

Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen

DIN 45 681

Detection of tonal components of noise and determination of a tone adjustment for the assessment of noise immissions

Einsprüche bis 30. Apr 1992

Anwendungswarnvermerk auf der letzten Seite beachten!

Inhalt	Seite
Vorbemerkungen.....	2
1 Anwendungsbereich und Zweck.....	2
2 Begriffe.....	3
2.1 Tonhaltigkeit.....	3
2.2 Tonzuschlag.....	3
2.3 Frequenzgruppe.....	3
2.4 Frequenzgruppenpegel.....	3
2.5 Abtastfrequenz.....	3
2.6 Aliasing.....	3
2.7 Antialiasing-Filter.....	3
2.8 Zeitausschnittlänge.....	3
2.9 Linienspektrum.....	3
2.10 Linienabstand.....	4
2.11 Zeitfenster.....	4
3 Meßdurchführung.....	4
3.1 Allgemeines.....	4
3.2 Meßgröße.....	4
3.3 Meßgeräte.....	4
4 Auswertung.....	5
4.1 Allgemeines.....	5
4.2 Bandbreite Δf_c der Frequenzgruppe.....	5
4.3 Bestimmung der Tonhaltigkeit.....	6
5 Tonzuschlag K_T	7
Anhang A Werte der Frequenzgruppen-Bandbreite.....	9
Anhang B A-Bewertung.....	10
Anhang C Beispiele zur Bestimmung des Tonzuschlages.....	11

Fortsetzung Seite 2 bis 16

Normenausschuß Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI

Geräuschimmissionen sind in der Regel besonders beeinträchtigend und belästigend, wenn sie tonhaltig sind. In Meß- und Beurteilungsverfahren für Geräuschimmissionen (z. B. DIN 45 645 Teil 1 und Teil 2 (z. Z. Entwurf), VDI 2058 Blatt 1 und Blatt 3, ISO 1996-1:1982) sind daher Tonzuschläge zum äquivalenten Dauerschallpegel vorgesehen, um der erhöhten Störwirkung tonhaltiger Geräusche Rechnung zu tragen. In diesen Regelwerken betragen die Tonzuschläge bis zu 6 dB. Ihre Bemessung wird nach dem subjektiven Höreindruck des Gutachters vorgenommen.

Auch in Normen zur Beschreibung von Geräuschemissionen sind Angaben zur Tonhaltigkeit vorgesehen (z. B. DIN 45 635 Teil 1). Sie können bei Immissionsprognosen zur Beurteilung des Geräusches herangezogen werden.

Die Bemessung von Tonzuschlägen nach dem Höreindruck kann zu Unsicherheiten bei der Beurteilung führen, insbesondere dann, wenn Uneinigkeit über das Ausmaß der Tonhaltigkeit besteht. Weiterhin läßt sich aus dem Tonzuschlag nicht ablesen, wie stark ein Ton gemindert werden muß, damit er nicht mehr wahrgenommen werden kann. Aus diesen Gründen ist eine Objektivierung der Tonhaltigkeit und des Tonzuschlages zweckmäßig.

Die Objektivierung der Tonhaltigkeit erfordert eine Analyse der Geräusche, die der Funktionsweise des Gehörs angepaßt ist. Dazu müssen der Pegel L_T des Tones und der Pegel L_G des verdeckenden Geräusches in der Frequenzgruppe (siehe Abschnitt 2.3) um die Tonfrequenz f_T bestimmt werden.

Bei tiefen Frequenzen beträgt die Pegeldifferenz $L_G - L_T$ an der Mithörschwelle des Tones 2 dB. Sie steigt zu hohen Frequenzen hin kontinuierlich auf 6 dB an. Durchschnittlich ist also ein Sinuston in einem verdeckenden Geräusch gerade wahrnehmbar (mittlere Mithörschwelle), wenn $L_G - L_T = 4$ dB beträgt. Auf diesen Wert stellt das Tonhaltigkeitskriterium von ISO 7779:1988, Abschnitt D.4.1 ab.

