

DIN EN 60565-2

ICS 17.140.50

Entwurf

Einsprüche bis 2017-11-01
Vorgesehen als
teilweiser Ersatz für
DIN EN 60565:2007-08

**Wasserschall –
Hydrophone – Kalibrierung von Hydrophonen –
Teil 2: Verfahren für niederfrequente Druckkalibrierung
(IEC 87/646/CD:2017)**

Underwater acoustics –
Hydrophones – Calibration of hydrophones –
Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration
(IEC 87/646/CD:2017)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-09-01 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 103 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort.....	6
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich.....	8
2 Normative Verweisung	8
3 Begriffe	8
4 Symbole.....	11
5 Kalibrierverfahren	13
5.1 Kurzbeschreibung.....	13
5.2 Feldbegrenzungen.....	13
5.3 Schematische Übersicht der Verfahren.....	14
5.4 Angabe der Ergebnisse	14
5.5 Intervalle für die Rekalibrierung.....	14
5.6 Erwägungen bezüglich Temperatur und Druck bei der Kalibrierung	14
5.7 Vorbereitung der Wandler	15
6 Elektrische Messungen	15
6.1 Signalart	15
6.2 Erdung	15
6.3 Messung der Ausgangsspannung des Hydrophons	15
6.3.1 Allgemeines	15
6.3.2 Elektrische Belastung durch das Messgerät	15
6.3.3 Elektrische Belastung durch Verlängerungskabel.....	16
6.3.4 Übersprechen und akustische Interferenzen	16
6.3.5 Eingebauter Vorverstärker	16
6.4 Messung des Senderstroms.....	16
7 Kalibrierung durch hydrostatische Anregung	16
7.1 Allgemeines	16
7.2 Kurzbeschreibung.....	16
7.2.1 Bestimmung des äquivalenten Drucks	16
7.2.2 Berechnung der Druckempfindlichkeit von Hydrophonen	20
7.3 Messung der Empfindlichkeit von Hydrophonen	20
7.4 Entwurf des Schwingungssystems	20
7.5 Alternatives Verfahren für hydrostatische Anregung.....	21
7.6 Messunsicherheit.....	21
8 Kalibrierung durch piezoelektrische Kompensation	21
8.1 Allgemeines	21
8.2 Kurzbeschreibung.....	21
8.2.1 Bestimmung des Schalldrucks	21
8.2.2 Bestimmung der charakteristischen Konstante	23

	Seite
8.2.3 Berechnung der Druckempfindlichkeit von Hydrophonen.....	23
8.3 Entwurf der Kalibrierkammer.....	23
8.3.1 Kammer für tiefe Frequenzen	23
8.3.2 Kammer für hohe Frequenzen	24
8.4 Praktische Einschränkungen des Verfahrens der piezoelektrischen Kompensation.....	25
8.5 Relatives Kalibrierverfahren	26
8.6 Messunsicherheit	26
9 Reziprozitätskalibrierung mit dem akustischen Kuppler	26
9.1 Allgemeines.....	26
9.2 Kurzbeschreibung	26
9.2.1 Theorie der Reziprozität des akustischen Kopplers	26
9.2.2 Verfahren der Reziprozitätskalibrierung.....	27
9.2.3 Berechnung der Übertragungsimpedanz.....	28
9.2.4 Bestimmung der akustischen Nachgiebigkeit	29
9.3 Begrenzung der Reziprozität des akustischen Kopplers	29
9.3.1 Frequenzgrenze	29
9.3.2 Hydrophonbezogene Einschränkungen.....	30
9.4 Messung.....	30
9.4.1 Auftreten von Interferenzeffekten.....	30
9.4.2 Überprüfung der Reziprozität.....	30
9.4.3 Überprüfung der Linearität	31
9.5 Messunsicherheit	31
9.6 Kalibrierung mit einem Referenzkoppler mit zwei reziproken Wandlern und einem Zusatzkoppler mit denselben beiden Wandlern und einem zu kalibrierenden Hydrophon.....	31
9.6.1 Allgemeines.....	31
9.6.2 Theorie	32
9.7 Kalibrierung mit einem Referenzkoppler mit zwei reziproken Wandlern und einem Zusatzkoppler mit denselben beiden Wandlern, einem zu kalibrierenden Hydrophon und einer Schallquelle	34
9.7.1 Allgemeines.....	34
9.7.2 Theorie	34
9.8 Kalibrierung mit einem Kuppler, einem reziproken Wandler, einem Sender, dem zu kalibrierenden Hydrophon und einem Zusatzkörper mit bekannter Nachgiebigkeit	35
9.8.1 Allgemeines.....	35
9.8.2 Theorie	35
10 Kalibrierung mit einem Pistophon	38
10.1 Allgemeines.....	38
10.2 Kurzbeschreibung	38
10.2.1 Bestimmung des Schalldrucks.....	38
10.2.2 Bestimmung der Nachgiebigkeit des Mediums.....	38

	Seite
10.2.3 Berechnung der Druckempfindlichkeit	39
10.3 Einschränkungen	39
10.4 Relative Kalibrierung	39
10.4.1 Vergleich mit einem Referenzwandler	39
10.4.2 Vergleich mit einem Luft-Wasser-Pistonphon	40
10.5 Messunsicherheit	41
11 Kalibrierung mit einer schwingenden Säule	41
11.1 Allgemeines	41
11.2 Kurzbeschreibung	41
11.2.1 Allgemeines	41
11.2.2 Darstellung des Drucks	42
11.2.3 Bestimmung der Empfindlichkeit	43
11.3 Messbedingungen	44
11.3.1 Mechanische Bedingungen	44
11.3.2 Akustische Bedingungen	45
11.4 Relatives Kalibrierverfahren	45
11.5 Messunsicherheit	46
12 Vergleichskalibrierung mit einem Dehnungsmesswandler	46
12.1 Allgemeines	46
12.2 Kurzbeschreibung	46
12.2.1 Theorie der Kalibrierung mittels Dehnungsmessung	46
12.2.2 Bestimmung der Empfindlichkeit des Dehnungsmesswandlers	47
12.2.3 Berechnung der Druckempfindlichkeit	48
12.3 Einschränkungen	48
12.4 Messunsicherheit	48
Anhang A (informativ) Ersatzschaltung des Anregungssystems für die Kalibrierung mit einer schwingenden Säule	49
A.1 Ersatzschaltung	49
Anhang B (informativ) Beurteilung der Messunsicherheit bei der tieffrequenten Druckkalibrierung von Hydrophonen	50
B.1 Allgemeines	50
B.2 Bewertung der Messunsicherheit nach Typ A	50
B.3 Bewertung der Messunsicherheit nach Typ B	50
B.4 Angegebene Messunsicherheit	50
B.5 Übliche Quellen der Messunsicherheit	51
Literaturhinweise	53
Bilder	
Bild 1 – Darstellung der Kalibrierung durch hydrostatische Anregung	17
Bild 2 – Schematische Darstellung der Kalibrierung durch piezoelektrische Kompensation	22
Bild 3 – Darstellung der Kammer für hohe Frequenzen	25

