beuth-Verlag 1992
- [2] E-DIN 45681:2002 Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, Beuth-Verlag 2002
- [3] DIN 45681:2005 Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen, Beuth-Verlag 2005
- [4] Pompetzki, W., Vergleich der Tonhaltigkeit nach DIN 45681 mit subjektiven Bewertungen, Fortschritte der Akustik - DAGA '98. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Oldenburg, S. 224 - 225
- [5] Piorr, persönliche Mitteilung
- [6] Piorr und Klug, persönliche Mitteilung