Die mittlere Mithörschwelle ist so bestimmt, daß in wiederholten Hörversuchen eine Gruppe normalhörender Personen in 50 % der Fälle den Ton noch wahrnimmt. Das in dieser Norm angewandte Tonhaltigkeitskriterium (ein Geräusch ist tonhaltig, wenn $L_G - L_T < 6$ dB ist, siehe Abschnitt 2.1) ist bei mittleren und tiefen Frequenzen schärfer gefaßt und stellt darauf ab, daß in ca. 20 bis 30 % der Fälle die Personen den Ton noch hören.

Auch die Geräuschanteile in den zu tiefen Frequenzen benachbarten Frequenzgruppen können zur Verdeckung von Tönen führen. Da dieser Effekt in der überwiegenden Zahl der praktischen Anwendungen (insbesondere bei breitbandigen Geräuschen) ohne Bedeutung ist, bleibt er unberücksichtigt. Abschätzungen über eventuelle Auswirkungen können mit Hilfe der Lautheitsverteilung nach DIN 45 631 vorgenommen werden.

In den Beurteilungsverfahren ist der Begriff "Tonhaltigkeit" recht weit gefaßt. So sind z. B. auch Tonzuschläge für heulende oder kreischende Töne anzuwenden. Sofern ausreichende physikalische Kriterien für so bezeichnete Töne fehlen, sind der Objektivierung der Tonhaltigkeit Grenzen gesetzt, so daß auf eine subjektive Beurteilung des Geräusches in der Regel nicht verzichtet werden kann.

1 Anwendungsbereich und Zweck

In dieser Norm wird ein Verfahren zur objektiven Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und für die Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen beschrieben.

Die Norm soll bestehende Meß- und Beurteilungsverfahren ergänzen und Hinweise auf den notwendigen Umfang von Minderungsmaßnahmen zur Vermeidung von Tonhaltigkeit geben.

Das beschriebene Verfahren ist anwendbar, wenn die Frequenz des zu beurteilenden Tones höher als 100 Hz ist und sich die Tonfrequenz und der Tonpegel während der Messung wenig verändern. In anderen Fällen, wenn die Tonfrequenz kleiner als 100 Hz ist oder erheblich schwankt oder wenn andere Eigenarten der Geräusche (z. B. Kreischen) erfaßt werden sollen, kann dieses Verfahren zur Ermittlung der Tonhaltigkeit und zur Bemessung eines Tonzuschlages die subjektive Beurteilung nicht ersetzen.

2 Begriffe

2.1 Tonhaltigkeit

Ein Geräusch ist tonhaltig im Sinne dieser Norm, wenn es einen Ton enthält, dessen Pegel den Pegel der Geräuschanteile in der Frequenzgruppe um die Tonfrequenz ohne den Ton um weniger als 6 dB unterschreitet.

2.2 Tonzuschlag

Der Tonzuschlag ist eine Korrekturgröße zum äquivalenten Dauerschallpegel, die bei der Bildung von Beurteilungspegeln zur Berücksichtigung der besonderen Lästigkeit tonhaltiger Geräusche angewandt wird (siehe auch VDI 2058 Blatt 1).

2.3 Frequenzgruppe

Die Frequenzgruppe ist dasjenige Frequenzband, innerhalb dessen das Gehör bei der Bildung der Mithörschwelle eines Sinustones die Intensität des verdeckenden Schalles integriert. Die Bandbreite Δf_c der Frequenzgruppe wird auch kritische Bandbreite genannt.

2.4 Frequenzgruppenpegel

Der Frequenzgruppenpegel ist der Schallpegel derjenigen Schallintensität, die in eine Frequenzgruppe fällt. Der Frequenzgruppenpegel des verdeckenden Geräusches wird mit L_G bezeichnet.

2.5 Abtastfrequenz

Die kontinuierlich vorliegenden analogen Daten werden durch Abtastung (sampling) in diskrete Zeitintervalle zur digitalen Verarbeitung umgesetzt. Die Anzahl der Abtastwerte N (samples), die je Sekunde entnommen werden, wird Abtastfrequenz (sampling rate) f_s genannt.