Bild 4 – Reziprozitätskoppler mit drei Wandlern: einem Sender P, einem reziproken Wandler T und dem zu kalibrierenden Hydrophon H.....	27
Bild 5 – Referenzkoppler mit zwei Wandlern: einem Sender P und einem reziproken Wandler T	32
Bild 6 – Zusatzkoppler mit drei Wandlern: einem Sender P, einem reziproken Wandler T und dem zu kalibrierenden Hydrophon H.....	33
Bild 7 – Zusatzkoppler mit vier Wandlern: einem Sender P, einem reziproken Wandler T, einer Schallquelle S und dem zu kalibrierenden Hydrophon H	35
Bild 8 – Schematische Darstellung des Messsystems.....	37
Bild 9 – Vergleichskalibrierung mit dem Pistonphon mit einem kalibrierten Hydrophon.....	41
Bild 10 – Darstellung der Kalibrierung mit einer schwingenden Säule	42
Bild 11 – Darstellung der Vergleichskalibrierung mit einer schwingenden Säule	45
Bild 12 – Vergleichskalibrierung mit einem Dehnungsmesswandler.....	47
Bild A.1 – Vereinfachte Ersatzschaltung der schwingenden Säule.....	49

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 87/646/CD:2017 „Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration“ (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 TC 87 „Ultrasonics“ 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 dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium GUK 821.3 „Medizinische Ultraschallgeräte“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

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

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

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO [und/oder] IEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 60565:2007-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Aufteilung der zweiten Fassung dieser Norm in zwei Teile, Teil 1: Verfahren für die Freifeld-Kalibrierung und Teil 2: Verfahren für die Druckkalibrierung, und die vorliegende Norm ist Teil 2;
- Hinzufügung eines relativen Kalibrierverfahrens zu Abschnitt 8: Kalibrierung mittels piezoelektrischer Kompensation;
- Hinzufügung eines relativen Kalibrierverfahrens zu Abschnitt 11: Kalibrierung mit einer schwingenden Säule;
- Hinzufügung von Abschnitt 12: Kalibrierung mit einem Dehnungsmesswandler.

**Wasserschall –
Hydrophone – Kalibrierung von Hydrophonen –
Teil 2: Verfahren für niederfrequente Druckkalibrierung**

Einleitung

Der Zweck dieser Internationalen Norm ist, Verfahren für Druckkalibrierungen von Hydrophonen im Frequenzbereich von 0,01 Hz bis mehrere Kilohertz festzulegen.

Um die Richtigkeit der Kalibrierungen sicherzustellen, müssen die zu kalibrierenden Hydrophone „starre“ Hydrophone von geringer Größe im Verhältnis zur Wellenlänge des Schalls sein, die bei der Kalibrierung schwingungsunempfindlich sind. In diesem Falle bedeutet „starres“ Hydrophon, dass die Nachgiebigkeit des Wasservolumens wesentlich geringer als die Nachgiebigkeit des Hydrophonvolumens ist.

Diese Internationale Norm enthält Kurzbeschreibungen, Verfahrensanweisungen und Messunsicherheiten zu physikalischen Kalibrierungen, wie z. B. mittels hydrostatischer Anregung, piezoelektrischer Kompensation, Pistonphon, schwingender Säule, Dehnungsmesswandler usw., sowie zu Reziprozitätskalibrierungen in akustischen Kopplern. Die Kalibrierung muss nach einem dieser Verfahren durchgeführt werden, je nachdem welcher Grundsatz anzuwenden ist und welche Begrenzungen für das Schallfeld und den Frequenzbereich gelten.

1 Anwendungsbereich

In dieser Internationalen Norm werden die Verfahren für niederfrequente Druckkalibrierungen von Hydrophonen im Frequenzbereich von 0,01 Hz bis mehrere Kilohertz festgelegt.

2 Normative Verweisung

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, 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 60050-801, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*

IEC 60500:20XX, *Underwater acoustics – Hydrophones – Properties in the frequency range 1 Hz to 500 kHz*

IEC 60565-1:20XX, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 1: Procedures for free-field calibration*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Koppler

Gerät, das aus einer starren flüssigkeitsgefüllten Kammer besteht, in die Wandler und Hydrophone eingesetzt werden können, deren Größtmaß im Verhältnis zur Wellenlänge klein ist [1]

Anmerkung 1 zum Begriff: In der vorliegenden Norm sollte der Begriff „kleine Kammer“ austauschbar mit „Koppler“ verwendet werden.

[QUELLE: IEC 60565:2006, 3.3, modifiziert: Änderung von „mit kleinen Abmessungen“ in „deren Größtmaß im Verhältnis zur Wellenlänge klein ist“.]

3.2

Beugungsfaktor

Verhältnis des effektiven Schalldrucks, gemittelt über denjenigen Teil des Hydrophons, der dazu vorgesehen ist, eine ankommende ebene Schalldruckwelle aus einer bestimmten Richtung zu empfangen, zum effektiven Freifeld-Schalldruck, der am Bezugszentrum des Hydrophons vorhanden wäre, wenn das Hydrophon entfernt würde

[QUELLE: IEC 60500:20XX, 3.3]

3.3

Hydrophon

elektroakustischer Wandler, der zu wasserübertragenen Drucksignalen analoge elektrische Signale erzeugt

Anmerkung 1 zum Begriff: Hydrophone sind grundsätzlich darauf ausgelegt, auf Unterwasserschalldrücke anzusprechen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Im Allgemeinen kann ein Hydrophon auch in Reaktion auf nicht akustische Druckschwankungen Signale erzeugen (z. B. auf solche, die in turbulenten Grenzschichten unter den Bedingungen starker Wasserströmungen vorliegen).

