

	DIN IEC 61973 (VDE 0553-973)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 17.140.20; 29.240.01		
Einsprüche bis 2008-03-08		
Entwurf		
Geräusche in Stationen zur Hochspannungsgleichstromübertragung, (IEC 22F/144/CD:2007)		
High voltage direct current (HVDC) substation audible noise, (IEC 22F/144/CD:2007)		
Anwendungswarnvermerk		
Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2008-01-08 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.		
Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.		
Stellungnahmen werden erbeten		
– vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden – oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.		
Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.		
Gesamtumfang 138 Seiten		
DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 22F/144/CD:2007 „High voltage direct current (HVDC) substation audible noise“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom SC 22F „Power electronics for electrical transmission and distribution systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 331 „Leistungselektronik“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (<http://www.dke.de>) zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60551:1992 zurückgezogen, ersetzt durch: EN 60076-10:2001	IEC 60551:1987 zurückgezogen, ersetzt durch: IEC 60076-10:2001	DIN EN 60551 (VDE 0532-7):1993-11 zurückgezogen, ersetzt durch: DIN EN 60076-10 (VDE 0532-76-10):2002-04	VDE 0532-7 VDE 0532-7
EN 60651:1994 zurückgezogen, ersetzt durch: EN 60672-1:2003 EN 60672-2:2003	IEC 60651:1979 zurückgezogen, ersetzt durch: IEC 61672-1:2002 IEC 61672-2:2003	DIN EN 60651:1994-05 zurückgezogen, ersetzt durch: DIN EN 61672-1:2003-10 DIN EN 61672-2:2004-08	— — —
—	ISO 1996-1	—	—
—	ISO 1996-2	—	—
EN ISO 3744:1995	ISO 3744:1994	DIN EN ISO 3744:1995-11	—
— EN ISO 3745:2003	ISO 3745:1977 zurückgezogen, ersetzt durch: ISO 3745:2003	DIN 45635-1:1984 zurückgezogen, ersetzt durch: DIN EN ISO 3745:2004-05	—
EN 3746:1995	ISO 3746:1995 + Corr.:1995	DIN EN ISO 3746:1995-12	—
—	ISO 8297	DIN ISO 8297	—
—	ISO 9613-1	—	—
—	ISO 9613-2	DIN ISO 9613-2	—

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60076-10 (VDE 0532-76-10):2002-04, *Leistungstransformatoren – Teil 10: Bestimmung der Geräuschpegel (IEC 60076-10:2001); Deutsche Fassung EN 60076-10:2001.*

DIN EN 61672-1:2003-10, *Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2002); Deutsche Fassung EN 61672-1:2003.*

DIN EN 61672-2:2004-08, *Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 2: Baumusterprüfungen (IEC 61672-2:2003); Deutsche Fassung EN 61672-2:2003.*

DIN EN ISO 3744:1995-11, *Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene (ISO 3744:1994); Deutsche Fassung EN ISO 3744:1995.*

DIN EN ISO 3745:2004-05, *Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume (ISO 3745:2003); Deutsche Fassung EN ISO 3745:2003.*

DIN EN ISO 3746:1995-12, *Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene (ISO 3746:1995); Deutsche Fassung EN ISO 3746:1995.*

DIN ISO 8297, *Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Mehr-Quellen-Industrieanlagen für die Abschätzung von Schalldruckpegeln in der Umgebung – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2.*

DIN ISO 9613-2, *Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren.*

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	10
2 Normative Verweisungen.....	10
3 Begriffe.....	10
3.1 Begriffe für Schall und Geräusche	10
3.1.1 Schall und Geräusche	10
3.1.2 Schalldruck P	10
3.1.3 Schalldruckpegel L_P	10
3.1.4 Normalkomponente der Schallintensität I_n	11
3.1.5 Normalkomponente des Schallintensitätspegels L_I	12
3.1.6 Schallleistung W	12
3.1.7 Schallleistungspegel L_W	12
3.1.8 Schallausbreitung	13
3.2 Begriffe für die Schallabstrahlung	13
3.2.1 Richtwirkung der Schallabstrahlung	13
3.2.2 Filter für die Schallmessung	15
3.2.3 Reflexionsebene	15
3.2.4 Hauptabstrahlungsfläche	15
3.2.5 Vorgeschiedene Außenlinie.....	15
3.2.6 Messabstand X	15
3.2.7 Messfläche.....	16
3.2.8 Eigengeräusch	16
4 Umgebungseinflüsse	16
4.1 Eigengeräusch	16
4.2 Topografie	17
4.3 Wetterbedingungen.....	17
5 Grenzwerte für den Geräuschpegel.....	19
5.1 Vorschriften	19
5.1.1 Grenzwerte des Geräuschpegels	19
5.1.2 Messung des Geräuschpegels	20
5.2 Bodennutzungsklassifikation.....	20
5.3 Orte für gefordert Funktionsgrenzwerte	20
5.4 Beziehung zwischen Funktionsgrenzwerten und der Zeitdauer	21
5.5 Typische Funktionsgrenzwerte für Geräusche	22
5.5.1 Spezifische A-bewertete Schalldruckpegel	22
5.5.2 Höchstzulässige Überschreitung der Eigengeräuschpegel	22
6 Schallemissionsquellen.....	22
6.1 Allgemeines.....	22

	Seite
6.2 Stromrichtertransformatoren	23
6.2.1 Geräuschquellen in einem Stromrichtertransformator	23
6.2.2 Vergleich mit Wechselstrom-Leistungstransformatoren	23
6.2.3 Besondere Merkmale von HGÜ-Stromrichtertransformatoren.....	24
6.2.4 Geräusche der Transformatorwicklung.....	25
6.3 Drosseln	25
6.3.1 Bauart und Ausführung von HGÜ-Drosseln.....	25
6.3.2 Mechanismen der Schallerzeugung.....	26
6.3.3 Wechselstrom-Filterkreisdrosseln	30
6.3.4 HGÜ-Glättungsdrosseln.....	31
6.3.5 Selbstabstimmende Filterkreisdrosseln	32
6.4 Kondensatoren	32
6.4.1 Bauart und Ausführung von Kondensatoren.....	32
6.4.2 Mechanismus der Schallerzeugung.....	33
6.5 Kühlgebläse.....	36
6.6 Andere Schall emittierende Quellen.....	36
6.6.1 Schaltgeräte	36
6.6.2 Phasenschieber	37
6.6.3 Dieselgeneratoren.....	37
6.6.4 Klimaanlage	37
6.6.5 Kühlkreispumpen	37
6.6.6 Ventile im Freien	38
6.6.7 Koronaentladungsquellen	38
6.7 Typische Schalleistungspegel von Schall emittierenden Quellen.....	38
7 Schallminderungsmaßnahmen	39
7.1 Anordnung der Station	39
7.1.1 Transformatoren und ummantelte Drosseln	40
7.1.2 Drosseln mit Luftkern	40
7.1.3 Kondensatoren.....	40
7.1.4 Kühlgebläse	41
7.1.5 Dieselgeneratoren.....	41
7.1.6 Schaltgeräte	41
7.1.7 Klimaanlage	41
7.1.8 Koronaentladungsquellen	41
7.1.9 Phasenschieber	41
7.2 Konstruktion der Bauteile	41
7.2.1 Transformatoren und ummantelte Drosseln	42
7.2.2 Drosseln mit Luftkern	42
7.2.3 Kondensatoren.....	42

	Seite
7.2.4	Kühlgebläse 42
7.2.5	Pumpen und Dieselgeneratoren 42
7.2.6	Schaltgeräte 43
7.2.7	Klimaanlage 43
7.2.8	Hochspannungsverbindungen 43
7.3	Schallschutzeinhausungen 43
7.3.1	Transformatoren und ummantelte Drosseln 43
7.3.2	Drosseln mit Luftkern 44
7.3.3	Kondensatoren 44
7.4	Nachrüstverfahren 45
7.4.1	Einhausungen 45
7.4.2	Dämpfung 45
7.4.3	Aktive Geräusch- und Schwingungsminderung 45
8	Betriebsbedingungen 45
8.1	Einleitung 45
8.2	Bestimmungsgemäße Betriebsbedingungen 46
8.3	Außergewöhnliche Betriebsbedingungen 47
8.4	Für den Nachweis festgelegte Betriebsbedingungen 48
9	Vorausberechnung des Schallpegels 48
9.1	Modellierung der Anlage 48
9.1.1	Ausführung 49
9.1.2	Quelle 49
9.1.3	Übertragungsweg 49
9.2	Berechnungsverfahren 49
9.2.1	Berechnung der Dämpfungsterme 51
9.3	Darstellung der Ergebnisse 55
10	Nachweis der Schallleistung der Bauteile 57
10.1	Allgemeines 57
10.2	Berechnung 57
10.2.1	Berechnung des Kraftspektrums 58
10.2.2	Berechnung der Übertragungsfunktion 58
10.2.3	Berechnung der Schallleistung 59
10.3	Messung 60
10.3.1	Allgemeine Aspekte bei der Bestimmung der Schallleistung 60
10.3.2	Schalldruckmessung 61
10.3.3	Korrekturen für das Eigengeräusch 62
10.3.4	Messung der Schallintensität 62
10.3.5	Schwingungsmessung 64
10.4	Kombination von Berechnung und Messung 64

	Seite
10.5 Nachweis	64
10.5.1 Nachweis der Hauptbauteile	64
10.5.2 Nachweis der Hauptbauteile am Standort	65
11 Nachweis der Schallpegel von der HGÜ-Station	65
11.1 Einleitung	65
11.2 Akustische Umgebung	66
11.3 Bedingungen für den Nachweis	66
11.4 Berechnung	67
11.5 Messung	67
11.6 Kombination von Berechnung und Messung	67
12 Festzulegende Parameter	69
12.1 Vom Kunden zu liefernde oder vom Auftragnehmer zu ermittelnde Daten	69
12.1.1 Bodennutzungsklassifikation, Lärmvorschriften und -grenzwerte	69
12.1.2 Umgebungsbedingungen	70
12.1.3 Betriebsbedingungen der HGÜ-Station	72
12.2 Vom Auftragnehmer anzugebende Daten	72
12.2.1 Geräusche der Bauteile	72
12.2.2 Vorausberechnung der Geräusche der HGÜ-Station	73
12.2.3 Geräuschmanagement am Standort	73
Literaturhinweise	74

Bilder

Bild 3.1 – Sphärische Ausbreitung von einer Punktquelle im Freifeld	14
Bild 3.2 – Hemisphärische Ausbreitung von einer Punktquelle	14
Bild 3.3 – Viertel-sphärische Ausbreitung von einer Punktquelle	15
Bild 4.1 – Erläuterung des spezifischen Geräusches und des Eigengeräusches	16
Bild 4.2 – Beispiel für einen reflektierenden Hügel und abfallenden Boden	17
Bild 4.3 – Beispiel für die Schallbrechung mit dem dargestellten Windgradienten	18
Bild 4.4 – Schall bewegt sich über dem Boden schneller fort	18
Bild 4.5 – Schall bewegt sich über dem Boden langsamer fort	18
Bild 6.1 – Trockendrossel mit Luftkern	27
Bild 6.2 – Magnetfeld einer Drosselwicklung mit Luftkern	27
Bild 6.3 – Vereinfachte Form der symmetrischen Atmungsschwingung einer Drosselwicklung	29
Bild 6.4 – Beispiel von Biegeschwingungen bei einer einfach gelagerten Wicklungslage ohne axiale Einschränkungen (z. B. I = Anzahl der umlaufenden Wellenlängen = 3, j = Anzahl der axialen Halbwellenlängen = 3)	29
Bild 6.5 – Beispiel eines Spektrums von Strömen durch eine Wechselstrom-Filterkreisdrossel	30
Bild 6.6 – Beispiel für ein Kraftspektrum, das auf die Drosselwicklung wirkt	31
Bild 6.7 – Beispiel eines Spektrums von Strömen durch eine HGÜ-Glättungsdrossel	31
Bild 6.8 – Beispiel für ein Kraftspektrum, das auf die Drosselwicklung wirkt	31
Bild 6.9 – Drossel für selbstabstimmende Filteranwendungen	32

	Seite
Bild 6.10 – Paket aus Kondensatorelementen	33
Bild 6.11 – Kräfte in einem Kondensatorelement.....	34
Bild 6.12 – Beispiel für ein Spannungsspektrum über einem Kondensator.....	35
Bild 6.13 – Beispiel für ein Spektrum der elektrostatischen Kräfte in einem Kondensator.....	35
Bild 8.1 – Erklärung von Oberschwingungen im Wechselstromnetz und im Stromrichter.....	47
Bild 9.1 – Beispiele für Übertragungswege von der Quelle zum Empfänger.....	49
Bild 9.2 – Zusammenfassung von Punktquellen zu einer äquivalenten Quelle, wenn der Messabstand r größer als $2 \cdot a$ ist.....	50
Bild 9.3 – Definition geometrischer Parameter zur Berechnung der Abschirmung	53
Bild 9.4 – Reflektierende Hindernisse werden wie Spiegelquellen behandelt.....	53
Bild 9.5 – Definition der Anteile für die Berechnung der Dämpfung durch den Boden.....	54
Bild 9.6 – Definition der in Gleichung (9.7) verwendeten Parameter, Bild a) $n_V = 2$, Bild b) $n_V = d_V/50$	55
Bild 9.7 – Beispiel für die grafische Darstellung der Berechnung des Schalldruckpegels.....	56
Bild 10.1 – Drei Schritte zur Bestimmung der Schallleistung von HGÜ-Bauteilen.....	58
Bild 10.2 – Lineare Übertragungsfunktion zwischen der Kraft und der Schwingungsgeschwindigkeit eines Systems mit einem Freiheitsgrad mit einer Resonanzfrequenz von 500 Hz. Die Wirkungen sind für unterschiedliche Werte der kritischen Dämpfung angegeben.....	59
Bild 10.3 – Definition der in Gleichung (10.5) verwendeten Parameter.....	62
Bild 11.1 – Einfache Skizze einer HGÜ-Station und eines Empfängerstandortes zur Messung von Geräuschen.....	67
Bild 11.2 – Der Schalldruckpegel wird am Punkt A gemessen und dann mit den Messwerten am Punkt A für den Punkt B berechnet	68
Bild 11.3 – Beispiele für Gruppen von Geräuschquellen	68
Bild 11.4 – HGÜ-Station und Beispiel für Mikrofonstandorte zur Bestimmung von Schallleistungspegeln	69

Geräusche in Stationen zur Hochspannungsgleichstromübertragung

Teil I: Bewertung von Geräuschen

1 Anwendungsbereich

Die vorliegende Norm dient der Festlegung und Bewertung von Geräuschen von Stationen zur Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ-Stationen), die im Freien hörbar sind. Sie ist in erster Linie für eine Anwendung durch Versorgungsunternehmen und Berater vorgesehen, die für die Erarbeitung technischer Spezifikationen für neue Projekte von HGÜ-Stationen und die Bewertung von Entwürfen zukünftiger Auftragnehmer verantwortlich sind.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 60651:1979, *Sound level meters*.
Amendment 1 (1993)

IEC 60551:1987, *Determination of transformer and reactor sound levels*.

IEC 60651, Amendment 1 (1995), *Power transformer and reactor – Determination of sound levels*.

3 Begriffe

3.1 Begriffe für Schall und Geräusche

3.1.1 Schall und Geräusche

Schall kann als Druckänderung in der Luft, im Wasser oder in einem anderen Medium (in der vorliegenden Norm wird Luft als Medium angenommen) definiert werden. Schall kann wie nachfolgend beschrieben entweder als Schalldruck, Schallintensität oder Schallleistung angegeben werden. Lärm wird als unerwünschter Hörschall definiert.

3.1.2 Schalldruck P

Schall kann quantitativ als Schalldruck P angegeben werden und als veränderlicher Druck, der einem statischen Druck überlagert ist, betrachtet werden. Er wird in der Einheit Pascal (Pa) angegeben.