Zur Vermeidung fehlerhafter Auswertungen muß die Abtastfrequenz größer sein als der zweifache Wert der höchsten im Geräusch zu untersuchenden Frequenz (Nyquistbedingung).

2.6 Aliasing

Wird die Nyquistbedingung verletzt, so können Auswertfehler durch aliasing (Rückfaltung) auftreten. Dabei werden Geräuschanteile, die zur Frequenz $f_s + f'$ gehören, der Frequenz $f_s - f'$ zugeordnet.

2.7 Antialiasing-Filter

Um dem Aliasing vorzubeugen, muß das untersuchte Geräusch vor der Analog-Digital-Wandlung mit einem Tiefpaß (Antialiasing-Filter) gefiltert werden.

Anmerkung: In handelsüblichen FFT-Analysatoren ist ein Antialiasing-Filter eingebaut, dessen Grenzfrequenz automatisch mit der wählbaren Abtastfrequenz umgeschaltet wird. Frequenzlinien, die durch aliasing beeinträchtigt sein können, werden in der Regel unterdrückt.

2.8 Zeitausschnittlänge

Im Gegensatz zur Frequenzanalyse mit analogen und digitalen Filtern wird das Geräusch bei der schnellen Fouriertransformation (FFT) in Datenblöcken verarbeitet. Diese Blöcke umfassen in der Regel nur einen Teil der Geräuschaufzeichnung. Die Block- oder Zeitausschnittlänge N gibt die Zahl der jeweils gleichzeitig verarbeiteten Datenpunkte an. Sie beträgt im allgemeinen $N = 1024 = 1 \text{ k}$ Datenpunkte.

2.9 Linienspektrum

Die FFT liefert ein Schmalbandlinienspektrum, in dem jede Linie den Ausgang eines Filters repräsentiert, dessen Mittenfrequenz der Frequenz der Spektrallinie entspricht.

2.10 Linienabstand

Der Linienabstand (Frequenzauflösung) Δf bei der FFT, d. h. der Abstand benachbarter Spektrallinien, beträgt:

$$\Delta f = f_s / N \quad (1)$$

2.11 Zeitfenster

Die Form der Schmalbandfilter, deren Ausgang durch die jeweilige Spektrallinie repräsentiert wird, hängt von der zeitlichen Bewertung der Datenpunkte (Zeitfenster) innerhalb des Datenblockes ab.

Eine unveränderte Weiterverarbeitung der Datenpunkte, die der Verwendung eines Rechteckzeitfensters entspricht, führt zu einer Filterform, die nur bei transienten Signalen und Signalen, die exakt mit einer ganzen Zahl voller Perioden in das Zeitfenster passen, zu korrekten Ergebnissen führt. Bei stochastischen Geräuschen kann es zu starken unerwünschten Verzerrungen des Spektrums führen. Um diesen Verzerrungen entgegenzuwirken, wird in dieser Norm die Anwendung des Hanning-Fensters empfohlen.

3 Meßdurchführung

3.1 Allgemeines

Die Meßdurchführung richtet sich nach der Aufgabenstellung. Dabei sind die Vorgaben des angewandten Meß- und Beurteilungsverfahrens z. B. hinsichtlich der Auswahl des Meßortes, der Meßzeit und -dauer und des Fremdgeräusches zu beachten.

3.2 Meßgröße

Meßgröße für die Bestimmung der Tonhaltigkeit ist der Schalldruck $p(t)$ bzw. der daraus abgeleitete Schalldruckpegel $L_p(t)$. Bei der Frequenzanalyse ist der äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} nach DIN 45 641 für die jeweiligen Frequenzbänder zu ermitteln. Sofern der A-bewertete Schalldruckpegel $L_A(t)$ nach DIN IEC 651 der Frequenzanalyse zugrunde gelegt wird, sind die ermittelten Werte L_{Aeq} -Werte entsprechend der Frequenzbewertung "A" rechnerisch zu korrigieren (siehe Anhang B).

3.3 Meßgeräte

Für die Messungen sind Schallpegelmesser nach DIN IEC 651 Klasse 1 einzusetzen, die über eine Frequenzbewertung "LIN" mit einer unteren Grenzfrequenz ≤ 20 Hz verfügen.