Anmerkung 3 zum Begriff: Zu den möglichen Hydrophontypen gehören Referenzhydrophone und Messhydrophone. Messhydrophone werden bei allgemeinen Schallfeldmessungen eingesetzt, während Referenzhydrophone hauptsächlich zu Kalibrierzwecken verwendet werden (z. B. für Vergleichskalibrierungen mit Messhydrophonen).

Anmerkung 4 zum Begriff: Hydrophone werden hauptsächlich als Abhörgeräte verwendet, im Falle der Reziprozitätskalibrierung aber dienen sie als reziproke Wandler und funktionieren somit nicht nur als Hydrophon, sondern auch als Sender (Schallquelle).

Anmerkung 5 zum Begriff: Hydrophone, die in ein digitales Erfassungssystem integriert sind, werden in einigen Fällen als „digitale Hydrophone“ bezeichnet, diese Kombination wird jedoch am besten als Messsystem und nicht als das Hydrophon allein betrachtet.

Anmerkung 6 zum Begriff: Bei Anschluss des Hydrophons an einen Ladungsverstärker wird die Empfindlichkeit des Hydrophons in einigen Fällen in Form der Ladungsempfindlichkeit beschrieben, die mit der Spannungsempfindlichkeit des Hydrophons über dessen elektrische Kapazität verbunden ist.

[QUELLE: IEC 60500:20XX, 3.17]

3.4

Leerlaufspannung

U_H

Spannung, die an den elektrischen Anschlüssen eines Hydrophons anliegt, wenn kein Strom durch die Anschlüsse fließt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Leerlaufspannung eines Hydrophons wird in Volt (V) ausgedrückt.

[QUELLE: IEC 60500:20XX, 3.19]

3.5

Pistonphon

Gerät mit einem starren Kolben, der reproduzierbar mit bekannter Frequenz und festem Hub hin und her bewegt werden kann, wodurch ein bekannter Schalldruck in einer geschlossenen kleinen Kammer erzeugt wird [1]

[QUELLE: IEC 60565:2006, 3.20, modifiziert: Änderung gilt nur für die englische Fassung.]

3.6

Druckempfindlichkeit

M_p

<eines Hydrophons> Verhältnis des Effektivwerts der Ausgangsspannung zum Effektivwert des Schalldrucks, gemittelt über das für den Empfang von Schall ausgelegte aktive Element des Hydrophons, bei einer festgelegten Frequenz

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Druckempfindlichkeit eines Hydrophons wird in Volt je Pascal, V/Pa, ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Anstelle der „Empfindlichkeit“ (en: sensitivity) wird in einigen Fällen die Benennung „Antwort“ (en: response) verwendet.

[QUELLE: IEC 60500:20XX, 3.23]

3.7

Druckempfindlichkeitspegel

zwanzigfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses aus der Druckempfindlichkeit M_p und einer Referenzempfindlichkeit M_{ref}

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Druckempfindlichkeitspegel wird in Dezibel (dB) ausgedrückt

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Wert der Referenzempfindlichkeit M_{ref} ist gleich 1 V/μPa.

[QUELLE: IEC 60500:20XX, 3.24].

3.8

Hauptachse

Bezugsrichtung, die als Ursprung zur Festlegung der Winkelkoordinaten für die Beschreibung der Richtungseigenschaften des Hydrophons dient

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Allgemeinen wird als Hauptachse die Struktur-Symmetrieachse oder die Richtung des maximalen Verlaufs gewählt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Richtung des maximalen Verlaufs kann sich mit der Frequenz des Schalls ändern.

[QUELLE: EC 60500:20XX, 3.25]

3.9

Sender

elektroakustischer Wandler, der zu elektrischen Signalen analoge Wasserschall-Signale erzeugt [1]

[QUELLE: IEC 60565:2006, 3.37]

3.10

Verhältnis der spezifischen Wärmen

γ

Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und konstantem Volumen

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei trockener Luft und einer Temperatur von 0 °C bis 17 °C ist γ gleich 1,40.

3.11

Bezugszentrum

Punkt innerhalb oder nahe bei einem Hydrophon, auf den die geometrischen elektroakustischen Eigenschaften des Hydrophons bezogen werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Sofern nichts anderes festgelegt ist, entspricht das Bezugszentrum häufig dem geometrischen Zentrum des Hydrophons.

[QUELLE: IEC 60500:20XX, 3.26]

3.12

Sende-Übertragungskoeffizient in einer kleinen Kammer

S_T

Verhältnis des (als gleichförmig angenommenen) Schalldrucks in einer kleinen Kammer zum Strom, der bei einer gegebenen Frequenz durch den in die Kammer eingebrachten Wandler fließt [1]

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Sende-Übertragungskoeffizient in einer kleinen Kammer wird in Pascal je Ampere (Pa/A) ausgedrückt.

[QUELLE: IEC 60565:2006, 3.36, modifiziert: Änderung von „Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Wandlers in einer kleinen Kammer“ in „Sende-Übertragungskoeffizient in einer kleinen Kammer“ und von „zu dem durch die elektrischen Anschlussklemmen eines Wandlers innerhalb der Kammer bei einer bestimmten Frequenz fließenden Strom“ in „zum Strom, der bei einer gegebenen Frequenz durch den in die Kammer eingebrachten Wandler fließt“.]

3.13

Schalldruck

p

Differenz zwischen dem Gesamtdruck und dem Druck, der bei nicht vorhandenem Schall existieren würde

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Schalldruck wird in Pascal (Pa) ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Diese Definition folgt der mit ISO übernommenen Konvention für die Definition des Schalldrucks als einer momentanen Größe. Es wird darauf hingewiesen, dass dieser Begriff in IEC 60050-801-21 (IEV) mit „Augenblickswert des Schalldrucks“ (en: instantaneous sound pressure) benannt ist [6]. An den Stellen in IEC 60500, an

denen der Effektivwert des Schalldrucks gemeint ist, wird er auch ausdrücklich als „Effektivwert des Schalldrucks“ (en: root-mean-square sound pressure) bezeichnet.