3.1.3 Schalldruckpegel L_P

Es ist allgemein üblich, den Schalldruck auf der Dezibel-Skala als Schalldruckpegel anzugeben. Der Schalldruckpegel L_P in Dezibel (dB) ist wie folgt definiert:

$$L_P = 20 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (3.1)$$

Dabei ist:

P der gemessene Effektivwert des Schalldruckes;

P_0 der Effektivwert des Bezugsschalldruckes von 20×10^{-6} Pa.

Der Schalldruckpegel wird mit Schalldruckmessgeräten gemessen, die gewöhnlich ein Frequenzbewertungsnetzwerk umfassen. Im Normalfall wird eine „A-Bewertung“ durchgeführt, weil dabei ähnlich wie beim menschlichen Ohr zwischen dem Schall verschiedener Frequenzen unterschieden wird. Messungen in dB(A) stimmen im Allgemeinen mit der Bewertung der „Lautstärke“ durch den Menschen überein. Es gibt jedoch auch andere Frequenzbewertungen wie z. B. die „C-Bewertung“, bei der im Gegensatz zur herkömmlichen A-Bewertung mehr die niedrigen Frequenzen berücksichtigt werden. Weitere Informationen zu Schallpegelmessgeräten und zur A-Bewertung siehe IEC 60651 (1979).

Da die Schallpegelverteilung, die um Schall emittierende Objekte gemessen wird, gewöhnlich inhomogen ist, ist es erforderlich, Schallpegel statt als Werte von einem einzigen Ort als räumliche Mittelwerte von Werten anzugeben, die an mehreren Messorten aufgenommen wurden.

Der mittlere Schalldruckpegel $\overline{L_{pA}}$ wird aus einer Anzahl von Messwerten des A-bewerteten Schallpegels L_{pAi} nach folgender Gleichung berechnet:

$$\overline{L_{pA}} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{0,1 L_{p(fj)}} \right) \quad (3.2)$$

Dabei ist:

- $\overline{L_{pA}}$ der mittlere Schallpegel in dB(A);
- L_{pAi} der gemessene Schallpegel am Ort i in dB(A), möglicherweise für den Einfluss von Eigengeräuschen korrigiert;
- N die Gesamtanzahl der Messorte.

Die Addition der verschiedenen Frequenzbereiche (1/1-Oktave, 1/3-Oktave usw.) wird auf die gleiche Weise wie folgt durchgeführt:

$$L_{pA, TOP} = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10^{0,1 L_{p(fj)}} \right) \quad (3.3)$$

Dabei ist:

- $L_{pA, TOP}$ der Gesamtschallpegel in dB(A);
- $L_{p(fj)}$ der Schallpegel im Frequenzbereich j in dB(A), möglicherweise auf den Einfluss von Eigengeräuschen korrigiert;
- N die Gesamtanzahl der Frequenzanteile.

Weitere Informationen zu den 1/3- und 1/1-Oktavbereichen siehe 3.10.

3.1.4 Normalkomponente der Schallintensität I_n

Für eine sich in einer Ebene ausbreitende Schallwelle ist die Schallintensität an einem gegebenen Punkt n in senkrechter Richtung zu dieser Ebene definiert als:

$$I_n = \frac{p^2}{p \cdot c} \quad (3.4)$$

Dabei ist:

- p der Effektivwert des gemessenen Schalldruckes in Pa;
- p die konstante Luftdichte im Ruhezustand in kg/m³;
- c die Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s.

3.1.5 Normalkomponente des Schallintensitätspegels L_I

Der Wert in Dezibel ist gleich dem Verhältnis der Normalkomponente der Schallintensität zum Bezugswert der Schallintensität ($I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$):

$$L_I = 10 \lg \left(\frac{|I_n|}{I_0} \right) \quad (3.5)$$

ANMERKUNG Bei einer Schallwelle innerhalb einer geschlossenen Fläche, wie es bei einem akustischen Nahfeld vorliegen kann, kann I_n negativ sein. Der Pegel wird dann mit -XX dB angegeben. In Gleichung (3.4) wird jedoch eine sich in einer Ebene ausbreitende Welle im Fernfeld einer Schallquelle in der als positiv definierten Richtung angenommen.

3.1.6 Schalleistung W

Die Schalleistung ist die Geschwindigkeit, mit der die Schallenergie von einer Quelle abgestrahlt wird. Es handelt sich um eine skalare Größe, die in der Einheit Watt (W) angegeben wird. Die Gesamtschalleistung einer Quelle ist wie folgt definiert:

$$W = \int_A \vec{I} \cdot d\vec{A} \quad (3.6)$$

Dabei ist:

A eine geschlossene Integrationsfläche;

$\vec{I}$ der Vektor der Schallintensität eines Oberflächenelementes $d\vec{A}$.

3.1.7 Schalleistungspegel L_W

Wie der Schalldruck kann die Schalleistung auch in einem logarithmischen Maßstab als Schalleistungspegel angegeben werden. Der Schalleistungspegel L_W in dB ist wie folgt definiert:

$$L_W = 10 \lg \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (3.7)$$

Dabei ist:

W die emittierte Schalleistung;

W_0 eine Bezugsleistung von 1×10^{-12} ;

W entspricht der Hörbarkeitsschwelle.

Der A-gewichtete Schalleistungspegel L_{WA} eines Objektes kann aus dem mittleren Schalldruckpegel L_{pA} wie folgt bestimmt werden:

$$L_{WA} = L_{pA} + 10 \lg \left(\frac{S}{S_0} \right) \quad (3.8)$$

Dabei ist:

S die „Messfläche“, die das Objekt umschließt (in m^2);

S_0 eine Bezugsfläche von 1 m^2 .

Die Schalleistung innerhalb einer geschlossenen Fläche ist unabhängig vom Abstand zur Schallquelle.

3.1.8 Schallausbreitung

Der Schalldruckpegel an einem gegebenen Punkt hängt vom Abstand zur Quelle, von der Schallleistung der Quelle und der betreffenden Geometrie ab. Bei einer hemisphärischen Ausbreitung über einer Reflexionsebene gelten folgende Gleichungen:

$$L_P = L_W - 10 \lg(2\pi r^2) \quad (3.9)$$

oder alternativ

$$L_P = L_W - 10 \lg(2\pi) - 20 \lg(r)$$

Dieser Ausdruck wird in der Akustik im Zusammenhang mit der Schallausbreitung von ortsfesten Quellen mitunter als „Abstandsgesetz“ bezeichnet. Das Abstandsgesetz sagt aus, dass der Schalldruckpegel bei einer Verdoppelung des Abstandes von der Schallquelle um 6 dB sinkt, sofern die Messungen im Fernfeld der Schallquelle durchgeführt werden, das u. a. von der Größe der Schallquelle, der räumlichen Komplexität des Schallfeldes und der abgestrahlten Frequenz abhängt. Z. B. beginnt das Fernfeld bei einem großen Transformator in einem Abstand von 30 m vom Transformator. Bei einer kleinen Drossel, die einen Schall von z. B. 1 kHz abstrahlt, beginnt das Fernfeld in einem Abstand von 5 m.

Streng genommen ist das Abstandsgesetz nur für Punktquellen gültig. Viele Quellen können jedoch in einem ausreichenden Abstand von der Quelle als Punktquelle betrachtet werden. Bei der Anwendung der Gleichung auf reale Quelle ist aber Vorsicht geboten.

3.2 Begriffe für die Schallabstrahlung

3.2.1 Richtwirkung der Schallabstrahlung

Das einfachste Verfahren zur Vorausberechnung der Schallausbreitung (das noch häufig benutzt wird) ist die Annahme, dass die den Schall emittierende Quelle eine gleichförmige Schallabstrahlungscharakteristik nach der Theorie der hemisphärischen Ausbreitung besitzt (siehe Bild 3.2).

Bestimmte Schall emittierende Quellen oder Gruppen davon zeigen jedoch eine andere Richtwirkung der Schallabstrahlung, die bei der Anordnung einer HGÜ-Station berücksichtigt werden muss. Bei der Schallausbreitung müssen auch andere Wirkungen wie Abschirmung, Reflexion und Absorption betrachtet werden.

Die Beziehung zwischen Schallleistung, Richtwirkung und Schalldruckpegel wird mit folgender Gleichung angegeben:

$$L_P = L_W - 10 \lg \frac{4\pi r^2}{Q} \quad (3.10)$$

Dabei ist:

L_P der Schalldruckpegel im Abstand r von der Schallquelle;

L_W die Schallleistung der Schallquelle;

r der Abstand zwischen der Quelle und dem Empfänger;

Q die Richtwirkung der Schallabstrahlung, z. B.

$Q = 1$ sphärische Schallausbreitung (siehe Bild 3.1);

$Q = 2$ hemisphärische Schallausbreitung (siehe Bild 3.2);

$Q = 3$ ungleichmäßige Schallausbreitung (siehe Bild 3.3).

Die Richtwirkung der Schallabstrahlung kann auch in dB angegeben werden und wird dann als Richtwirkungsmaß (directivity index, DI) bezeichnet, das wie folgt definiert ist:

$$DI = 10 \lg Q \quad (3.11)$$

E DIN IEC 61973 (VDE 0553-973):2008-01

Z. B. ist für $Q = 2 \Rightarrow DI = 3$ dB oder für $Q = 4 \Rightarrow DI = 6$ dB.

Das Richtwirkungsmaß ist ein Korrekturmaß (dB-Addierglied), mit dem die Abweichung der Schallausbreitung von der gleichmäßigen sphärischen Ausbreitung quantitativ angegeben wird. Der Schalldruckpegel kann dann wie folgt berechnet werden:

$$L_P = L_W + DI - 10 \lg 4\pi r^2 \quad (3.12)$$

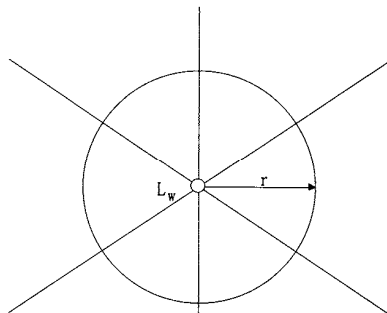


Bild 3.1 – Sphärische Ausbreitung von einer Punktquelle im Freifeld

ANMERKUNGEN zu Bild 3.1:

$$L_P = L_W - 10 \lg (4\pi r^2)$$

L_P Schalldruckpegel (dB bezogen auf 20 μ Pa)

L_W Schalleistungspegel (dB bezogen auf 1 pW)

$(4\pi r^2)$ Kugeloberfläche (m^2)

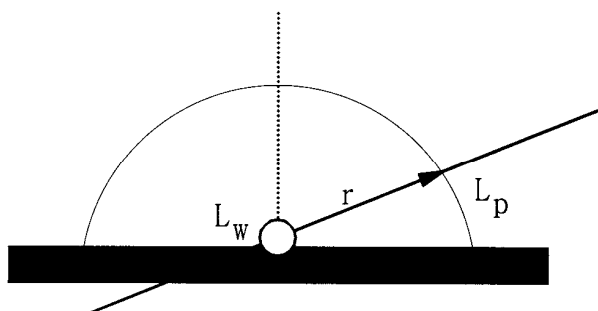


Bild 3.2 – Hemisphärische Ausbreitung von einer Punktquelle

ANMERKUNGEN zu Bild 3.2:

$$L_P = L_W - 10 \lg (4\pi r^2/2)$$

L_P Schalldruckpegel (dB bezogen auf 20 μ Pa)

L_W Schalleistungspegel (dB bezogen auf 1 pW)

$(4\pi r^2/2)$ Oberfläche der Halbkugel (m^2)

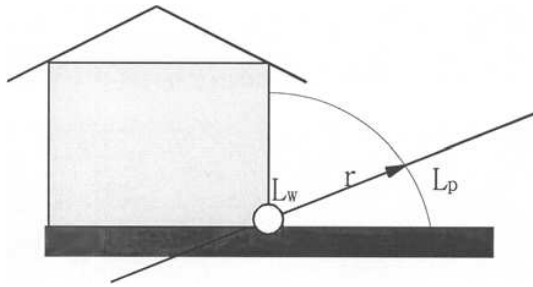


Bild 3.3 – Viertel-sphärische Ausbreitung von einer Punktquelle

3.2.2 Filter für die Schallmessung

Für Schallmessgeräte eingesetzte Normfilter messen den Gesamtpegel des Schalldruckes in einem festgelegten Frequenzbereich. Gewöhnlich werden für diese Messungen 1/1-Oktavfilter (Oktavfilter) oder 1/3-Oktavfilter (Terzfilter) benutzt. Ein 1/1-Oktavbereich umfasst drei 1/3-Oktavbereiche. Z. B. umfasst der 1/1-Oktavbereich von 31,5 Hz die 1/3-Oktavbereiche 21 Hz, 31,5 Hz und 40 Hz.

Der obere Frequenzabschnitt (f_1) und der untere Frequenzabschnitt (f_2) des Filters stehen in folgender Beziehung zueinander:

$$f_2 = 2^a f_1 \quad (3.13)$$

Dabei ist:

$a = 1$ für den Oktavfilter;

$a = 1/3$ für den Terzfilter.

Die Mittenfrequenzen der anzuwendenden Filter sollten den geltenden Normen entsprechen.

Nach ISO R266 oder IEC R255 und ANSI S1.11_1966, Klasse III, gelten folgende Mittenfrequenzen für Oktavfilter: 16 Hz, 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz, 4 000 Hz, 8 000 Hz, 16 000 Hz. Für den Terzfilter sind die Mittenfrequenzen 16,0 Hz, 20,0 Hz, 25,0 Hz, 31,5 Hz ... bis 17 780,0 Hz, 22 390,0 Hz.

3.2.3 Reflexionsebene

Eine Reflexionsebene ist definiert als eine Fläche, die den Schall vollständig reflektiert.

3.2.4 Hauptabstrahlungsfläche

Eine Hauptabstrahlungsfläche ist eine hypothetische Fläche, die das Prüfobjekt umgibt und von der angenommen wird, dass sie einen Schall abstrahlt.

3.2.5 Vorgeschriebene Außenlinie

Eine vorgeschriebene Außenlinie ist eine waagerechte Linie, auf der die Messorte angeordnet sind und die sich in einem festgelegten waagerechten Abstand (dem Messabstand) von der Hauptabstrahlungsfläche befindet.

3.2.6 Messabstand X

Der Messabstand X ist der waagerechte Abstand zwischen der Hauptabstrahlungsfläche und der Messfläche.

3.2.7 Messfläche

Eine Messfläche ist eine hypothetische Fläche, die eine Schallquelle umhüllt. Auf dieser Fläche sind die Messpunkte angeordnet. Die Messfläche ist mit einer oder mehreren Reflexionsebenen abgeschlossen.

3.2.8 Eigengeräusch

Das Eigengeräusch ist der Schalldruckpegel bei einem abgeschalteten Prüfobjekt (in diesem Fall kann das Prüfobjekt die gesamte HGÜ-Station oder ein einzelnes Bauteil sein).

4 Umgebungseinflüsse

Wird von einer Quelle ein Schall emittiert, hängt es von den Umgebungseinflüssen ab, wie sich der Schall ausbreitet und wie er in einem bestimmten Abstand wahrgenommen wird. In diesem Abschnitt werden diese Umgebungseinflüsse beschrieben, und zwar das Eigengeräusch, die Topografie und die Wetterbedingungen. Vor allem die Wetterbedingungen besitzen einen großen Einfluss auf die Schallausbreitung über lange Strecken (in einer Größenordnung von Hunderten von Metern).

4.1 Eigengeräusch

Wenn an einem gegebenen Messpunkt ein spezifisches Geräusch gehört oder gemessen wird, ist das Eigengeräusch der Schall, der an diesem Punkt noch hörbar ist, wenn das spezifische Geräusch aufhört. Wie in Bild 4.1 dargestellt, ergeben der Pegel des spezifischen Geräusches und der Pegel des Eigengeräusches zusammen den Gesamtmesspegel.