Als Zusatzgeräte können Speichergeräte (Magnetband-, digitale Speichergeräte) eingesetzt werden. Die über ein Speichergerät ermittelten Meßwerte dürfen um nicht mehr als ± 1 dB außerhalb des Toleranzbereiches nach DIN IEC 651 bzw. DIN IEC 804 liegen.

Die Analyse der Frequenzkomponenten in den Meßsignalen erfolgt mit einem FFT-Analysator. Der Linienabstand Δf sollte 8 % der Frequenzgruppenbandbreite nicht überschreiten, um ausreichend viele Stützstellen in der Frequenzgruppe zu erhalten (siehe Abschnitt 4.3.2).

Das analoge Meßsignal muß vor der Weiterverarbeitung durch ein steiles Tiefpaßfilter (Antialiasing-Filter) zur Vermeidung von Meßfehlern begrenzt werden. Die Abtastfrequenz muß mindestens doppelt so groß sein wie die größte, vorkommende Nutzfrequenz. Zur Verringerung von Seitenbändern sind Zeitfenster, vorzugsweise das Hanning-Fenster, zu verwenden (siehe Abschnitte 2.5 und 2.8).

4 Auswertung

4.1 Allgemeines

Ziel der Auswertung ist es, ein Schmalband-Pegelspektrum des Geräusches in der Frequenzgruppe des Tones zu ermitteln. Ist das Geräusch stationär, kann die Frequenzanalyse auf einen repräsentativen Zeitabschnitt des Meßsignals beschränkt werden. Repräsentativ heißt in diesem Zusammenhang, daß z. B. bei intermittierenden Geräuschen ein Zeitabschnitt gewählt wird, in dem die tonhaltige Komponente tatsächlich enthalten ist oder, z. B. bei Öfen, ein Arbeitszyklus analysiert wird.

Zur eindeutigen Identifizierung einer tonalen Komponente in einem Geräuschspektrum muß die Frequenzanalyse schmalbandig durchgeführt werden, da die Entscheidungssicherheit über die Tonhaltigkeit bei größer werdendem Linienabstand abnimmt.

Es ist zu beachten, daß der Linienabstand Δf und die nutzbare Signaldauer T_0 umgekehrt proportional sind, z. B. beträgt $T_0 = 200$ ms bei $\Delta f = 5$ Hz.

Um reproduzierbare Aussagen zu erhalten, sind bei der FFT-Analyse in der Regel viele (mindestens 30) Spektren zu akkumulieren. Bei nicht eindeutiger Tonhaltigkeit können Akkumulationen von etwa 100 Einzelspektren erforderlich sein.

Tonale Komponenten in unterschiedlichen Frequenzgruppen können getrennt beurteilt werden. Zur Entscheidung, ob ein Tonzuschlag gegeben wird (siehe Abschnitt 5), wird in diesem Fall nur der am stärksten hervortretende Ton herangezogen. Treten innerhalb einer Frequenzgruppe mehrere tonale Komponenten auf, so wird ebenfalls nur der am stärksten hervortretende Ton beurteilt.

Ausnahme: Liegen 2 Töne sehr dicht zusammen (Abstand ≤ 10 Hz), so tritt eine Schwebung ein. In diesem Fall muß der Summenpegel beider Töne zur Beurteilung herangezogen werden.

4.2 Bandbreite Δf_c der Frequenzgruppe

Die Bandbreite Δf_c der Frequenzgruppe um die Tonfrequenz f_T wird wie folgt bestimmt:

$$\Delta f = 25,0 + 75,0 \left[1,0 + 1,4 \cdot \left(\frac{f_T / \text{Hz}}{1000} \right)^2 \right]^{0,69} \text{ Hz} \quad (2)$$

Die Grenzfrequenzen f_1 und f_2 der Frequenzgruppe betragen

$$f_1 = f_T - \frac{\Delta f_c}{2} \quad (3)$$

$$f_2 = f_T + \frac{\Delta f_c}{2} \quad (4)$$

Einige typische Werte der Frequenzgruppenbandbreite sind im Anhang A angegeben.