[QUELLE: IEC 60500:20XX, 3.27]

3.14

Messunsicherheit

dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte [2]

[QUELLE: ISO/IEC Guide 98-3, 3.3]

3.15

schwingende Säule

Gerät, in dem eine Wassersäule in einem vertikal angeordneten zylindrischen Behälter in Schwingung versetzt wird und einen von der Tiefe abhängigen Schalldruck in der Wassersäule erzeugt [1]

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Länge der Säule sollte im Vergleich zur Wellenlänge des Schalls in Wasser ausreichend klein sein. Die Querschnittsabmessungen der Säule müssen zu ihrer Länge klein sein.

[QUELLE: IEC 60565:2006, 3.38]

4 Symbole

A	Querschnittsfläche der Flüssigkeitssäule
C	effektive Nachgiebigkeit der Kammerwände
C_t	akustische Nachgiebigkeit der Kammer
C_M	Nachgiebigkeit des Mediums
c	Schallgeschwindigkeit in Wasser
c_f	Schallgeschwindigkeit in einem Fluid
D	mittlerer Durchmesser des zylindrischen Gehäuses
d	Tiefe oder Abstand des Hydrophons
d_{jk}	piezoelektrischer Modul des Gehäusematerials
E	Youngscher Modul
F_c	erzeugte Kraft
f	Frequenz
g	Erdbeschleunigung
h	Verschiebung des Wasserspiegels im offenen Gefäß
h_e	äquivalente Höhe
h_0	Amplitude der Verschiebung des Wasserspiegels
ΔH	Änderung des Wasserstandes

I_P	durch den Sender fließender Strom
I_T	durch den Wandler fließender Strom
I_C	Kompensationsstrom durch den Nullsender
K	charakteristische Konstante des piezoelektrischen Nullwandlers
K_0	Korrekturfaktor für den hydrostatischen Druck
k	Wellenzahl
L	Länge der Säule oder des Kopplers
M_H	Empfindlichkeit des Hydrophons
M_p	Druckempfindlichkeit
M_T	Empfindlichkeit des Wandlers
M_M	Empfindlichkeit des Mikrophons
m_w	Masse der Flüssigkeit
m_c	Masse des Gefäßes
p	Schalldruck
p_s	statischer Druck
p_0	Druckamplitude
Q	mechanischer Gütefaktor
r	Radius des Wandlergehäuses
S_P	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Senders in einer kleinen Kammer
S_T	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Wandlers in einer kleinen Kammer
t	Dicke des zylindrischen Gehäuses
U_C	Kompensationsspannung
U_{C0}	Amplitude der Kompensationsspannung
U_H	Leerlaufspannung am Hydrophon
U_M	Leerlaufspannung am Mikrophon
U_{PH}	Leerlaufspannung am Hydrophon, von einem Sender als Schallquelle
U_{TH}	Leerlaufspannung am Hydrophon, von einem Wandler als Schallquelle

U_{PT}	Leerlaufspannung am Wandler, von einem Sender als Schallquelle
U_R	Leerlaufspannung an einem Referenzhydrophon
U_0	Amplitude der Leerlaufspannung
u	Schallfluss
V_b	Volumen des Zusatzkörpers
V_t	Gesamtvolumen
ΔV	Volumenänderung
x_0	Schwingungsamplitude
Z	akustische oder mechanische Impedanz von Sender und Hydrophon
Z_{PH}	Übertragungsimpedanz von Sender und Hydrophon
Z_{TH}	Übertragungsimpedanz von Wandler und Hydrophon
Z_{PT}	Übertragungsimpedanz von Wandler und Sender
γ	Verhältnis der spezifischen Wärmen
ν	Rotationsgeschwindigkeit
ρ	Dichte von Wasser
ρ_f	Dichte des Fluids
σ	Poissonscher Modul
ω	Kreisfrequenz = $2\pi f$
ω_r	Resonanzkreisfrequenz

5 Kalibrierverfahren

5.1 Kurzbeschreibung

- a) Absolute Kalibrierung
Kalibrierung ohne einen Referenzwandler.
- b) Relative Kalibrierung
Kalibrierung mit einem kalibrierten Referenzwandler.

5.2 Feldbegrenzungen

Die Schallfelder für die nach den Abschnitten 7 bis 12 durchzuführenden Kalibrierungen müssen auf eine kleine Kammer begrenzt sein.

5.3 Schematische Übersicht der Verfahren

Die Kalibrierung muss in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Grundsätzen mit ihren jeweiligen Schallfeld- und Frequenzbereichseinschränkungen nach einem der folgenden Verfahren durchgeführt werden.

- a) Die Kalibrierung durch hydrostatische Anregung nach Abschnitt 7 gilt für den Frequenzbereich 0,01 Hz bis 1 Hz.
- b) Die Kalibrierung durch piezoelektrische Kompensation nach Abschnitt 8 gilt für den Frequenzbereich 1,0 Hz bis 4 kHz, bei Verwendung eines Referenzwandlers gilt sie jedoch üblicherweise für den Frequenzbereich von 1,0 Hz bis 2 kHz.
- c) Die Reziprozitätskalibrierung mit dem akustischen Koppler nach Abschnitt 9 gilt für den Frequenzbereich 0,1 Hz bis 5 kHz.
- d) Die Kalibrierung mit einem Pistonphon nach Abschnitt 10 mit oder ohne Referenzwandler gilt für den Frequenzbereich von einigen Hertz bis mehrere hundert Hertz.
- e) Die Kalibrierung mit einer schwingenden Säule nach Abschnitt 11 mit oder ohne Referenzwandler gilt für den Frequenzbereich von 10 Hz bis 2 kHz.
- f) Die Kalibrierung mit einem Dehnungsmesswandler nach Abschnitt 12 mit einem Referenzwandler gilt im Frequenzbereich 0,5 Hz bis 3,15 kHz.

5.4 Angabe der Ergebnisse

Eine Kalibrierung ist nur am Tag der Kalibrierung und für die Umgebungsbedingungen, die während der Kalibrierung geherrscht haben, gültig. Wenn das Ergebnis der Kalibrierung eines Hydrophons angegeben wird, sind die Umgebungsbedingungen bei der Kalibrierung anzugeben, einschließlich aller derjenigen Bedingungen, die die Empfindlichkeit des Geräts beeinflussen können, [3] bis [7].