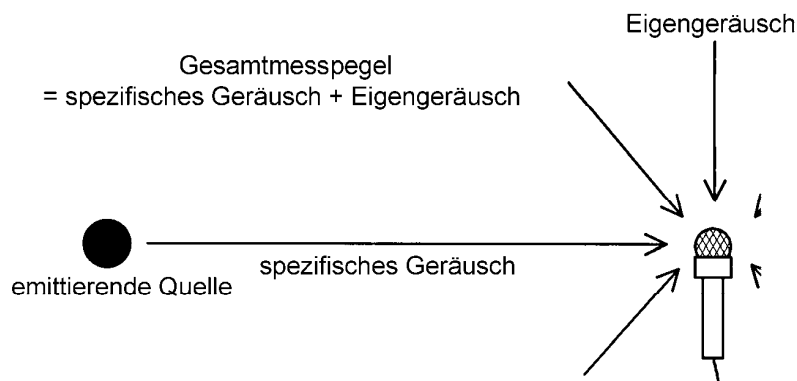


Bild 4.1 – Erläuterung des spezifischen Geräusches und des Eigengeräusches

An dem für eine HGÜ-Station vorgesehenen Ort ist immer ein Eigengeräusch vorhanden. Da sich das Eigengeräusch aus von Menschen verursachten und natürlichen Geräuschen zusammensetzt, kann jede Geräuschquelle entweder tagsüber, nachts oder zu einer bestimmten Zeit Geräusche erzeugen. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Unterschiede des Eigengeräusches zu verschiedenen Zeitpunkten zu erkennen. Im Allgemeinen sind die Eigengeräuschpegel am geringsten, wenn die Aktivitäten der Menschen am geringsten sind, d. h. zwischen Mitternacht und 4 Uhr morgens.

Am wichtigsten ist die Betrachtung des Eigengeräuschpegels nahe des festgesetzten Höchstwertes oder wenn er dem gemessenen Gesamtwert des Schallpegels entspricht.

Es ist günstig, den Eigengeräuschpegel für einen vorgesehenen HGÜ-Standort vor der Errichtung der Station zu messen, damit nachgewiesen werden kann, ob der Pegel annähernd dem festgesetzten Höchstwert entspricht oder nicht. Wenn nach der Errichtung einer Station der Unterschied zwischen dem Eigengeräuschpegel und dem Gesamtmesspegel kleiner als 10 dB ist, muss bei der Messung der Einfluss des Eigengeräusches berücksichtigt werden. Möglicherweise ist die genaue Bestimmung des spezifischen Geräuschpegels unmöglich, selbst wenn der Gesamtmesspegel korrigiert werden kann.

Einzelheiten zum Eigengeräusch können 10.3.2.1 entnommen werden.

4.2 Topografie

Die den Standort der HGÜ-Station umgebende Topografie ist verschiedenartig, HGÜ-Stationen können z. B. am Meer, in den Bergen oder in Tälern oder auf dem flachen Land errichtet werden. Die Topografie beeinflusst die Schallausbreitung. Besonders spürbar sind Reflexion, Absorption, Abschirmung und Dämpfung des Schalls durch Landschaftsmerkmale wie Berge und oder den Boden selbst. Bei einem Höhenunterschied zwischen dem Standort der Station und dem gewählten Messpunkt unterscheidet sich darüber hinaus die Schallausbreitung von der Situation, in der sich Standort und Messpunkt auf gleicher Höhe befinden.

In Bild 4.2 gibt es z. B. einen Hügel, der den Schall reflektiert, und abfallenden Boden im Schallschatten. In dieser Situation unterscheidet sich die Schalldämpfung von Ort zu Ort, auch wenn der Abstand zur Quelle gleich ist. Außerdem muss bewusst beachtet werden, dass der Betrag der Oberflächenreflexion und -absorption von den Oberflächeneigenschaften abhängt.

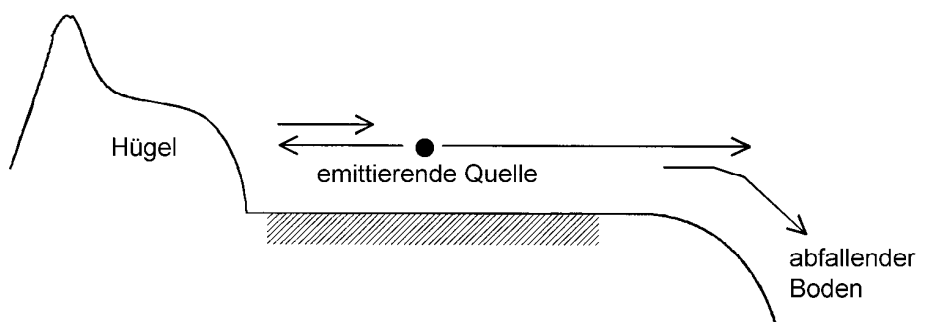


Bild 4.2 – Beispiel für einen reflektierenden Hügel und abfallenden Boden

Aus diesem Grund müssen für eine genaue Berechnung des von einer HGÜ-Station emittierten Schalls nicht nur die topografischen Bedingungen, sondern auch der Bewuchs und die Bedeckung des Bodens wie Wald, Felsen, Gras usw. berücksichtigt werden.

Wenn der Boden jedoch im Wesentlichen flach ist und der Bewuchs und die Bedeckung gleichmäßig und niedrig sind, reicht es gewöhnlich aus, die Dämpfung über eine Strecke ohne genaue Betrachtung der Schwankung der Schallausbreitung durch die Topografie zu berechnen.

4.3 Wetterbedingungen

Über lange Strecken kann die Schallausbreitung in der Luft durch Wetterbedingungen wie Wind, Temperatur, Regen, Nebel und Schnee beeinflusst werden. Den größten Einfluss auf die Schallausbreitung haben Wind und Temperatur. Aus diesem Grund müssen die Wetterbedingungen bei der Schallmessung am Standort besonders beachtet werden.

a) Einfluss von Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Die Windgeschwindigkeit über dem Boden ist aufgrund des Reibungswiderstandes gewöhnlich geringer als in höheren Lagen. Der Schall wird wie in Bild 4.3 dargestellt gebrochen, weil die Schallgeschwindigkeit die Vektorsumme aus Windgeschwindigkeit und ursprünglicher Schallgeschwindigkeit ist. Aus diesem Grund besteht ein Unterschied zwischen der Schallausbreitung auf der dem Wind abgewandten und der dem Wind zugewandten Seite.

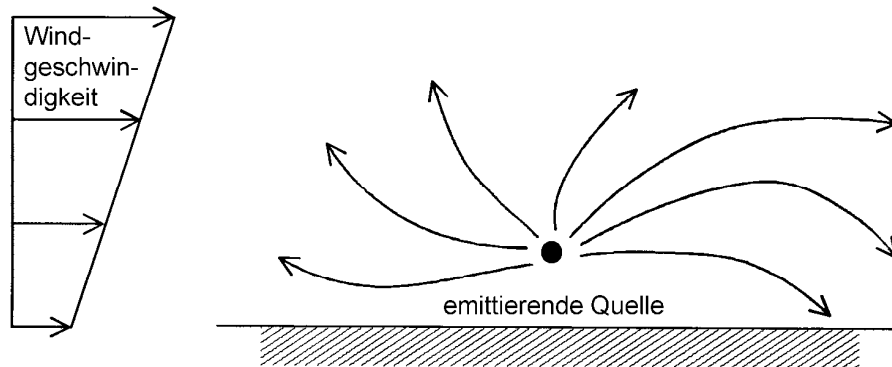


Bild 4.3 – Beispiel für die Schallbrechung mit dem dargestellten Windgradienten

Wenn z. B. in dem für eine HGÜ-Station ausgewählten Gelände ein stark vorherrschender Wind weht, sind die Schallpegel auf der dem Wind zugewandten Seite geringer als auf der dem Wind abgewandten Seite. Eine sorgfältige Beachtung dieses Umstandes ermöglicht eine Entwurfsoptimierung für die Anordnung der Station und der Schallschutzeinrichtungen. (Anmerkung des Verfassers: Wenn Messungen an einem windigen Tag durchgeführt werden, sollte berücksichtigt werden, dass durch den Wind verursachte Geräusche im Mikrofon ein so genanntes Eigengeräusch erzeugen, das durch einen Mikrofonwindschutz verringert werden kann.)

b) Einfluss von Temperaturgradienten

Ein warmer oder kalter Boden kann senkrechte Temperaturgradienten in der Atmosphäre verursachen, die eine starke Auswirkung auf die Schallausbreitung haben können, weil der Schall sich in warmer Luft schneller fortbewegt als in kalter Luft (siehe Bilder 4.4 und 4.5).

Die Folge davon ist, dass die Schalldämpfung für einen Beobachter auf Bodenhöhe für die Bedingungen in Bild 4.5 geringer ist. Diese Erscheinung tritt gewöhnlich nachts ein.

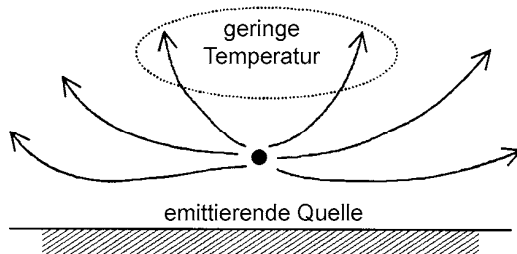


Bild 4.4 – Schall bewegt sich über dem Boden schneller fort

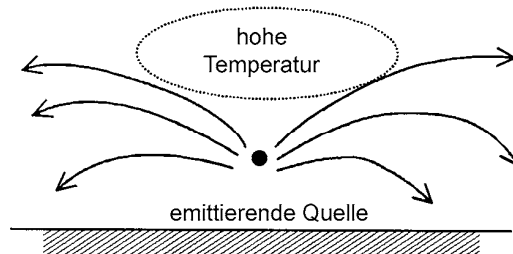


Bild 4.5 – Schall bewegt sich über dem Boden langsamer fort

c) Einfluss von atmosphärischen Bedingungen (Temperatur, Feuchte und Druck)

Die Ausbreitung einer Schallwelle in Luft verliert an Intensität, da die Luft Energie absorbiert. Diese Absorption wird in erster Linie durch die Viskosität des Mediums und die Relaxation der Sauerstoffmoleküle (O_2) und Stickstoffmoleküle (N_2) verursacht. Insgesamt ist die Dämpfung so gering, dass sie bei geringen Frequenzen vernachlässigbar ist, bei höheren Frequenzen wird sie aber ziemlich hoch (siehe 9.2.1.2).

d) Einfluss von Regen, Nebel und Schnee

An regnerischen oder nebligen Tagen wird der Schall mitunter weiter getragen. Der Hauptgrund dafür sind nicht die akustischen Eigenschaften von Regen oder Nebel, sondern der Einfluss eines Temperaturgradienten oder von Wind, der dieses Wetter begleitet (siehe Bilder 4.4 und 4.5). Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Schalldämpfung durch Regen oder Nebel relativ gering ist.

Auf der anderen Seite hat eine mit frisch gefallenem Schnee bedeckte Oberfläche einen hohen Schallabsorptionsgrad und die Dämpfung ist stark. Im Gegensatz dazu werden Eigengeräuschpegel an regnerischen Tagen durch den Schall von fallenden Regentropfen erhöht.

e) Typische Beispieldaten

Typische Änderungen der Schalldämpfung durch Wetterbedingungen sind Folgende [1].

- Messung eines bis zu 20 dB(A) geringeren Schallpegels auf der dem Wind zugewandten Seite im Vergleich zu Messungen ohne Wind.
- Die Auswirkungen von geringen oder mäßigen Windgeschwindigkeiten überschreiten selbst die Einflüsse von hohen Temperaturgradienten.
- Wenn die Windgeschwindigkeit 3 m/s bis 4 m/s überschreitet, ist es schwierig, Geräuschpegel unter 40 dB(A) genau zu messen. Diese obere Grenze der Windgeschwindigkeit kann durch den Einsatz eines Windschutzes angehoben werden, der Unterschied bewegt sich aber gewöhnlich nur in einem Größenbereich von wenigen m/s.
- Bei niedrigen Frequenzen bestehen große Unterschiede zwischen trockenem und feuchtem Boden (bei 63 Hz ist der Schallpegel bei feuchtem Boden 10 dB(A) niedriger).

Die Wetterbedingungen können sich von einem Tag zum nächsten und zwischen verschiedenen Geländearten unterscheiden, so dass es erforderlich ist, den Einfluss dieser Bedingungen auf die Schallausbreitung sehr genau zu berücksichtigen.

5 Grenzwerte für den Geräuschpegel

Derzeit gibt es keine internationale Norm, in der Grenzwerte für Geräuschpegel angegeben sind. In fast allen Ländern bestehen jedoch allgemein anerkannte Vorschriften oder Empfehlungen für den Umgebungsschall. Diese enthalten mitunter Messverfahren für den Nachweis. Derartige Vorschriften oder Empfehlungen wurden von staatlichen oder örtlichen Behörden aufgestellt und sie legen gewöhnlich höchstzulässige Geräuschpegel für verschiedene Bodennutzungsklassen fest. Außerdem gibt es unterschiedliche Frequenzbewertungen des Schalls wie A-Bewertung und C-Bewertung (siehe 3.3 und 5.1.1).

5.1 Vorschriften

Die einzige derzeit vorliegende internationale Norm für die Beschreibung und Messverfahren für Umgebungsgeräusche ist ISO 1996. Es gibt jedoch Normen für die Festlegung des Schallpegels spezieller Betriebsmittel wie Leistungstransformatoren (IEC 60551), Normen für Schallpegelmessgeräte (IEC 60651) und Verfahren zur Bestimmung von Schalldruck- und Schalleistungspegel (z. B. ISO 3746, 1995).

5.1.1 Grenzwerte des Geräuschpegels

In den Vorschriften werden Grenzwerte von Umgebungsgeräuschpegeln häufig auf die Bodennutzungsklasse bezogen und nicht auf einen bestimmten Abstand von einer Geräuschquelle wie einer HGÜ-Station. In Fällen, in denen Grenzwerte des Geräuschpegels für bestimmte Abstände angegeben sind, erfolgt dies gewöhnlich aufgrund eines besser geeigneten Nachweisverfahrens, das vom Kunden oder von der örtlichen Bauaufsicht festgelegt worden ist. Darüber hinaus kann es auch erforderlich sein, zur Abdeckung unterschiedlicher Betriebsbedingungen mehr als einen Grenzwert festzulegen.

Vorliegende staatliche oder örtliche Vorschriften können in mehrere Herangehensweisen unterteilt werden:

- höchstzulässige A-bewertete Schalldruckpegel für unterschiedliche Bodennutzungsklassen einschließlich Eigengeräusche;
- höchstzulässige Überschreitung des vorhandenen Eigengeräusches;
- es gibt auch Kombinationen aus A-Bewertung und C-Bewertung, z. B. darf der C-bewertete Gesamtschallpegel den A-bewerteten Gesamtschallpegel um höchstens 15 dB überschreiten.

Einige der Vorschriften legen keinen Grenzwert des Schallpegels für ein gesamtes Gebiet fest. Sie geben z. B. einen Grenzwert an der Grundstücksgrenze an. In Gebieten mit geringen Eigengeräuschpegeln ist die erste Herangehensweise angemessen, aber in Gebieten mit hohen Eigengeräuschpegeln ist die zweite Herangehensweise vorteilhafter.

5.1.2 Messung des Geräuschpegels

Die vorliegenden Vorschriften legen geltende Bedingungen für eine zulässige Messung fest. Es können folgende Anforderungen festgelegt werden:

- Anzahl und Dauer der Messungen an den einzelnen Punkten, damit eine repräsentative Beschreibung des Schallpegels sichergestellt wird;
- anzuwendende Messeinrichtung;
- zulässige Abstände zwischen Hindernissen und Mikrofonen;
- Wetterbedingungen, z. B. Windrichtung und höchstzulässige Windgeschwindigkeit.

Zusätzlich zu diesen Bedingungen ist die Beschreibung der Messgenauigkeit, d. h. der Messunsicherheit, von Bedeutung. Ein Beispiel für die Angabe der Messunsicherheit ist 45 dB $\pm$ 3 dB.

5.2 Bodennutzungsklassifikation

Die meisten Aktivitäten des Menschen verursachen Schall. Dieser Schall wird in die Umgebung ausgestrahlt und kann die Unterhaltung oder den Schlaf von Personen stören. Aus diesem Grund liegen in den meisten Ländern Gesetze oder Vorschriften für zulässige Schallpegel vor.

Wenn der Schall an der Quelle unterdrückt werden würde, gäbe es kein Lärmproblem. Die Kosten für die Unterdrückung können jedoch gegenüber dem erreichten Nutzen unverhältnismäßig hoch sein und manchmal ist es schwierig, den Schall an seiner Quelle zu unterdrücken, wie z. B. bei beweglichen Quellen wie Flugzeugen.

Aus diesem Grund ist die Bodennutzung klassifiziert und Lärmquellen werden möglichst an einem Ort entfernt von Wohn- und Erholungsgebieten konzentriert. Der für eine HGÜ-Station vorgesehene Standort und dessen Umgebung können gegenwärtig noch für einen anderen Zweck genutzt werden wie z. B. für Industrie, für die Erholung, als Ackerland oder als Brachland. Für jedes Gebiet gibt es häufig auf der Grundlage der Bodennutzungs-kategorie festgelegte örtliche Gesetze oder Vorschriften für Grenzwerte für Schallpegel.

Vor der Auswahl des Standortes für eine HGÜ-Station müssen die Bodennutzung und die Vorschriften für den Schallpegel untersucht werden, damit keine Probleme auftreten, wenn die Konstruktion im Bau ist oder zu irgendeinem anderen zukünftigen Zeitpunkt. In Wohngebieten ist ein besonderes Verständnis für die Lebensbedingungen und die Erwartungen der zukünftigen Anlieger der Station erforderlich. Es sollte außerdem anerkannt werden, dass der vorhandene Eigengeräuschpegel das Ergebnis der tatsächlich vorliegenden Vorschriften der Bodennutzung sein kann.

5.3 Orte für geforderte Funktionsgrenzwerte

Orte, an denen die Erfüllung von Geräuschgrenzwerten erforderlich ist, können sein:

- am Zaun, der die HGÜ-Station umgibt, oder an der Grundstücksgrenze des Kunden;
- an einer bestimmten Außenlinie um die HGÜ-Station, z. B. an einem Umkreis oder an der Grenzlinie des Grundstückes;
- an der Grenze eines nahe gelegenen Grundstückes.

Nachfolgend sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Herangehensweisen aufgeführt.

- am Zaun, der die HGÜ-Station umgibt, oder an der Grundstücksgrenze des Kunden
 - Vorteile
 - wenig von Eigengeräuschen beeinflusst
 - wenig Einfluss der Wetterbedingungen auf die Messung
 - wenig Einfluss durch die Topografie und den Bewuchs der Umgebung
 - Nachteile
 - Nachweis an Orten, an denen gewöhnlich keine Belästigung für Menschen vorliegt
 - kann die Anordnung der Station unnötig beeinflussen
 - komplizierterer und zeitaufwändigerer Nachweis durch Interferenzerscheinungen des Schallfeldes
 - höhere Kosten, da der Auftragnehmer Handlungen zur Senkung abgestrahlter Geräusche ausführen muss, die durch Interferenzerscheinungen stark betonte Höchstwerte nahe der Station aufweisen
- an einer bestimmten Außenlinie um die HGÜ-Station, z. B. an einem Umkreis oder an der Grenzlinie des Grundstückes
 - Vorteile
 - gegenüber der Vorausberechnung nahe dem Zaun vereinfachte Vorausberechnung der Geräuschpegel; der Grund dafür ist, dass die Station als Punktquelle behandelt werden kann, siehe 9.2
 - Nachteile
 - Nachweis an Orten, an denen keine Belästigung für Menschen vorliegt
 - durch Eigengeräusch, Wetterbedingungen, Topografie und Bodenbewuchs beeinflusst
- an der Grenze eines nahe gelegenen Grundstückes
 - Vorteile
 - Nachweis an Orten, an denen eine tatsächliche Belästigung vorliegen kann
 - entspricht den Vorschriften für Lärm im Freien
 - vereinfachte Vorausberechnung der Geräuschpegel
 - Nachteile
 - schwierige Ausführung eines Nachweises, bei dem gleichzeitig alle Messbedingungen, d. h. Wetterbedingungen, erfüllt sind
 - Zugang zu Privatgrundstücken erforderlich

Hinsichtlich vom Umgebungsgeräuschen ist die letzte Herangehensweise vorzuziehen, da Belästigung durch Geräusche gewöhnlich dort vorliegt, wo Menschen leben oder arbeiten. Natürlich können in der Zukunft Häuser auf vorher unbewohntem Land errichtet werden. Die örtliche Bauaufsicht kann Hinweise für bekannte Entwicklungen geben. Andererseits sollte bei der Planung zukünftiger Bauvorhaben das vorhandene Geräuschklima einschließlich betriebener HGÜ-Stationen unter Berücksichtigung der Landschaft in Betracht gezogen werden.

5.4 Beziehung zwischen Funktionsgrenzwerten und der Zeitdauer

Im Allgemeinen geben HGÜ-Stationen dauernd Geräusche ab, es gibt aber bestimmte Geräuschquellen in der Station, die spontane Geräusche erzeugen, wie z. B. Leistungs- und Trennschalter. Kritische Merkmale von spontanen Geräuschen sind:

- Spitzengeräuschpegel;
- Dauer;
- Tageszeit;
- Häufigkeit des Auftretens;
- Regelmäßigkeit (das tägliche Auftreten des gleichen Tones kann ungünstiger sein als verschiedene Töne);

E DIN IEC 61973 (VDE 0553-973):2008-01

- Einzeltöne;
- Zeitschwankung von Geräuschimpulsen.

Gleichung (6.13) bietet ein Verfahren für die Bewertung von spontanen Geräuschen als äquivalenter Dauerpegel. Viele staatliche und örtliche Behörden legen Geräuschgrenzwerte sowohl für Tages- als auch Nachtzeiten fest.

In vielen Fällen sind für spontane Geräusche die von den Sicherheitsbehörden für das Personal vorgeschriebene Grenzwerte von größerer Bedeutung.

5.5 Typische Funktionsgrenzwerte für Geräusche

Vor der Angabe typischer Funktionsgrenzwerte für Geräusche muss erwähnt werden, dass der Kostenaufwand für die Änderung der Funktionsgrenzwerte für Geräusche sehr hoch sein kann, selbst wenn die Änderung nur wenige dB(A) betrifft.

Wie bereits in diesem Hauptabschnitt angegeben, liegen keine internationalen Normen mit der Angabe von Grenzwerten vor.

Eine Überprüfung verschiedener nationaler oder örtlicher Vorschriften zeigt jedoch zwei Wege für die Festlegung von Funktionsgrenzwerten für Geräusche. Diese werden nachfolgend beschrieben.

5.5.1 Spezifische A-bewertete Schalldruckpegel

Schalldruckpegel im Freien werden gewöhnlich in eine Anzahl von Kategorien unterteilt, die sich auf die Bodennutzungsklasse beziehen. Es ist zu beachten, dass die örtlichen Vorschriften im selben Land voneinander abweichen können. Gewöhnlich gilt Folgendes (es sind nur Werte für die Nachtzeit angegeben):

- | | |
|--|------------------------|
| – Betriebsgelände, in denen keine Industriegeräusche erzeugt werden: | <50 dB(A) bis 70 dB(A) |
| – Wohngebiete, Schulgelände und Krankenhäuser: | <40 dB(A) bis 55 dB(A) |
| – Erholungsgebiete | <35 dB(A) bis 45 dB(A) |

Die Anforderungen sind gewöhnlich strenger, wenn Einzeltöne vorherrschen. In den Vorschriften wird dann eine Definition des Einzeltones angegeben. Bei vorherrschenden Einzeltönen dürfen die angegebenen Pegel gesenkt werden.

5.5.2 Höchstzulässige Überschreitung der Eigengeräuschpegel

Es ist schwierig, genaue Beispiele für die höchstzulässige Überschreitung der Eigengeräuschpegel anzugeben, weil der Bereich der geforderten Pegel sehr groß ist. Ein Bereich der zulässigen Überschreitung der vorliegenden Eigengeräuschpegel ist 0 dB(A) bis 7 dB(A). Diese Festlegung wird im Allgemeinen an Grundstücksgrenzen benutzt, die anfällig für Eigengeräusche sind. Wenn Einzeltöne vorliegen, werden die Werte für die zulässige Überschreitung gewöhnlich auch herabgesetzt.

6 Schallemissionsquellen

6.1 Allgemeines

Der Zweck von Anforderungen an den Schall ist die Begrenzung des Geräuschpegels, der in ein Gebiet um eine HGÜ-Station herum abgegeben wird. Dieses Ziel wird von dem Vertragspartner ausgeführt, der das geforderte Lärmmanagement vorgibt.

Ein wirksames Lärmmanagement erfordert die Kenntnis des akustischen Verhaltens jedes Schall emittierenden Bauteils sowie der relativen Schallfestigkeit jeder dieser Quellen. Das Ziel ist die Aufgliederung der Anforderungen an die Geräusche für die vollständige HGÜ-Station auf die Bauteilebene, damit eine Überprüfung der Geräuschpegel in den Laboren der Bauteilhersteller möglich ist. Sind alle Bauteile eingebaut, ist es fast unmöglich, den Geräuschbeitrag jedes einzelnen Bauteils zu ermitteln.

In diesem Hauptabschnitt werden die wesentlichen Schall emittierenden Quellen einer HGÜ-Station eingeführt und kurz das akustische Verhalten jeder Quelle erläutert. Die wesentlichsten Bauteile sind:

- Stromrichtertransformatoren;
- Drosseln;
- Kondensatoren;
- Kühlgebläse.

Andere Quellen, die zum Gesamtschallpegel beitragen, können z. B. sein:

- Schaltgeräte;
- Kühlkreispumpen;
- Phasenschieber;
- Ventile, die sich im Freien befinden;
- Dieselgeneratoren;
- Klimaanlage;
- Koronaentladungsquellen.

Dieser Hauptabschnitt beschreibt die Hauptparameter, die die Schalleistung jedes Bauteils beeinflussen. In Hauptabschnitt 3 (Begriffe) und in Hauptabschnitt 10 (Nachweis der Schalleistung der Bauteile) wird die Wechselbeziehung zwischen Schalleistung und Schalldruck beschrieben.

6.2 Stromrichtertransformatoren

6.2.1 Geräuschquellen in einem Stromrichtertransformator

Der Stromrichtertransformator besitzt die höchste Schalleistung der Einzelbauteile in einer HGÜ-Station und bildet daher einen bedeutenden Bestandteil bei der Betrachtung von Geräuschen.

Geräusche werden in einem Stromrichtertransformator durch drei Quellen erzeugt:

- durch den Magnetkern (Geräusche, die durch Magnetostriktion und Stoßstellen erzeugt werden);
- elektromagnetische Kräfte in Wicklungen, Kesselwänden und magnetischen Abschirmungen;
- Gebläse/Pumpen im Kühlsystem des Transformators.

Gebläse und Pumpen sind nicht grundsätzlich Teile des Transformators und können von anderen Herstellern geliefert werden (siehe 6.5 und 6.6.5).

6.2.2 Vergleich mit Wechselstrom-Leistungstransformatoren

Über den Mechanismus der Schallerzeugung in Wechselstrom-Leistungstransformatoren liegen viele Kenntnisse vor und diese werden deshalb in den nächsten Absätzen erläutert.

In der Vergangenheit wurden die Kernschwingungen als Hauptquelle von Transformatorgeräuschen ermittelt. Die Geräuschemission war in erster Linie von der Bemessungsleistung des Transformators und von der magnetischen Flussdichte im Eisenkern abhängig, aber nicht von der Belastung.

Technische Weiterentwicklungen der Kernaufwicklung wie der Einsatz hochwertiger Kernbleche zur Herabsetzung von Magnetostriktion und die Anwendung verbesserter Kernschichtungstechniken (z. B. Kerne mit Step-lap-Schichtung) haben die Kerngeräusche so verringert, dass die lastabhängigen Wicklungsgeräusche, die durch elektromagnetische Kräfte erzeugt werden, wesentlich an Bedeutung gewonnen haben.

Wenn der Induktionspegel des Kerns bei Bemessungsspannung auf etwa 1,4 T oder weniger gesenkt wird, kann die Schalleistung von Wicklungsgeräuschen von modernen Wechselstrom-Leistungstransformatoren genauso hoch sein wie die Kerngeräusche und diese sogar übertreffen. Der Schalleistungspegel des Wicklungsgeräusches kann mit folgender Gleichung annähernd bestimmt werden:

$$L_{WA,w} \approx 39 + 10 \lg \left(\frac{S_r}{S_p} \right) \text{ dB(A)} \quad (6.1)$$

Dabei ist:

- $L_{WA,w}$ der A-bewertete Schalleistungspegel der Wicklung bei Bemessungsstrom, Bemessungsfrequenz und Kurzschlussspannung;
- S_r die Bemessungsleistung in MVA;
- S_p die Bezugsleistung von 1 MVA.

Bei bestimmungsgemäßem Wechselstrombetrieb erzeugt der Transformator ein Geräuschspektrum mit Frequenzen, die gewöhnlich unter 1 kHz liegen. Die Wicklungsgeräusche bei sinusförmigem Laststrom haben fast ausschließlich die doppelte Netzfrequenz (Netzfrequenz = elektrische Nutzfrequenz). Das Frequenzspektrum der Kerngeräusche umfasst außerdem abhängig vom Flusssichtepege große Anteile der 2. bis 5. Oberschwingung der doppelten Netzfrequenz [1]. Aus diesem Grund werden die Geräusche eines belasteten Wechselstromtransformators hauptsächlich von einem 100-Hz-Ton oder einem 120-Hz-Ton (abhängig davon, ob die Netzfrequenz 50 Hz oder 60 Hz beträgt) beherrscht, der dem Leerlaufspektrum überlagert ist.

6.2.3 Besondere Merkmale von HGÜ-Stromrichtertransformatoren

HGÜ-Stromrichtertransformatoren geben gewöhnlich einen höheren Schalleistungspegel ab als Wechselstromtransformatoren mit der gleichen Bemessungsleistung. Der Geräuschpegel wird durch zwei Faktoren angehoben:

- der Laststrom eines Stromrichtertransformators besitzt einen hohen Oberschwingungsanteil;
- Stromrichtertransformatoren unterliegen einem geringen Vormagnetisierungsgleichstrom in den an der Thyristorbrücke angeschlossenen Wicklungen.

Diese Faktoren können eine Erhöhung des Schalleistungspegels von mehr als 10 dB über den Pegel beim bestimmungsgemäßen Wechselstrombetrieb verursachen.

Das von Stromrichtertransformatoren erzeugte Schallspektrum umfasst Frequenzen bis mehrere kHz und ist deshalb für den Menschen hörbar (wie durch die A-Bewertung des Schallpegels nachgewiesen, siehe Abschnitt 3). Da bei Stromrichtertransformatoren die vorherrschenden Frequenzen über 300 Hz liegen, sind äußere Schallminderungsmaßnahmen (wie Abschirmungs- und Absorptionsanordnungen) wirksamer.

Die durch die Gleichstrommagnetisierung erzeugten Geräusche sind nicht unmittelbar vom Lastpegel abhängig, da der geringe Gleichstrom durch folgende Aspekte beeinflusst wird:

- asymmetrische Zündung der Thyristorventile, die wiederum von der Genauigkeit des Zündsteuerungssystems abhängt;
- Impedanzunterschiede unter den Stromrichtertransformatoren;
- Potentialunterschied zwischen der Erdelektrode und der Stationserde bei einpoliger Erdrückleitung.

Die Gleichstrommagnetisierung eines Transformatorkerns erhöht die Transformatorgeräusche auch bei einem mäßigen Pegel des Gleichstromanteils [2]. Der Grund dafür ist, dass die Gleichstrommagnetisierung einen 50-Hz-Ton oder einen 60-Hz-Ton (abhängig von der Netzfrequenz) und Oberschwingungen mit den ungeradzahigen Vielfachen von 50 Hz oder 60 Hz hinzufügt. Darüber hinaus wird der Hörschall bei den normalen geradzahigen Oberschwingungen (100 Hz oder 120 Hz, 200 Hz oder 240 Hz, 300 Hz oder 360 Hz usw.) durch die Gleichstrommagnetisierung erhöht.