Zu den anzugebenden Bedingungen können gehören:

- Datum der Bewertung;
- Wassertemperatur;
- Eintauchtiefe (oder aufgebracht hydrostatischer Druck);
- Art der verwendeten Befestigung oder Aufstellung;
- Eintauchdauer und Dauer aller angewendeten Befeuchtungsverfahren;
- Ausrichtung des Wandlers um eine Achse oder ein Ausrichtungszeichen und ob die Ausrichtung manuell oder akustisch durchgeführt wurde;
- maximaler Schalldruck, dem das Hydrophon ausgesetzt war;
- alle Annahmen über das zu prüfende Gerät (z. B. Lage des Bezugszentrums).

Wenn ein kalibriertes Hydrophon in einer Umgebung verwendet wurde, die stark von der verschiedenen ist, die bei der Kalibrierung vorhanden war, kann der Anwender gezwungen sein, seine Messunsicherheiten höher einzuschätzen, um die Veränderung der Umgebung zu berücksichtigen.

5.5 Intervalle für die Rekalibrierung

Hydrophone müssen regelmäßig kalibriert werden, um einen gültigen Kalibrierstatus aufrechtzuerhalten. Bei Referenzhydrophonen kann eine jährliche Rekalibrierung angemessen sein. Werden Hydrophone, die nicht zu den Referenzhydrophonen gehören, bei Feldmessungen eingesetzt und besteht die Möglichkeit falscher Verwendung, können Kalibrierungen in kürzeren Intervallen erforderlich werden.

5.6 Erwägungen bezüglich Temperatur und Druck bei der Kalibrierung

Die Eigenschaften von Wandlern können sich sowohl mit der Umgebungstemperatur als auch mit dem hydrostatischen Druck (Eintauchtiefe) ändern [4], [5].

Falls die für bestimmte Bedingungen der Wassertemperatur und des hydrostatischen Drucks (der Eintauchtiefe) geltende Empfindlichkeit des Wandler erforderlich ist, muss entweder der Wandler unter denselben Bedingungen von Temperatur und Druck kalibriert werden, bei denen er eingesetzt wird, oder es müssen Korrekturen in Bezug auf die Werte der Empfindlichkeit und der Antwort des Wandler auf der Grundlage früherer Kalibrierungen oder validierter Analysemodelle vorgenommen werden.

5.7 Vorbereitung der Wandler

Um sicherzustellen, dass der Wandler ohne einen Luftfilm oder Blasen auf seiner Oberfläche vom Wasser richtig befeuchtet ist, muss ein Netzmittel auf der gesamten Wandleroberfläche aufgebracht werden. Wenn der Wandler in Wasser eingetaucht und dann wieder herausgenommen wird, dürfen keine trockenen Flecken auf ihm sichtbar sein [6].

6 Elektrische Messungen

6.1 Signalart

Die für Kalibrierungen verwendete Erregungswelle ist üblicherweise eine kontinuierliche Sinuswelle. In diesem Falle wird eine Anzahl an Frequenzen ausgewählt, die ausreicht sicherzustellen, dass das Leistungsvermögen des Hydrophons über den gewünschten Frequenzbereich sicher charakterisiert wird. Mit der Weiterentwicklung der Messtechnik werden andere Signale immer üblicher, dazu gehören Chirps und Breitbandrauschen.

6.2 Erdung

Zur Vermeidung von Erdschleifen müssen die elektrischen Anschlüsse der Wandler vor dem Kontakt mit Wasser geschützt werden. Die freiliegenden Metallteile des Hydrophons müssen eine einseitige Erdverbindung mit der Kabelschirmung des Hydrophons haben. Jeglicher sonstiger Erdkontakt ist zu vermeiden.

6.3 Messung der Ausgangsspannung des Hydrophons

6.3.1 Allgemeines

Die Leerlaufspannung des Hydrophons ist am Ende des Hydrophonkabels zu messen. Die für die Messung gewählten elektrischen Anschlüsse sind festzulegen.

Falls ein Verstärker, Dämpfungsglied oder Filter verwendet wird und einen Teil des Messsystems bildet, muss er/es kalibriert werden.

6.3.2 Elektrische Belastung durch das Messgerät

Während der Messungen muss das Hydrophon an ein Messgerät (einen Verstärker, ein Spannungsmessgerät, ein Oszilloskop oder einen A/D-Umsetzer) mit hoher Eingangsimpedanz angeschlossen sein. Üblicherweise muss die Eingangsimpedanz viel (im Idealfall mehr als das 100fache) größer als die Impedanz des Hydrophons sein. Ist die elektrische Impedanz des Hydrophons hoch (z. B. bei einem kleinen piezoelektrischen Hydrophon mit geringer elektrischer Kapazität), muss die vom Messgerät verursachte elektrische Belastung des Hydrophons berücksichtigt werden. In derartigen Fällen muss die gemessene Spannung in Bezug auf die elektrische Belastung berichtigt werden, um die Leerlaufspannung zu erhalten.

ANMERKUNG 1 Die Korrekturen dürfen nach dem in IEC 60565-1 angegebenen Verfahren berechnet werden.

ANMERKUNG 2 Wenn bei der Kalibrierung eines bestimmten Hydrophons durchgehend dieselbe Last verwendet wird, dürfen die Korrekturen anstelle der einzelnen gemessenen Spannungen auf die Empfindlichkeit angewendet werden.

6.3.3 Elektrische Belastung durch Verlängerungskabel

Wird ein Verlängerungskabel an das Hydrophon angeschlossen, so belastet es das Hydrophon elektrisch, und es sind Korrekturen vorzunehmen, um die Leerlaufspannung des Hydrophons zu erhalten.

ANMERKUNG 1 Diese Korrekturen sollten nach dem in IEC 60565-1 angegebenen Verfahren berechnet werden.

ANMERKUNG 2 Wenn bei der Kalibrierung eines bestimmten Hydrophons durchgehend dasselbe Verlängerungskabel verwendet wird, sollten die Korrekturen nicht auf die einzelnen gemessenen Spannungen, sondern auf die Empfindlichkeit angewendet werden.