Bei einem HGÜ-Transformator ist die vorherrschende Geräuschquelle gewöhnlich die Wicklung und damit steigt der Geräuschpegel mit der Transformatorlast an.

In diesem Zusammenhang wird auf das CIGRE-Dokument in Electra im August 1996 verwiesen [3], in dem der Unterschied zwischen dem tatsächlichen Geräuschpegel beim Betrieb und den Werten beschrieben ist, die bei den normalen Werksprüfungen im Leerlauf aufgezeichnet werden. Eine der Schlussfolgerungen in

diesem Dokument ist, dass die Schallleistungspegel der Stromrichtertransformatoren, die aus Schalldruckmessungen in verschiedenen, bis zu ihrer Nennlast betriebenen HGÜ-Stationen ermittelt wurden, mit der Transformatorlast ansteigen. Es besteht jedoch fast keine Wechselbeziehung zwischen den Pegeln dieser Geräuschzunahme und den zugehörigen Leistungsbemessungsdaten der untersuchten Transformatoren. Die Differenz zwischen dem Schallleistungspegel im Leerlauf und bei Nennlast kann von wenigen dB bis mehr als 20 dB betragen.

Außerdem muss besonders bei Transformatoren in einer geräuscharmen Ausführung die zusätzliche Schallleistung betrachtet werden, die durch die Kühleinrichtung erzeugt wird. Besondere Aspekte des akustischen Betriebsverhaltens von Kühlgebläsen werden in 6.5 erläutert.

6.2.4 Geräusche der Transformatorwicklung

Elektromagnetische Kräfte in den Transformatorwicklungen erzeugen Wicklungsgeräusche, wenn die Strom führenden Wicklungsleiter dem magnetischen Streufeld der Wicklung ausgesetzt sind. Die Kräfte in den Wicklungen sind proportional zum Strom multipliziert mit dem Magnetfeld in der Wicklung. Das Magnetfeld ist jedoch proportional zum Strom, damit ergibt sich:

$$F \sim B \cdot I \sim I^2 \quad (6.2)$$

Dabei ist:

- F die Schwingungskraft in der Wicklung in N;
- B die Dichte des Magnetfeldes in der Wicklung in T;
- I der Wicklungsstrom in A.

Die Schwingungsamplitude und die Schwingungsgeschwindigkeit sind direkt proportional zur Kraft. Da die Schallleistung proportional zum Quadrat der Schwingungsgeschwindigkeit ist, kann abgeleitet werden, dass die Schallleistung mit der vierten Potenz des Laststromes ansteigt:

$$W \sim v^2 \sim (\omega \cdot x)^2 \sim F^2 \sim I^4 \quad (6.3)$$

Dabei ist:

- W die abgestrahlte Schallleistung;
- v die Schwingungsgeschwindigkeit;
- x die Schwingungsamplitude;
- $\omega = 2\pi f$ die akustische Winkelfrequenz.

6.3 Drosseln

6.3.1 Bauart und Ausführung von HGÜ-Drosseln

In einem HGÜ-System werden Drosseln für verschiedene Funktionen eingesetzt:

- HGÜ-Glättungsdrosseln, die zur Verringerung von Oberschwingungen auf der Gleichstromseite, zur Verringerung des Stromanstiegs durch Ausfälle im Gleichstromnetz und zur Verbesserung der dynamischen Stabilität des HGÜ-Systems in Reihe an die HGÜ-Übertragungsleitung und/oder -kabel angeschlossen oder in den Gleichstromzwischenkreis einer Kurzkupplung eingeschaltet werden;
- Filterkreisdrosseln zur Ausfilterung von Oberschwingungen des Wechselstromes auf der Gleichstromseite;
- Trägerfrequenz- und Funkentstör-Filterkreisdrosseln in der Starkstromleitung auf der Wechselstrom- und/oder Gleichstromseite der HGÜ-Station zur Verringerung der Ausbreitung von Hochfrequenzrauschen auf den Leitungen;
- Kompensationsdrosselspulen können Bestandteil einer HGÜ-Station sein und dienen der induktiven Kompensation für Wechselstrom-Oberschwingungsfiler besonders unter Schwachlastbedingungen, bei

E DIN IEC 61973 (VDE 0553-973):2008-01

denen eine bestimmte Mindestanzahl von Oberschwingungsfiltern zur Erfüllung der Anforderungen an das Oberschwingungsverhalten erforderlich ist.

Bei der Untersuchung des Einflusses von Geräuschen, die eine HGÜ-Station ausstrahlt, sind die Wechselstrom-Filterkreisdrosseln und die HGÜ-Glättungsdrosseln die wichtigsten Bauarten von Drosseln, die betrachtet werden müssen.

In der allgemein üblichen Praxis werden für alle genannten Anwendungen Trockendrosseln mit Luftkern eingesetzt, wenn nicht besondere Umstände den Einsatz von ummantelten ölgefüllten HGÜ-Glättungsdrosseln mit Eisenkern (z. B. an Standorten mit sehr starker Verschmutzung und strengen Klimabedingungen) verlangen. Eine weitere Ausnahme kann die Steuerung der Permeabilität des magnetischen Kreises durch die Gleichstrommagnetisierung sein.

Die folgenden Beschreibungen von Ausführungen von Drosseln und Mechanismen der Schallerzeugung sind im Wesentlichen auf die Trockenbauarten mit Luftspulen beschränkt. Für ummantelte ölgefüllte Drosseln gilt auch 6.2, wo Stromrichtertransformatoren beschrieben sind, da die Mechanismen der Schallerzeugung und die Maßnahmen der Schallminderung ähnlich sind, mit Ausnahme der zusätzlichen Geräuschquelle, die durch das Gas im Magnetkern erzeugt wird.

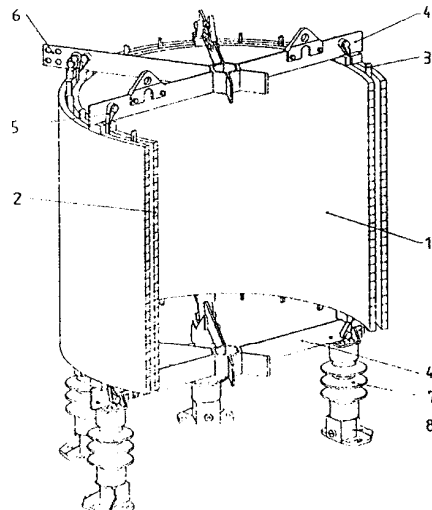
Die Hauptkonstruktionsmerkmale einer Trockendrossel mit Luftkern sind in Bild 6.1 erläutert.

Die Wicklung der Drossel besteht aus einer oder mehreren harzgetränkten und gekapselten Wicklungslage(n) aus isolierten Aluminiumleitern. Die konzentrischen Lagen werden durch das Zusammenschweißen ihrer Enden zu metallischen Querträgerstrukturen (Drehkreuzen) miteinander verbunden. Das obere und das untere Drehkreuz werden durch mehrere Glasfaserbänder entlang der Wicklung zusammengeklemt. Der Abstand der Pakete wird radial durch umlaufend angeordnete glasfaserverstärkte Stäbe gesichert, die senkrechte Luftkanäle für die natürliche Konvektionskühlung der Wicklungen bilden.

6.3.2 Mechanismen der Schallerzeugung

Die durch Drosseln mit Luftkern erzeugten Geräusche stammen hauptsächlich von Schwingungskräften der Wicklung, die durch die Wechselwirkung des durch die Wicklung fließenden Stromes mit dessen Magnetfeld entstehen.

Bei Drosseln mit Eisenkern induzieren im Magnetkreis wirkende Kräfte weitere Schwingungen der Einrichtung. Werden Eisenkerne mit Luftspalt eingesetzt, muss der Geräuschbeitrag durch Kräfte in den Luftspalten betrachtet werden. Der Geräuschbeitrag ist im Allgemeinen höher als die durch Magnetostriktion erzeugten Geräusche.



Legende

- 1 Wicklung
- 2 Leiter
- 3 Stab mit Luftkanal
- 4 Drehkreuz
- 5 Glasfaserband
- 6 elektrischer Anschluss
- 7 Stützisolator
- 8 Montagearmatur

Bild 6.1 – Trockendrossel mit Luftkern

Jeder Strom führende Leiter unterliegt Kräften, wenn er einem Magnetfeld ausgesetzt wird. Als Folge davon erzeugt das durch die Wicklungsfläche verlaufende Magnetfeld elektromagnetische Wicklungskräfte. Als Beispiel zeigt Bild 6.2 die Verteilung des Magnetfeldes einer Drossel mit Luftkern mit einer Leistungsbemessung von 30 Mvar.

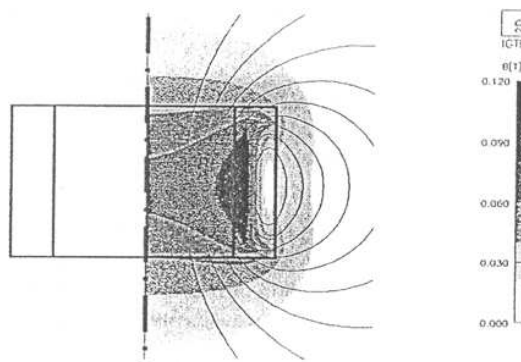


Bild 6.2 – Magnetfeld einer Drosselwicklung mit Luftkern

Wie bereits unter 6.2.4 erwähnt, sind die Kräfte in der Wicklung proportional zum Strom multipliziert mit dem Magnetfeld in der Wicklung und damit proportional zur vierten Potenz des Stromes.

Mit der Berechnung der Wicklungskräfte kann nachgewiesen werden, dass das Frequenzspektrum der Kräfte vom elektrischen Frequenzspektrum abweicht. Bei einem Wechselstrom mit einer einzigen Frequenz haben die Schwingkräfte die doppelte Frequenz des Stromes. Wenn die Drossel jedoch zusätzlich zu der Schwingung mit der doppelten elektrischen Frequenz gleichzeitig mit mehreren Strömen unterschiedlicher Frequenzen belastet wird, ergeben sich auch noch weitere Schwingungsfrequenzen (siehe 6.3.3).

E DIN IEC 61973 (VDE 0553-973):2008-01

Die Schwingungskräfte an der Wicklung führen dazu, dass die Drossel in axialer und radialer Richtung schwingt. Während die Schwingungskräfte eindeutig bestimmt werden können, ist die Analyse der Schwingungsantwort der Wicklungsstruktur sehr kompliziert. Wie bei jeder mechanischen Konstruktion kann das dynamische Verhalten der Drossel durch Schwingungstypen beschrieben werden. Da die Schwingungskräfte fast rotationssymmetrisch sind, wäre zu erwarten, dass nur symmetrische Konstruktionen, die sich mit der Form der Kraftverteilung decken, angeregt werden. Die endliche Anzahl der Stäbe mit Lüftungskanälen zwischen konzentrischen Wicklungslagen, die an den Wicklungsenden befestigten Drehkreuze und die Fertigungstoleranzen führen jedoch zu anderen Erregungsarten als rotationssymmetrischen Arten. Die Schwingungsgrundtypen von zylindrischen Drosseln sind:

- die so genannte „Atmungsschwingung“ (breathing mode), bei der die Wicklung der Drossel wie ein zylindrischer Druckbehälter verformt wird. Diese Schwingungsfrequenz hängt im Wesentlichen von den Werkstoffparametern der Wicklung ab und ist umgekehrt proportional zum Wicklungsdurchmesser. Die Frequenz der Atmungsschwingung liegt gewöhnlich zwischen mehreren Hundert Hz und 1 kHz. Die Atmungsschwingung ist vollkommen symmetrisch (siehe Bild 6.3) und ihre Form deckt sich mit der verteilten elektromagnetischen Anregungskraft, die aus der axialen Komponente des Magnetfeldes resultiert.
- die „Kompressionsschwingungen“ (compression modes) in axialer Richtung, bei denen die Drossel symmetrisch in Richtung der Mittelebene der Drossel zusammengedrückt wird. Diese Schwingung wird durch die radiale Komponente des Magnetfeldes angeregt.
- die „Biegeschwingungen“ (flexural modes) der Wicklungslagen, die durch die Anzahl der Schwingungsknoten in Umfangsrichtung und axialer Richtung gekennzeichnet sind. Die betreffenden Frequenzen dieser Schwingungstypen sind gewöhnlich geringer als die Frequenz der Atmungsschwingung. Obwohl die Biegeschwingungen nicht rotationssymmetrisch sind, werden sie durch elektromagnetische Kräfte angeregt. Siehe Bild 6.4.

Die Schwingungen der Oberfläche der Einrichtung breiten sich in der Umgebung aus wie Luftschall. Die abgestrahlte Schalleistung ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$W = \rho_0 c A_W \sigma v^2 \quad (6.4)$$

mit:

$$v = \omega x \quad (6.5)$$

Die abgestrahlte Schalleistung bei einer bestimmten Schallfrequenz ist definiert durch:

$$W = \rho_0 c A_W \sigma \omega^2 x^2 \quad (6.6)$$

Dabei ist:

- W die abgestrahlte Schalleistung in W;
 ρ_0 die Luftdichte in kg/m³;
 c die Schallgeschwindigkeit in Luft in m/s;
 A_W die Schall abstrahlende Fläche in m²;
 σ der Abstrahlgrad (keine Einheit);
 v die Schwingungsgeschwindigkeit in m/s;
 ω die akustische Winkelfrequenz ($= 2\pi f$);
 x die Schwingungsamplitude in m.

Die Schalleistung wird im Wesentlichen von der Schwingungsamplitude und der Größe der Schall abstrahlenden Fläche der Einrichtung bestimmt. Damit ist die Schallemission einer Trockendrossel mit Luftkern durch den Betrag der Wicklungsschwingung in radialer Richtung vorgegeben, da die Wicklung den Hauptteil der Abstrahlungsfläche bildet. Die Beiträge der axialen Wicklungsschwingung und der anderen Komponenten zur gesamten Schallemission sind relativ gering.

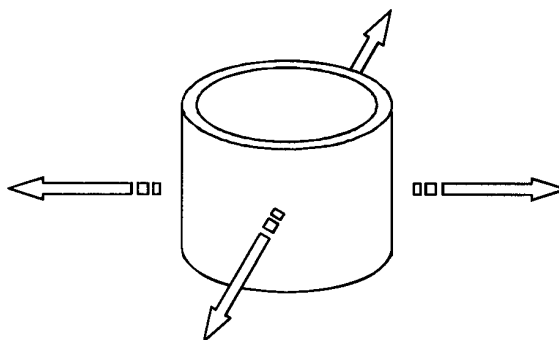


Bild 6.3 – Vereinfachte Form der symmetrischen Atmungsschwingung einer Drosselwicklung

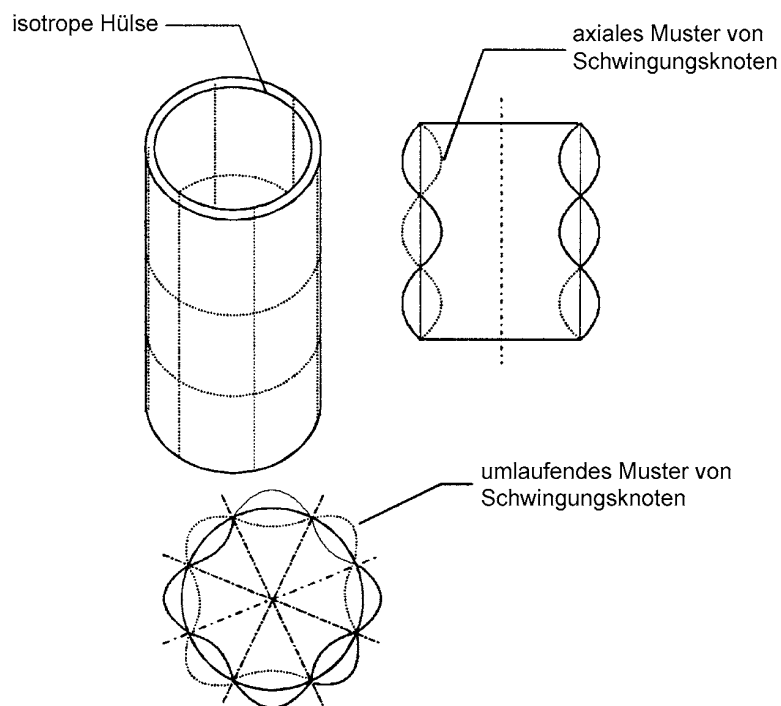


Bild 6.4 – Beispiel von Biegeschwingungen bei einer einfach gelagerten Wicklungslage ohne axiale Einschränkungen (z. B. l = Anzahl der umlaufenden Wellenlängen = 3, j = Anzahl der axialen Halbwellenlängen = 3)

Damit keine dynamische Resonanzverstärkung der Schwingungsamplitude auftritt, sollten die Anregungsfrequenzen (die durch das elektrische Frequenzspektrum beherrscht werden) nicht mit den Resonanzfrequenzen der Konstruktion zusammenfallen.