6.3.4 Übersprechen und akustische Interferenzen

Bei Interferenzen und Übersprechen führen Signalmittelung und Schmalbandfilterung gewöhnlich nicht zu einer Verbesserung der Genauigkeit. Daher müssen Anstrengungen unternommen werden, den Grund des Problems zu ermitteln, und es sind Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen auf ein Mindestmaß zu ergreifen. Bei Störpegeln, die mindestens 30 dB niedriger als der Signalpegel oder mindestens 40 dB niedriger als der Signalpegel für das Dauerschallsignal sind, ist eine Beeinträchtigung der Messunsicherheit unwahrscheinlich.

6.3.5 Eingebauter Vorverstärker

Besitzt das Hydrophon einen eingebauten Vorverstärker, so wird die Empfindlichkeit als Empfindlichkeit am Kabelende einschließlich des Leistungsvermögens des Vorverstärkers ausgedrückt.

ANMERKUNG Besitzt das Hydrophon einen an die elektrische Impedanz des Messsystems angepassten eingebauten Vorverstärker, so sind keine Korrekturen für die elektrische Belastung durch Verlängerungskabel oder Messgeräte erforderlich.

6.4 Messung des Senderstroms

Der durch den Sender fließende Strom muss mit Hilfe entweder einer kalibrierten Stromzange oder eines kalibrierten Stromwandlers (der eine dem Ansteuerungsstrom proportionale Spannung erzeugt) oder durch Messen des Spannungsabfalls über einen kleinen, mit dem Sender in Reihe geschalteten, kalibrierten Widerstand (mit einem Wert von nur einigen Ohm) bestimmt werden.

7 Kalibrierung durch hydrostatische Anregung

7.1 Allgemeines

Dieses Verfahren der Hydrophonkalibrierung ohne Referenzwandler gilt für den Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 1 Hz durch harmonische Änderung des hydrostatischen Drucks. Es handelt sich dabei um eine absolute Kalibrierung von Hydrophonen, und dieses Verfahren wird in einer kleinen Kammer durchgeführt [8] bis [10].

7.2 Kurzbeschreibung

7.2.1 Bestimmung des äquivalenten Drucks

7.2.1.1 Allgemeines

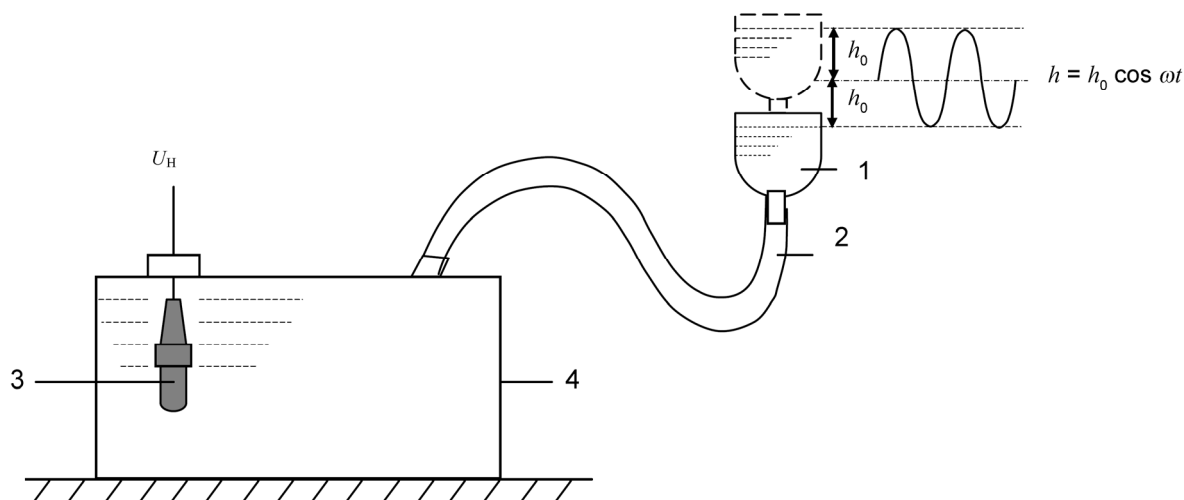
Eine geschlossene kleine Kammer wird so mit einem kleinen offenen Gefäß verbunden, dass dessen Wasserspiegel immer höher als die Kammer liegt. Das offene Gefäß wird harmonischen Bewegungen in der Vertikalen unterzogen (siehe Bild 1). Die Verschiebung des Wasserspiegels im offenen Gefäß, h , kann ausgedrückt werden als:

$$h = h_0 \cos \omega t \quad (1)$$

Dabei ist

h_0 die Amplitude der Verschiebung des Wasserspiegels;

ω die Kreisfrequenz der Schwingung.



Legende

- 1 Offenes Gefäß
- 2 Schlauch
- 3 Hydrophon
- 4 Messkammer

Bild 1 – Darstellung der Kalibrierung durch hydrostatische Anregung

Die Änderung des Wasserspiegels im Gefäß erzeugt einen hydrostatischen Wechseldruck p in der geschlossenen Kammer:

$$p = p_0 \cos \omega t \quad (2)$$

Dabei ist

p_0 die Amplitude des hydrostatischen Wechseldrucks.

Der hydrostatische Wechseldruck p wird als äquivalenter Druck für die Kalibrierung von Hydrophonen verwendet. Bei tiefen Frequenzen (geringer als 0,5 Hz) wird seine Amplitude nach folgender Gleichung berechnet:

$$p_0 = \rho g h_0 \quad (3)$$

Dabei ist

ρ die Dichte von Wasser;

g die Erdbeschleunigung.

Bei hohen Frequenzen wird der hydrostatische Wechseldruck p sowohl durch die Helmholtzresonanz des Systems als auch durch die Trägheit des Wassers in dem offenen Gefäß und dem Schlauch beeinflusst. Die Resonanz des Systems erhöht den hydrostatischen Wechseldruck, und die Trägheit des Wassers verringert den hydrostatischen Wechseldruck. Aufgrund dessen wird die Amplitude des hydrostatischen Wechseldrucks in der Messkammer nach folgender Gleichung bestimmt:

$$p_0 = \rho g h_0 K_0 \left(1 - \frac{\omega^2}{g} H_e \right) \quad (4)$$

Dabei ist

K_0 der Korrekturfaktor für den hydrostatischen Druck, der den hydrostatischen Wechseldruck erhöht.

H_e die äquivalente Höhe, die durch die Trägheit des Wassers im Gefäß und im Schlauch beeinflusst wird.

7.2.1.2 Bestimmung des Korrekturfaktors

Bei sehr tiefen Frequenzen wird die Helmholtzresonanz des Systems mit eindimensionalen konzentrierten Parametern beschrieben. Der Wert des Korrekturfaktors K_0 ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$K_0 = \frac{1}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{Q \omega_r} \right)^2} / \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right)^2} \quad (5)$$

Dabei ist

ω_r die Resonanzkreisfrequenz des Systems;

Q der mechanische Gütefaktor.

Unter den Bedingungen von $\omega_r \gg \omega$ und $Q > 2$ kann Gleichung (5) mit ausreichender Genauigkeit wie folgt ausgedrückt werden:

$$K_0 \approx 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \quad (6)$$

7.2.1.3 Messung der Resonanzfrequenz des Kalibriersystems

Die Resonanzfrequenz ω_r muss nach Fertigstellung des Kalibriersystems gemessen und überprüft werden. Zu diesem Zweck wird ein piezoelektrischer Sender am Boden der Messkammer angebracht und mit Hilfe eines Wobbelgenerators in dem Frequenzbereich angesteuert, der die Resonanzfrequenz enthält. In der Kammer wird ein Hydrophon mit über diesen Frequenzbereich konstanter Empfindlichkeit installiert, und dessen Leerlaufausgangsspannung wird gemessen. Die tiefste Resonanzfrequenz sowohl des Senders als auch des Hydrophons muss wesentlich größer als ω_r sein. Die Resonanzfrequenz des Systems kann aus der Frequenzantwort der Ausgangsspannung des Hydrophons ermittelt werden.

7.2.1.4 Bestimmung der äquivalenten Höhe

7.2.1.4.1 Allgemeines

Die äquivalente Höhe H_e ist nach 7.2.1.4.2, 7.2.1.4.3 oder 7.2.1.4.4 zu bestimmen.

7.2.1.4.2 Nullverfahren des hydrostatischen Wechseldrucks

Der hydrostatische Wechseldruck in der Messkammer kann in einer der beiden folgenden Vorgehensweisen [11] auf null gestellt werden:

- Durch Zugabe oder Entnahme von Wasser in bzw. aus dem offenen Gefäß zur Veränderung des Wasserspiegels kann der hydrostatische Wechseldruck p in der Messkammer bei einer festgelegten Frequenz ω_0 auf null gestellt werden. Aus Gleichung (4) ergibt sich die äquivalente Höhe zu:

$$H_e + \Delta H = \frac{g}{\omega_0^2} \quad (7)$$

Dabei ist

ΔH die Änderung des Wasserspiegels.

Danach wird der Wasserspiegel erneut um einen bestimmten Betrag geändert. Damit ergibt sich die äquivalente Höhe zu: $-\Delta H$, um die äquivalente Höhe auf ihren Anfangswert zurückzubringen

$$H_e = \frac{g}{\omega_0^2} - \Delta H \quad (8)$$

- b) Während der Wasserspiegel in dem offenen Gefäß auf einer geeigneten Höhe gehalten wird, kann der hydrostatische Wechseldruck in der Messkammer durch Verändern der Frequenz auf null gestellt werden. Damit ist die äquivalente Höhe gleich g/ω_0^2 , wobei ω_0 die Frequenz ist, bei der der hydrostatische Wechseldruck null auftritt. Bei diesem Verfahren muss der Wasserspiegel des offenen Gefäßes ausreichend sein, um sicherzustellen, dass ω_0 höher als die obere Frequenzgrenze des Kalibrierbereichs ist. Wird der Wasserspiegel um einen Betrag $-\Delta H$ verändert, um den hydrostatischen Wechseldruck auf einen geeigneten Wert zurückzubringen, so kann die äquivalente Höhe an diesem Punkt unter Anwendung von Gleichung (8) ermittelt werden.

7.2.1.4.3 Verfahren mit Änderung des Wasserspiegels

Während der Wasserspiegel in dem offenen Gefäß auf einer Augenblickshöhe H_e gehalten wird und das offene Gefäß bei einer Frequenz ω vertikal schwingt, wird die Leerlaufspannung U_{H1} eines Hydrophons in der

Messkammer gemessen. Nach Veränderung des Wasserspiegels im offenen Gefäß um einen Betrag ΔH wird die Leerlaufspannung des Hydrophons, U_{H2} , gemessen. Mit diesen beiden Messwerten ist dann die äquivalente Höhe nach folgender Gleichung zu bestimmen:

$$H_e = \frac{g}{\omega^2} + \frac{U_{H1}\Delta H}{U_{H2} - U_{H1}} \quad (9)$$

ANMERKUNG ΔH ist bei steigendem Wasserspiegel positiv und bei sinkendem Wasserspiegel negativ [11].

7.2.1.4.4 Verfahren mit zwei Frequenzen

Während das offene Gefäß zuerst bei der Frequenz ω_1 und dann bei der Frequenz ω_2 schwingt (wobei ω_1 und ω_2 dicht nebeneinander liegen müssen und um höchstens 0,6 rad/s voneinander abweichen dürfen), werden die entsprechenden Leerlaufspannungen U_{H1} und U_{H2} des Hydrophons in der geschlossenen Kammer gemessen. Als Annahme muss vorausgesetzt werden, dass:

- die Empfindlichkeit des Hydrophons bei zwei eng nebeneinander und weit unter der Resonanzfrequenz des Hydrophons liegenden Frequenzen fast gleich ist;
- das Hydrophon von der Helmholtzresonanz des Systems bei zwei eng nebeneinander liegenden Frequenzen nahezu gleich beeinflusst wird. In diesem Fall ist die äquivalente Höhe durch folgenden Ausdruck gegeben:

$$H_e = g \frac{U_{H2} - U_{H1}}{U_{H2}\omega_1^2 - U_{H1}\omega_2^2} \quad (10)$$

ANMERKUNG Das Nullverfahren des hydrostatischen Wechseldrucks ist das genaueste der drei Verfahren. Da dieses Verfahren jedoch erfordert, dass die Frequenz für den Druck null über dem Kalibrierfrequenzbereich liegt, ist es erforder-

lich, dass die Schwingungseinrichtung über einen breiteren Frequenzbereich arbeitet. Das Zwei-Frequenz-Verfahren ist das günstigste. Wird die zugehörige Voraussetzung erfüllt, so ist dieses Verfahren auch sehr genau [11].