Da die Schwingungsamplitude direkt proportional zur Schwingungskraft ist, kann abgeleitet werden, dass die Schallleistung der Drossel proportional zur vierten Potenz des Laststromes ist (siehe 6.2.1). Zur Spezifikation von Schallkriterien müssen daher die Betriebsbedingungen der Station eindeutig festgelegt sein. Die festgelegten Strombemessungsdaten für die thermische Auslegung der Drossel sind nicht notwendigerweise die gleichen Bemessungsdaten wie für die akustische Auslegung.

Der Abstrahlgrad σ hängt von der Frequenz und den geometrischen und konstruktiven Merkmalen des Bauteils ab. Als Beispiel sei eine Oberfläche angenommen, die mit einer Frequenz schwingt, bei der die Wellenlänge der Konstruktion wesentlich größer ist als die Schallwellenlänge im Umgebungsmedium wie z. B. Luft. Die Luft kann sich dann nicht seitlich wegbewegen, um die Druckdifferenz aufzuheben, und die Teilchengeschwindigkeit der Luft gleicht sich auch außerhalb der unmittelbaren Oberflächennähe an die Oberflächengeschwindigkeit an. Damit ist $\sigma = 1$. Bei umgekehrten Bedingungen gilt $\sigma < 1$. Bei Frequenzen,

E DIN IEC 61973 (VDE 0553-973):2008-01

bei denen die Wellenlänge der schwingenden Konstruktion etwa gleich der Wellenlänge in Luft ist, kann σ größer als 1 werden, siehe 10.2.3.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, steigt die Schalleistung mit der vierten Potenz des Laststromes an. Damit können Ergebnisse mit einer Prüfbelastung direkt erzielt werden, was sehr praktisch ist, weil Betriebsströme im Labor oft nur schwierig nachzubilden sind. Unter der Annahme von Linearität kann der beim Strom I_1 gemessene Schalleistungspegel L_{w1} auf einen anderen Strom I_2 wie folgt skaliert werden:

$$L_{w2} = L_{w1} - 40 \lg \left(\frac{I_2}{I_1} \right) \quad (6.7)$$

Dabei ist:

L_{w1} der Schalleistungspegel in dB bei Laststrom I_1 ;

L_{w2} der Schalleistungspegel in dB bei Laststrom I_2 .

Der gesamte Schalleistungspegel einschließlich aller Schallfrequenzen wird durch logarithmische Addition (siehe Abschnitt 3) abgeleitet. Das Schallfrequenzspektrum hängt vom Laststromspektrum der Drossel ab und damit noch stark von der Anwendung der Drossel, wie nachfolgend beschrieben.

6.3.3 Wechselstrom-Filterkreisdrosseln

Als Beispiel zeigt Bild 6.5 das vereinfachte Stromspektrum einer Wechselstrom-Filterkreisdrossel. Es wird angenommen, dass der Strom aus einer Komponente mit der Grundfrequenz f und einer Oberschwingungskomponente mit der Ordnungszahl h besteht. In der Praxis hat der Strom immer mehr als eine Oberschwingungskomponente.



Bild 6.5 – Beispiel eines Spektrums von Strömen durch eine Wechselstrom-Filterkreisdrossel

Bild 6.6 stellt die Kraftkomponenten dar, die auf die Wicklung der Drossel wirken. Die Kraft besteht aus einer statischen Vorbelastung und Komponenten mit den Frequenzen $2f$, $f(h-1)$, $f(h+1)$ und $2fh$, wobei nur die Komponenten der Schwingungskraft Geräusche erzeugen, die statische Vorbelastung beeinflusst die Schalleistung nicht.

Beim Übergang von der elektrischen Last zur elektrischen Kraft findet eine Frequenzverschiebung statt und die Anzahl der Kraftkomponenten ist gleich der Anzahl der Lastkomponenten zum Quadrat. Das Schallfrequenzspektrum steigt damit stark an, wenn das Stromspektrum der Drossel mehrere Oberschwingungen umfasst.

Wie jede mechanische Konstruktion besitzt eine Drossel mit verteilten Masse- und Konstruktionsmerkmalen eine unendliche Anzahl von konstruktiven Resonanzen. Wenn eine oder mehrere Frequenzen des Kraftspektrums mit diesen konstruktiven Frequenzen zusammenfallen, können eine Schwingungsverstärkung der Einrichtung und damit eine verstärkte Schallerzeugung eintreten. Für eine genaue Beschreibung des akustischen Verhaltens von Filterkreisdrosseln müssen also sowohl die Grundschwingung als auch der Oberschwingungsanteil des Stromes berücksichtigt werden.

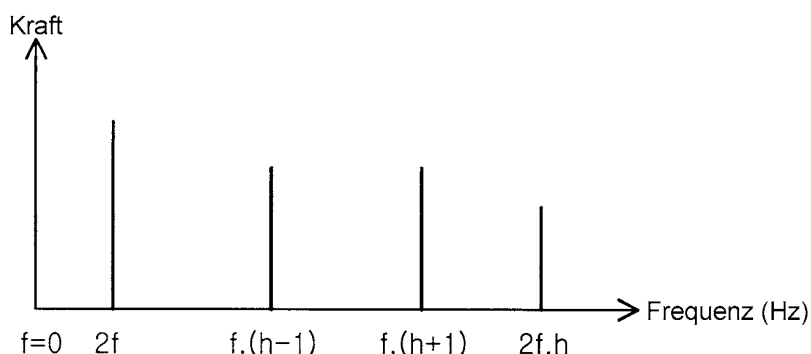


Bild 6.6 – Beispiel für ein Kraftspektrum, das auf die Drosselwicklung wirkt

6.3.4 HGÜ-Glättungsdrosseln

Die wichtigsten Geräuschkomponenten, die von einer Wicklung einer Trocken-Glättungsdrossel mit Luftkern abgestrahlt werden, werden durch die Schwingung der Wicklung aufgrund der Wechselwirkung des Gleichstromes mit den Oberschwingungsströmen verursacht. Da moderne Stromrichterstationen im Allgemeinen mit 12-Puls-Brücken arbeiten, sind die wichtigsten Oberschwingungen die der 12. und der 24. Ordnung. Damit sind für 50-Hz-Wechselstromnetze die entsprechenden Frequenzen 720 Hz und 1 440 Hz.

Als Beispiel zeigt Bild 6.7 das vereinfachte Stromspektrum einer HGÜ-Glättungsdrossel. Es wird angenommen, dass der Strom aus einer Gleichstromkomponente und einer Oberschwingung der Netzfrequenz mit der Ordnungszahl h besteht. In der Praxis hat der Strom immer mehr als eine Oberschwingungskomponente.



Bild 6.7 – Beispiel eines Spektrums von Strömen durch eine HGÜ-Glättungsdrossel

Bild 6.8 stellt die Kraftkomponenten dar, die auf die Wicklung der Drossel wirken. Die Kraft besteht aus einer statischen Vorbelastung und Schwingungskomponenten mit den Frequenzen fh und $2fh$.

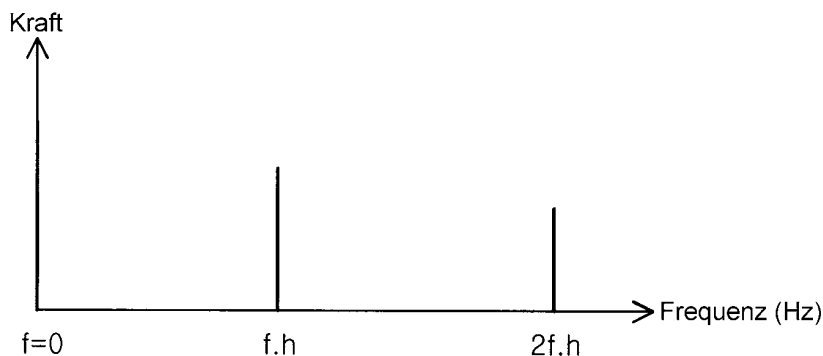


Bild 6.8 – Beispiel für ein Kraftspektrum, das auf die Drosselwicklung wirkt

E DIN IEC 61973 (VDE 0553-973):2008-01

Die statische Vorbelastung (Feldstärke mit der Frequenz $f = 0$) beeinflusst die Gesamtgeräusche praktisch gar nicht.

6.3.5 Selbstabstimmende Filterkreisdrosseln

Wechselstromfilter benötigen zur Begrenzung der Folgen einer Filterverstimmung eine bestimmte Bandbreite. Selbstabstimmende Filterkreisdrosseln können so eingestellt werden, dass sie Frequenzabweichungen und Bauteilschwankungen folgen. Diese Drosseln besitzen einen Eisenkern mit einer Steuerwicklung, siehe Bild 6.9. Der Gleichstrom in der Steuerwicklung beeinflusst die Permeabilität des Kerns und verändert die Induktivität der Drossel. Das Wechselstromkabel ist auf einen Glasfaserzylinder gewickelt, der den Eisenkern umgibt. Die gesamte Drossel wird von einer Schallabschirmung umschlossen.

Schallmessungen haben gezeigt, dass sich die Drossel bei Wechselstrom im Wesentlichen wie eine herkömmliche Drossel mit Luftkern verhält. Gleichstrom zusammen mit Wechselstrom erzeugt Kräfte mit der in Bild 6.8 angegebenen Wechselstromfrequenz. Somit beeinflusst eine Änderung des Gleichstromes nur den Schall bei der Wechselstromfrequenz (und verdoppelt z. B. die Wechselstromfrequenz nicht). Bei einer Frequenz von 0 Hz erfolgt keine Schallabstrahlung.

Die abgestrahlte Schallleistung scheint von radialen Schwingungen des Glasfaserzylinders bestimmt zu werden und nicht, wie bei Drosseln mit Luftkern festgestellt, von den radialen Schwingungen der (Wechselstrom-) Wicklung. Siehe auch Abschnitte 9 und 10.

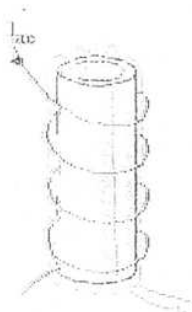


Bild 6.9 – Drossel für selbstabstimmende Filteranwendungen

6.4 Kondensatoren

6.4.1 Bauart und Ausführung von Kondensatoren

Nach Transformatoren und Drosseln sind Kondensatoren die Hauptgeräuschquellen in HGÜ-Stationen. Kondensatoren werden in einem HGÜ-System für verschiedene Funktionen eingesetzt, wie in Wechselstrom- und Gleichstromfiltern, bei der Blindleistungskompensation, in Hochspannungskreisen mit Trägerfrequenzen und als kapazitive Spannungstransformatoren.

Kondensatoren in Filtern und zur Blindleistungskompensation sind gewöhnlich als Kondensatorsäulen von Leistungskondensatoren (Becherkondensatoren) ausgeführt. Andere Kondensatorbauarten mit Porzellan-gehäuse dienen als Kopplungskondensatoren in Hochspannungskreisen mit Trägerfrequenzen und als kapazitive Spannungstransformatoren für Mess- und Schutzzwecke. An Standorten mit begrenztem Raum, verschmutzter Umgebung und/oder häufigen Erdbeben dürfen ummantelte Kondensatoren benutzt werden.

Im Allgemeinen sind es die Becherkondensatoren, die hinsichtlich der Geräuschgrenzwerte betrachtet werden müssen. Aus diesem Grund bezieht sich die folgende Beschreibung der Kondensatorausführung in erster Linie auf Becherkondensatoren.

Für die Erklärung des Mechanismus der Schallerzeugung müssen die Ausführung eines Kondensators und einige Begriffe erklärt werden. Eine Kondensatorsäule besteht aus einer Anzahl von Becherkondensatoren. Ein Becherkondensator ist ein mit Stahl umhüllter Kondensator mit Durchführungen. Jeder Becherkondensator ist mit Öl gefüllt und enthält ein Paket aus einer Anzahl von Kondensatorelementen, die in Reihe oder

parallel geschaltet sind (siehe Bild 6.10). Die Kondensatorelemente bestehen aus einer Wicklung von zwei Aluminiumfolien und einer Anzahl von Kunststoff- oder Papierschichten mit einer bestimmten Länge.

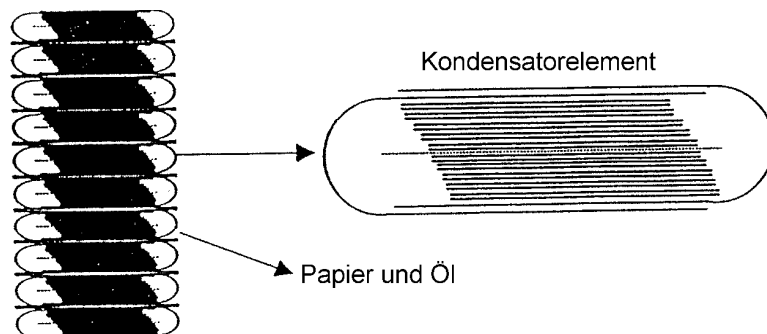


Bild 6.10 – Paket aus Kondensatorelementen

Die Ausführung der Kondensatorelemente und der Pakete von Kondensatorelementen aus Kondensatoren in Porzellangehäusen wie Kopplungskondensatoren und kapazitiven Spannungstransformatoren ist grundsätzlich gleich. Deshalb bezieht sich der nachfolgend beschriebene Mechanismus der Schallerzeugung auf alle Kondensatorbauarten.

6.4.2 Mechanismus der Schallerzeugung

Der Schnitt durch ein unter Spannung stehendes Kondensatorelement (siehe Bild 6.11) zeigt, dass die meisten der die Ladung tragenden Aluminiumfolien im Kräftegleichgewicht sind, weil sich auf jeder Seite eine anziehende Folie befindet. Die einzigen Folien, die sich nicht im Gleichgewicht befinden, sind diejenigen an den Kanten (Kraft F_1) und in der Mitte des Kondensatorelementes (Kraft F_2). Da die Steifigkeit der dünnen Ölschicht in der Mitte des Kondensatorelementes sehr hoch ist, heben sich die Kräfte in der Mitte mit einer sehr kleinen Verschiebung auf. Die auf das Kondensatorelement einwirkenden Nettokräfte sind dann die Kräfte an den Kanten.

Die am stärksten zur Erzeugung von Geräuschen beitragenden Teile sind damit die Ober- und die Unterseite des Kondensatorelementes. Dies gilt auch für Pakete von Kondensatorelementen. Das mechanische Verhalten wird also von der ersten Längsresonanz im Paket bestimmt. Die Schallerzeugung erfolgt im Wesentlichen eindimensional und die Schallabstrahlung ist hauptsächlich auf die Fläche senkrecht zur Längsrichtung des Paketes der Kondensatorelemente begrenzt.

Die Berechnung der Kraft kann nach der Gleichung für Kondensatorplatten unter Anwendung der Ableitung der Energie bezogen auf den Abstand zwischen den Platten (Theorem der virtuellen Verschiebung) erfolgen:

$$F = \frac{dW}{dx} \quad (6.8)$$

Dabei ist:

W die im Kondensator gespeicherte Energie in W;

x der Abstand zwischen den Kondensatorplatten in m.

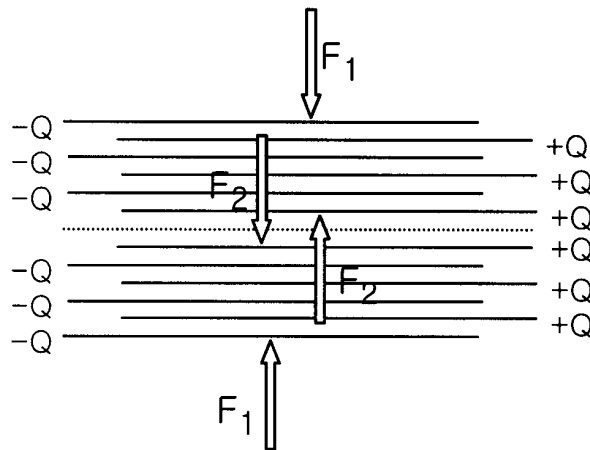


Bild 6.11 – Kräfte in einem Kondensatorelement

Die Gleichung für die in einem Kondensator gespeicherte Energie ist:

$$W = \frac{U^2 C}{2} \quad (6.9)$$

Dabei ist:

U der Effektivwert der Spannung über dem Kondensator in V;

C die Kapazität in F.

Die Kraft kann dann wie folgt berechnet werden:

$$F = \frac{U^2 C}{2x} \quad (6.10)$$

Wenn U eine sinusförmige Spannung ist, gilt:

$$U(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad (6.11)$$

Die Kraft setzt sich aus einer statischen Kraft und einer Schwingungskraft (Oberschwingung) zusammen. Es ist auch noch zu beachten, dass sich das Schallfrequenzspektrum stark erweitert, wenn das Spannungsspektrum mehrere Oberschwingungen umfasst.

Als Beispiel zeigt Bild 6.12 das vereinfachte Spannungsspektrum eines Wechselstrom-Filterkreiskondensators. Es wird angenommen, dass das Spannungsspektrum aus einer Komponente mit der Grundfrequenz f besteht und aus einer Oberschwingungskomponente mit der Ordnungszahl h . In der Praxis umfasst die Spannung immer mehr als eine Oberschwingungskomponente.

Beim Übergang von der Spannungsbeanspruchung zur Kraft tritt eine Frequenzverschiebung auf und die Anzahl der Kraftkomponenten entspricht der Anzahl der Spannungskomponenten zum Quadrat. Die in den Paketen der Kondensatorelemente wirkenden Kräfte verursachen schließlich Schwingungen des Stahlgehäuses der Kondensatorumhüllung und damit Geräusche, die als Luftschall abgestrahlt werden.

Zur Berechnung der Schallleistung und des Schallleistungspegels bei einer bestimmten Schallfrequenz kann Gleichung (6.3) benutzt werden. Bei Betrachtung aller Gleichungen kann außerdem abgeleitet werden, dass die Schallleistung proportional zur vierten Potenz der Spannungsbeanspruchung des Kondensators ist.

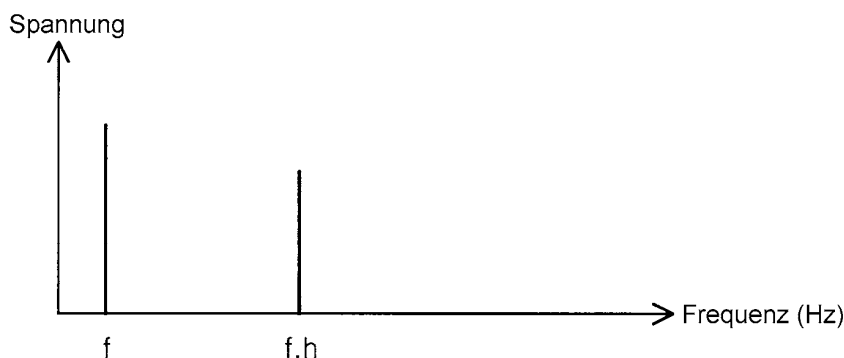


Bild 6.12 – Beispiel für ein Spannungsspektrum über einem Kondensator

Bild 6.13 stellt die Komponenten der Schwingungskraft dar, die auf die Wicklung des Kondensators einwirken. Die Kraft besteht aus Komponenten mit den Frequenzen $2f$, $f(h-1)$, $f(h+1)$ und $2fh$.

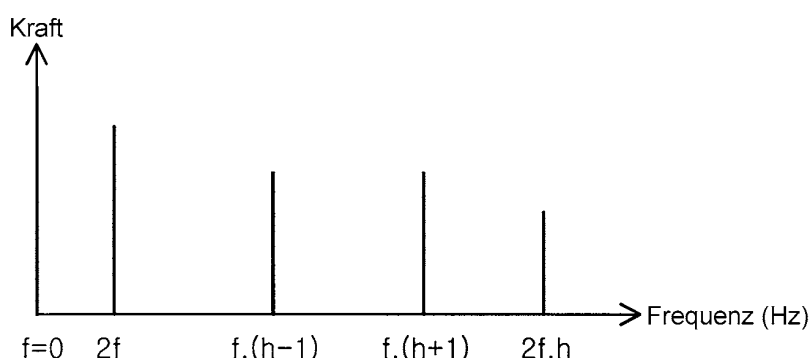


Bild 6.13 – Beispiel für ein Spektrum der elektrostatischen Kräfte in einem Kondensator

Zur Bestimmung des Schallleistungspegels der gesamten Kondensatorsäule können die Schallleistungspegel aller Kondensatoreinheiten als nicht miteinander in Wechselwirkung stehende Schallquellen addiert werden:

$$L_{W_{\text{stack}}} = L_{W_{\text{unit}}} + 10 \lg(n) \quad (6.12)$$

Dabei ist:

$L_{W_{\text{stack}}}$ der Leistungspegel der vollständigen Kondensatorsäule in dB;

$L_{W_{\text{unit}}}$ der Schallleistungspegel einer Kondensatoreinheit in dB;

n die Anzahl der Kondensatoreinheiten.

Die Abstrahlung einer Schallleistung von einer Kondensatorsäule hängt im Wesentlichen ab von:

- Grundswingungs- und Oberswingungsspannungen über den Kondensatoren;
- der mechanischen Steifigkeit;
- mechanischen Resonanzfrequenzen (von Paketen von Kondensatorelementen, vom Gehäuse und vom Gestell);
- der Anzahl der Kondensatoreinheiten;
- der Lage/Anordnung der Einheiten/Gestelle.

Die für die abgestrahlte Schallleistung sowie für den Schallleistungspegel angegebenen Gleichungen gelten nur für eine einzige Schallfrequenz.

Der gesamte Schallleistungspegel, der alle Schallfrequenzen berücksichtigt, wird durch logarithmische Addition ermittelt (siehe Abschnitt 3). Das Schallfrequenzspektrum hängt vom Frequenzspektrum der Spannungen über dem Kondensator ab.

6.5 Kühlgebläse

Zur Kühlung von Thyristorventilen werden gewöhnlich Zwangsluftkühler eingesetzt. Sie bestehen aus Wärmetauschern (mit Kühlmedien wie Wasser/Ethylenglykol und Luft) und Axialgebläse. Gewöhnlich werden je Kühlermodul mehrere Gebläse benutzt. Die Gebläse werden voneinander durch eine Zwischenwand getrennt. Damit wird eine stufenweise Steuerung der Kühlerkapazität (kW-Kapazität) ermöglicht, indem je nach dem Kühlbedarf jedes Gebläse nacheinander ein- und ausgeschaltet wird.

Durch Auswahl der optimalen Kühlergröße für eine bestimmte Anwendung, der optimalen Gebläsedrehzahl (gewöhnlich zwischen mehreren Hundert und 1 000 Umdrehungen je Minute) und der Anzahl der Gebläse kann der Geräuschpegel gering gehalten werden. Geräuscharme Axialgebläse mit großen Durchmessern, die mit geringen Drehzahlen betrieben werden, können die abgestrahlten Geräusche verringern. Zur Drehzahlregelung können zweifach drehzahlumschaltbare Motoren oder Motoren mit Frequenzsteuerung benutzt werden. Die Hersteller können die akustische Auslegung des Kühlers optimieren, indem geeignete genormte Kühlermodule miteinander kombiniert werden, für die die akustischen Bemessungsdaten bekannt sind.

Für Stromrichtertransformatoren in offener Bauweise mit bestimmungsgemäßer akustischer Auslegung sind die Geräusche der Kühleinrichtung unerheblich. Bei Stromrichtertransformatoren mit Gehäuse oder bei geräuscharmen Stromrichtertransformatoren muss die durch die Kühlgebläse erzeugte zusätzliche Schallleistung berücksichtigt werden.

Die Kühlung von Transformatoren mit sehr hohen Bemessungsleistungen kann eigene Kühlerbänke erforderlich machen. Derartige freistehende Kühler sind außerdem vorteilhaft, da sie die Umhüllung der Transformatoren selbst erlauben.

6.6 Andere Schall emittierende Quellen

6.6.1 Schaltgeräte

Im Gegensatz zu den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Bauteilen erzeugen Schaltgeräte wie Leistungs- und Trennschalter nur bei einer Betätigung Geräusche. Diese Geräusche treten kurzzeitig auf, können aber das Eigengeräusch stark überschreiten. Das durch das Öffnen und/oder Schließen eines Leistungsschalters erzeugte Geräusch wird als spontanes Geräusch eingeordnet. Die Dauer eines einzelnen Schallimpulses ist gewöhnlich kürzer als 1 s.

Ein Ansatz zur Bewertung eines spontanen Geräusches ist die Angabe dieses Geräusches als äquivalenter Dauergeräuschpegel. Der äquivalente A-bewertete Dauerschallleistungspegel eines Geräusches in einem Zeitintervall T kann aus den A-bewerteten Schallleistungspegeln während der Intervalle T_i nach Gleichung (6.13) abgeleitet werden. Es gibt jedoch keine Normwerte für T_i . Die Werte für T_i sollten so gewählt werden, dass eine angemessene Beschreibung des spontanen Ereignisses erfolgt, z. B. für Luftschalter oder Erdungsschalter 10 s, siehe 7.2.6.

$$L_{WAeq} = 10 \lg \left[\left(\frac{1}{T} \right) \sum T_i 10^{0,1 L_{WAeq, T_i}} \right] \text{ (dB)} \quad (6.13)$$

Dabei ist:

L_{WAeq} der äquivalente A-bewertete Dauerschallleistungspegel in dB im Zeitintervall T (Bezugswert 1 pW);

T das gesamte Zeitintervall ($T = \sum T_i$) in s;

L_{WAeq, T_i} der äquivalente A-bewertete Dauerschallleistungspegel in dB im Zeitintervall T_i (Bezugswert 1 pW);

T_i Zeitintervall in s, in dem das Geräusch mit dem Pegel (L_{WAeq, T_i}) auftritt.

Abhängig von der Festlegung des gesamten Zeitintervalls T dürfen zur Bewertung der Einflüsse auf die Umgebung unterschiedliche A-bewertete Größen angewendet werden wie

- der äquivalente Dauerschallpegel;

- der mittlere Schallpegel am Tag;
- der mittlere Schallpegel in der Nacht;
- der mittlere Schallpegel für den ganzen Tag mit einem dB-Addierglied für den Schallpegel in der Nacht;
- der mittlere stündliche Schallpegel.

Gewöhnlich hat das durch Schaltgeräte erzeugte Geräusch keinen wesentlichen Einfluss auf den gesamten Geräuschpegel einer HGÜ-Station, da der summierte Geräuschanteil im Vergleich zu Quellen, die ein Dauergeräusch erzeugen, relativ gering ist. In vielen Fällen werden Leistungsschalter nur wenige Male im Jahr betätigt, mit der Ausnahme von Leistungsschaltern von Filterbänken, die mehrmals täglich betätigt werden können. Der summierte Geräuschanteil an einem Arbeitstag muss jedoch innerhalb der Grenzwerte für den Schallpegel liegen, die zur Begrenzung der Gefahr des Verursachens von Hörschäden für das Personal am Standort aufgestellt wurden. Diese Grenzwerte, die örtlichen Sicherheitsvorschriften entnommen werden können, hängen von der summierten Dauer der Schalleinwirkung ab und sind für höherfrequenten Schall gewöhnlich geringer.

Der bei einem Schaltvorgang erzeugte Schallimpuls hängt von der Schalterart (z. B. Druckluft-Leistungsschalter, Öl- und SF₆-Leistungsschalter) sowie vom Betätigungsmechanismus des Schalters (z. B. Federbetätigung, hydraulische Betätigung) ab. Der Schallpegel ist bei Druckluft-Leistungsschaltern am höchsten, während moderne SF₆-Leistungsschalter einen relativ geringen Schallpegel erzeugen.

Luftschalter und Erdungsschalter erzeugen abhängig von der Spannung über dem erzeugten oder geschlossenen Luftspalt bis zu 10 s lang starke Schallpegel.

6.6.2 Phasenschieber

Phasenschieber sind darauf ausgerichtet, dass sie ständig betrieben werden, und sie werden in vorgefertigten schalldichten und witterungsbeständigen Einhausungen eingebaut. Es bleibt ein Restgeräusch von Betriebsmitteln innerhalb der Einhausung wie von Erregermaschinen, Schleifring/Bürsten-Baugruppen und Zusatztransformatoren bestehen. Das stärkste von einem eingehausten Phasenschieber erzeugte Geräusch ist jedoch das von der Kühlanlage erzeugte Geräusch. Damit gelten die für Kühlgebläse aufgeführten Schallfaktoren auch für diesen Fall.

6.6.3 Dieselgeneratoren

Da es unwahrscheinlich ist, dass Dieselgeneratoren für lange Zeiträume betrieben werden und sie fast immer in einem Gebäude eingeschlossen sind, kann nur der Schallpegel durch Ablüfter außerhalb des Gebäudes beträchtlich sein. Dieselgeneratoren werden nur gelegentlich betrieben, entweder für Routineprüfungen oder unter Notfallbedingungen. Routineprüfungen können auf die Zeit am Tage in einer normalen Arbeitswoche beschränkt werden und somit können geräuschempfindliche Perioden im Großen und Ganzen gemieden werden.

6.6.4 Klimaanlage

Während das unmittelbare Geräusch einer Klimaanlage im Allgemeinen in einem Gebäude erzeugt wird, kann immer noch ein beträchtlicher Restschall vorliegen, der von den Belüftern und Ablüftern abgestrahlt wird. Der von diesen Quellen abgestrahlte Schall umfasst Luftströmungsgeräusche, Geräusche durch die Belüftungsklappen und Eigengeräusche der Klimaanlage, obwohl Schallschutzgitter vorhanden sind. Hinsichtlich der von den Gebläsen der Klimaanlage erzeugten Geräusche gelten die in 6.5 angegebenen Faktoren.

6.6.5 Kühlkreispumpen

Wenn Kühlkreispumpen im Freien angeordnet werden, müssen sie in die Betrachtungen des Geräuschmanagements einbezogen werden.

6.6.6 Ventile im Freien

Da in diesem Abschnitt nur diejenigen Bauteile beschrieben sind, die einen Schall in das die HGÜ-Station umgebende Gebiet abstrahlen, wird das akustische Verhalten der Thyristorventile nicht beschrieben, weil diese fast immer in Gebäuden eingebaut sind. Die Geräusche der Ventile selbst werden in erster Linie durch magnetische Bauteile wie Ventildrosseln (Ventilbeschaltungs-drosseln) erzeugt. Die Kühler der Thyristorventile befinden sich jedoch im Allgemeinen im Freien und es gelten die in 6.5 erläuterten Anforderungen.

In dem seltenen Fall, dass im Freien ummantelte Ventile errichtet wurden, können die Gebläse der Kühleinrichtung auch eine vorherrschende Schall emittierende Quelle darstellen und damit gelten wiederum die Bedingungen für Gebläsegeräusche.

6.6.7 Koronaentladungsquellen

Praktisch alle Hochspannungsverbindungen senden einen bestimmten Koronaentladungspegel aus. Aus anderen Gründen als nur dem Schall (z. B. Hochfrequenzstörungen und Gefahr eines Überschlages) sollten Koronaentladungen auf geringen Pegeln gehalten werden und hohe Koronaentladungspegel sollten Abhilfemaßnahmen auslösen.

Besonders an anfälligen Standorten kann es erforderlich sein, Koronaentladungspegel durch folgende Verfahren zu unterdrücken:

- Anwendung von geeigneten Elektrodenanordnungen für die Auslegung des Umrisses der Bauteile;
- verlängerte Luftstrecken zwischen Phasen, Sammelschienen und Bauteilen;
- Einsatz von Kabeln oder gasisolierten Sammelschienen.

6.7 Typische Schallleistungspegel von Schall emittierenden Quellen

Die nachfolgend für die Schallleistung von Bauteilen angegebenen Zahlen beruhen auf der „Normausführung“ jedes Bauteils. Zu einer modernen Normausführung gehört die Anwendung allgemein anerkannter Verfahren zur internen Geräuschminderung wie z. B. die Vermeidung kritischer mechanischer Resonanzen. Die angegebenen Zahlen für die Schallleistung berücksichtigen jedoch nicht die Anwendung äußerer Geräuschminderungsmaßnahmen wie Schallschirme, Einhausungen usw.

Tabelle 6.1 – Beispiele für Schalleistungspegel von Bauteilen

Schall emittierende Quelle	Schalleistung des Bauteils $L_{W(A)}$ in dB(A)
HGÜ-Stromrichtertransformator	
– Nennlast	100 bis 125
– Leerlauf	90 bis 110
HGÜ-Glättungsdrossel	85 bis 100
Selbstabstimmende Filterkreisdrosseln	90 bis 100
Wechselstrom-Filterkreisdrosseln	70 bis 90
Wechselstrom-Filterkondensatorsäulen (Becherkondensatoren)	60 bis 105
Kühlgebläse (Zwangsluftkühler für die Ventilkühlung)	
– Gebläsedrehzahl etwa 300 Umdrehungen je min, Kühlkapazität 30 kW/300 kW	etwa 55/85
– Gebläsedrehzahl etwa 900 Umdrehungen je min, Kühlkapazität 500 kW/1 300 kW	etwa 90/105
Schaltgeräte	(spontanes Geräusch)
– Druckluft-Leistungsschalter	150 bis 160
– Öl- und SF ₆ -Leistungsschalter	105 bis 130

7 Schallminderungsmaßnahmen

Wenn Bauteile vorhanden sind, die maßgebliche Schallpegel erzeugen, die die Geräuschgrenzwerte überschreiten, ist es erforderlich, Schallminderungsmaßnahmen einzuleiten. Dies ist bei HGÜ-Stationen im Allgemeinen der Fall.

Im Idealfall sollte die Schallminderung Teil der Erstausslegung sein und aus einer Kombination von Entwicklungsverfahren der Station und Konstruktionsmaßnahmen der Bauteile bestehen. Das Ziel ist die Verbindung beider Verfahren zur Erarbeitung eines wirksamen und kostengünstigen Entwurfs.

Häufig sind Kapselung und Abschirmung erforderlich, um den Schall in einem Gebiet einzuschließen, in dem hohe Schallpegel zulässig sind. Bei Messungen nach der Errichtung des Betriebsmittels können Nachrüstungsmaßnahmen zur Schallminderung erforderlich sein. Diese können in weiteren Abschirmungen, einer weiteren Einkapselung und auch in aktiven Geräuschminderungsverfahren bestehen.

Weitere Informationen zu Schallminderungsverfahren sind in anderen Dokumenten angegeben (siehe „Transformer noise attenuation in substation, CIGRE report 23.10, August 1980“ und „IEEE C57.136, Draft 9, January 1999 – Guide for sound level abatement and determination for liquid-immersed power transformer and shunt reactors over 500 kVA“).

7.1 Anordnung der Station

Es sollte der größtmögliche Abstand zwischen dem für Schall emittierende Bauteile vorgesehenen Gebiet und dem für Schall empfindlichen Gebiet gewählt werden. Diese Anforderung kann durch die Anordnung von maßgeblichen Schall erzeugenden Bauteilen in einer Art und Weise erfüllt werden, dass die Ausbreitung von Schallwellen in schallkritische Richtungen verhindert wird, indem die natürliche Topografie des Gebietes oder Abschirmungswirkungen der Stromrichtereinrichtung und anderer Gebäude ausgenutzt werden.

Einige der Hauptschallquellen, vor allem Pumpen- und Thyristorventile, sind Betriebsmittel, die in Innenräumen eingesetzt werden, und die Geräuschuntersuchungen beziehen sich hier auf die Auswirkungen auf Arbeiter und Besucher der Stromrichterstation. Im Allgemeinen wird der durch diese Bauteile aus diesen

E DIN IEC 61973 (VDE 0553-973):2008-01

Räumen emittierte Schall nicht als Belästigung wahrgenommen und wenn während des Betriebs ein Zugang für eine Inspektion erforderlich ist, werden Ohrenschützer als annehmbare Maßnahme betrachtet. Spezielle Informationen können örtlichen Gesundheits- und Sicherheitsrichtlinien entnommen werden.

Allgemeine Schallminderungsmaßnahmen, die sich für den gesamten Standort als wirksam erweisen können, sind:

- Umgeben des Standortes entweder mit einer Mauer oder mit einem hohen Erdwall;
- Anlegen des Standortes in einem Talkessel vorzugsweise ohne steile Felswände.

7.1.1 Transformatoren und ummantelte Drosseln

Hinsichtlich der Gestaltung beruhen die für Transformatoren und ummantelte Drosseln ergriffenen Schallunterdrückungsmaßnahmen auf dem Konzept, den Schall in einer Einhausung einzuschließen (Absorption der Schallenergie im Prozessablauf z. B. mit einer bestimmten Auskleidung wie Steinwolle). Eine Alternative wäre die Abstrahlung in einer bestimmten Richtung, in der er einen zulässigen Störpegel verursacht.

Auf diese Weise ist es in bestimmten Fällen möglich, eine Ausrichtung der Stromrichtereinhausung und von Stromrichtertransformatoren und sogar der gesamten Stromrichterstation in Betracht zu ziehen, um ein schallempfindliches Gebiet vor Transformatorgeräuschen abzuschirmen.

Die Verbindungen von Stromrichtertransformatoren und ummantelten Gleichstromdrosseln mit dem Stromrichter werden in modernen HGÜ-Anlagen häufig über Durchführungen realisiert, die direkt durch die Wand der Stromrichterhalle geführt werden. Folglich besteht in einer Richtung eine hochwirksame Barriere für die Schallübertragung, sofern die Stromrichterhalle bedeutend höher ist als der Transformator oder die Drossel.

Häufig besteht die Forderung nach Feuerschutzwänden zwischen Transformatoren oder sogar um Transformatoren herum und diese können auch eine wirksame Schalldämpfung bieten – wieder unter der Voraussetzung, dass sie im Vergleich zum Transformator/zur Drossel hoch genug sind. Wenn kein vollständiges Gehäuse vorgesehen ist, muss beachtet werden, dass ein Teilgehäuse aufgrund von Resonanz- und/oder Reflexionswirkungen zu einer Verstärkung der Geräusche in einer bestimmten ungeschützten Richtung führen kann.

7.1.2 Drosseln mit Luftkern

Drosseln mit Luftkern können maßgebliche Schallerzeuger sein, besonders solche in Filtern. Im Unterschied zu Transformatoren können sie nicht einfach umhüllt werden, da sie zur Kühlung eine ungehinderte Luftbewegung erfordern.

Vom Standpunkt der Standortanordnung aus gibt es zwei Möglichkeiten für Drosseln mit Luftkern:

- Anordnung in einem praktisch größtmöglichen Abstand zu schallempfindlichen Gebieten; da sich viele Drosseln in Oberschwingungsfiltern befinden, besteht hinsichtlich der Auslagerung eine bestimmte Flexibilität;
- Anordnung an einem Ort mit Stromrichtergebäuden (und anderen Standortgebäuden) zur Abschirmung schallempfindlicher Gebiete gegen unzulässige Schallpegel.

7.1.3 Kondensatoren

In bestimmten Fällen können Kondensatoren maßgebliche Schallerzeuger sein und sie können im Hinblick von auf der Anordnung basierenden Schallminderungsverfahren auf die gleiche Weise behandelt werden wie Drosseln mit Luftkern.

Die Kondensatorsäulen in HGÜ-Filtern besitzen große Abmessungen und ein kompliziertes Abstrahlungsmuster. Kondensatorsäulen können eine deutlich ausgeprägte Richtwirkung aufweisen und somit können der Ort, die Ausrichtung und das Abschirmungsverfahren hinsichtlich der akustischen Auslegung der HGÜ-Station optimiert werden.

7.1.4 Kühlgebläse

In vielerlei Hinsicht gelten für Kühlgebläse die gleichen Betrachtungen wie für Drosseln mit Luftkern. Der wesentliche Punkt ist der, dass bestimmte Gebläse vom Standpunkt der Schallemission aus stark gerichtet sind. Damit ergibt sich die zusätzliche Möglichkeit der Anordnung der Gebläse in einer Richtung, in der die Schallpegel weniger störend wirken.

7.1.5 Dieselgeneratoren

Bei einem Dieselgenerator ist die Hauptgeräuschquelle gewöhnlich der Ablüfter (wie in 6.3 beschrieben). In diesem Fall erfolgt eine weitere Schallminderung hinsichtlich der Standortanordnung wie bei Drosseln mit Luftkern und in Abhängigkeit von der Standortgröße und der Anordnung der Gebäude.

7.1.6 Schaltgeräte

Obwohl Schaltgeräte bei ihrer gelegentlichen Betätigung einen maßgeblichen Schallpegel erzeugen, ist dies im Allgemeinen zulässig und unterscheidet sich nicht von der Situation einer herkömmlichen Station. An besonders schallempfindlichen Orten können Untersuchungen zur Anordnung der Schaltanlage in einem Gebäude erforderlich sein.

7.1.7 Klimaanlage

Während das direkte Geräusch von Klimaanlage im Allgemeinen in einem Gebäude eingeschlossen ist, liegt immer noch ein wesentlicher Restschall von Belüftern und Ablüftern vor. Obwohl der von diesen Quellen abgestrahlte Schall nicht nur Luftströmungsgeräusche sondern auch Geräusche durch die Belüftungskappen (es sei daran erinnert, dass Schallschutzgitter vorhanden sind) und Restgeräusche von der Klimaanlage umfasst, gelten im Allgemeinen die gleichen Konzepte wie für Gebläse.

7.1.8 Koronaentladungsquellen

Praktisch alle Hochspannungsverbindungen senden einen bestimmten Koronaentladungspegel aus. Aus anderen Gründen als nur Geräuschen sollten Koronaentladungen auf geringen Pegeln gehalten werden und hohe Teilentladungspegel sollten Abhilfemaßnahmen auslösen.

An besonders anfälligen Standorten kann es erforderlich sein, sogar normalerweise zulässige Koronaentladungspegel durch folgende Verfahren zu unterdrücken:

- Anwendung von geeigneten Elektrodenanordnungen für die Auslegung des Umrisses der Bauteile;
- verlängerte Luftstrecken zwischen Phasen und Sammelschienen;
- Einsatz von Kabeln oder gasisolierten Sammelschienen.

7.1.9 Phasenschieber

Wie in 6.2.2 beschrieben, ist das maßgeblichste Geräusch eines umhüllten Phasenschiebers das von der Kühlanlage erzeugte Geräusch. Damit gelten die für Kühlgebläse aufgeführten Faktoren auch für diesen Fall.

7.2 Konstruktion der Bauteile

Bei geräuscharmen Konstruktionen von Betriebsmitteln wird gewöhnlich versucht, die Schwingungsamplitude der Schall abstrahlenden Flächen des Bauteils so gering wie möglich zu halten. Dazu muss das Betriebsmittel so konstruiert werden, dass sich dessen Eigenfrequenzen nicht mit den Frequenzen der Haupterregungskräfte decken.

Der Vorgang der Schallerzeugung ist im Einzelnen im Hauptabschnitt 6 beschrieben, dieser Hauptabschnitt hebt die Konstruktionsmerkmale hervor, die zu einem Betriebsmittel führen, das weniger Schall erzeugt.

Ein Verfahren zur Schallminderung besteht bei vielen Betriebsmitteln in einer elastischen Aufstellung. Dabei wird die Ausbreitung von niederfrequentem Schall durch Schwingungsentkopplung begrenzt.

7.2.1 Transformatoren und ummantelte Drosseln

Viele Konstruktionsmaßnahmen zur Schallminderung sind grundlegende Aspekte der Transformator- und Drosselkonstruktion, z. B.:

- moderne Kernwerkstoffe;
- Betrieb mit geringerem magnetischen Fluss;
- Anwendung moderner Fügeverfahren für den Kern;
- Vermeiden kritischer mechanischer Resonanzen;
- Maßnahmen zur mechanischen Dämpfung sowohl im Kessel als auch in der Anlage;
- bessere Kontrolle der Fertigungstoleranzen;
- Verwendung geräuscharmer Gebläse (siehe 7.2.4);
- der Einsatz gesonderter Kühlerbänke kann die Forderung nach einer Zwangsluftkühlung entschärfen und die Umhüllung des Transformators ermöglichen.

7.2.2 Drosseln mit Luftkern

Das Hauptziel bei der Kontrolle der Geräusche von Drosseln ist die Begrenzung der Schwingung der Wicklungen. Typische Verfahren dafür sind:

- Anpassung physikalischer Maße, Abstandshalter und mechanische Auflagen, um die Resonanzfrequenzen von den kritischen Frequenzen wegzubewegen;
- Einsatz größerer Leiterquerschnitte (zur Erhöhung der Trägheit und damit zur Verringerung der Schwingungsamplitude). Dabei handelt es sich jedoch gewöhnlich nicht um einen wirtschaftlichen Ansatz zur Herabsetzung der Erzeugung von Drosselgeräuschen. Eine Verdoppelung des Querschnittes und damit eine Verdoppelung der Wicklungsmasse führen zu einer Geräuschminderung von höchstens etwa 6 dB.

7.2.3 Kondensatoren

Die Schallminderungsverfahren für Kondensatoren sind auf die Herabsetzung der Oberflächenschwingungen der Kondensatoreinheiten ausgerichtet.

Die folgenden inneren Schallminderungsmaßnahmen für Kondensatoren mit Stahlgehäuse gelten auch für Kondensatoren mit Porzellangehäuse:

- Erhöhung der Anzahl von in Reihe geschalteten Kondensatorelementen; dadurch können die Spannungsbeanspruchung des Kondensators und so die Schwingungskräfte verringert werden;
- die Steifigkeit der Pakete von Kondensatorelementen kann durch Zusammenrücken der gestapelten Kondensatorelemente verstärkt werden, was zu einer besseren mechanischen Dämpfung führt;
- Berücksichtigung der Resonanzfrequenzen beim Entwurf des Kondensators.

7.2.4 Kühlgebläse

Es gibt gut eingeführte Verfahren für geräuscharme Gebläse. Eine Anzahl von Verfahren hat einen maßgeblichen Einfluss auf den erzeugten Schall:

- Axialgebläse mit großen Durchmessern und geringen Drehzahlen;
- Schalldämpfer und Luftleitbleche.

Die Maßnahmen für die Transformatorkühlung können freistehende Kühler erforderlich machen.

7.2.5 Pumpen und Dieselgeneratoren

Obwohl Pumpen und Dieselgeneratoren beim bestimmungsgemäßen Betrieb einen großen Betrag an Schall erzeugen, kann dieser noch erhöht werden und es kann eine Zerstörung eintreten, wenn bestimmte grundlegende vorbeugende Maßnahmen nicht eingehalten werden. Es ist empfehlenswert sicherzustellen, dass die drehenden Teile ordnungsgemäß ausgerichtet sind. Diese Anforderung muss sehr sorgfältig erfüllt werden.