7.2.2 Berechnung der Druckempfindlichkeit von Hydrophonen

Die Druckempfindlichkeit M_p eines in der Messkammer angebrachten Hydrophons (siehe Bild 1) ist wie folgt zu berechnen:

$$M_p = \frac{U_H}{p} \quad (11)$$

Dabei ist

U_H die Leerlaufspannung des Hydrophons.

7.3 Messung der Empfindlichkeit von Hydrophonen

Mit Hilfe von Gleichung (1) kann die Empfindlichkeit M_H des Hydrophons aus dem Verhältnis der Leerlaufspannung zu dem auf das Hydrophon wirkenden Druck berechnet werden.

Der Druck p kann aus den Gleichungen (2) und (4) abgeleitet werden. Bleiben das Kalibriersystem und der Wasserspiegel des offenen Behälters unverändert, so bleiben die Beträge von h_0 , ω_r und H_e in den Gleichungen konstant und können im Voraus bestimmt werden. Der Wert des Drucks p_0 ist ebenfalls für jede Frequenz im Voraus bekannt, sodass nur die Leerlaufspannung U_H des Hydrophons für jede einzelne Kalibrierung gemessen zu werden braucht.

Da die äquivalente Höhe H_e vom Wasserspiegel im offenen Gefäß und von der Position des Schlauchs abhängt, wird empfohlen, den Wert der äquivalenten Höhe H_e für jede Kalibrierung zu bestimmen.

7.4 Entwurf des Schwingungssystems

Beim Entwurf des Schwingungssystems muss Folgendes berücksichtigt werden:

- Da die Verschiebung des Wasserspiegels h mit dem äquivalenten Druck p verbunden ist, muss seine Amplitude h_0 groß genug sein, um einen ausreichend hohen äquivalenten Druck zur Sicherstellung eines ausreichenden Rauschabstands des Messsignals zu erzeugen. Damit die sich bewegenden Geräte bei der oberen Frequenzgrenze des Systems jedoch ruhig schwingen, darf die Amplitude h_0 nicht zu groß sein. In der Praxis ist eine für die Schwingungsverschiebung geeignete Amplitude 20 mm bei 1 Hz.
- In der Praxis muss die Helmholtzresonanzfrequenz ω_r des aus der Messkammer, dem Schlauch und dem offenen Gefäß bestehenden Systems die Bedingung $\omega_r \geq 20 \omega$ erfüllen, um sicherzustellen dass

$$K_0 \approx 1 \quad (12)$$

- Das Kalibriersystem muss so aufgebaut entworfen und installiert werden, dass der Einfluss aller Streschwingungen des sich bewegenden Geräts auf das offene Gefäß auf ein Mindestmaß verringert wird. Es müssen alle notwendigen Vorkehrungen getroffen werden, um eine Direktkopplung von Schwingungen zu vermeiden.
- Um eine gleichförmige Bewegung des Wassers sicherzustellen, muss die Beschleunigung des offenen Gefäßes geringer als die Erdbeschleunigung sein. Diese Bedingung kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\omega^2 h_0 \ll g \quad (13)$$

ANMERKUNG Die Antriebsscheibe kann auf verschiedene Weise angetrieben werden. Um die Drehgeschwindigkeit v mit einem Rechner genau zu steuern, werden üblicherweise Schrittmotoren verwendet. Um den Resonanzpunkt des sich bewegenden Geräts bei tiefen Frequenzen zu vermeiden und dafür zu sorgen, dass sich das offene Gefäß in vertikaler

Richtung ruhig bewegt, wird außerdem die Verwendung von dualen Schrittmotoren empfohlen, die im Differentialbetrieb angetrieben werden.

7.5 Alternatives Verfahren für hydrostatische Anregung

Der hydrostatische Druck kann auch durch Änderung der Tiefe des Hydrophons mit einfacher harmonischer Bewegung variiert werden. In diesem Fall ist die Amplitude des Wechseldrucks p_0 durch Gleichung (3) gegeben, und die Druckempfindlichkeit M_p wird nach Gleichung (11) berechnet.

Dieses Verfahren der hydrostatischen Anregung führt weitere Quellen für Messunsicherheiten ein, zu denen folgende gehören:

- hydrodynamische Strömung um das Hydrophon. Diese hängt von der Form des Hydrophons ab;
- Trägheitswirkungen des Mediums. Diese können durch richtige Ausrichtung des Hydrophons auf ein Mindestmaß verringert werden, um die Verschiebung des Wassers nahe der aktiven Fläche zu verringern. So können z. B. Hydrophone mit ebenen aktiven Flächen so ausgerichtet werden, dass die Hydrophonvorderseite senkrecht steht.
- Trägheitswirkungen innerhalb des Hydrophons. Diese können häufig ebenfalls durch Ausrichtung auf ein Mindestmaß verringert werden, obwohl die optimale Ausrichtung möglicherweise nicht dieselbe ist, bei der die Trägheitswirkungen des Mediums auf ein Mindestmaß verringert werden.
- dynamische Drücke durch unerwünschte Turbulenzen. Diese können dadurch auf ein Mindestmaß verringert werden, dass alle Befestigungen möglichst stromlinienförmig ausgeführt werden. Es besteht außerdem die Möglichkeit, dass die harmonische Bewegung des Hydrophons eine Resonanz innerhalb des Wassers in der Kalibrierkammer anregen kann.

7.6 Messunsicherheit

Es wird erwartet, dass die erweiterte Gesamtmessunsicherheit der Kalibrierung bei Frequenzen von 0,05 Hz bis 0,5 Hz bei sorgfältiger Ausführung geringer als 0,3 dB (95 %-Vertrauensniveau) sein kann. Die Messunsicherheit steigt jedoch mit ansteigender Frequenz. In Bezug auf das alternative Verfahren wird erwartet, dass die erweiterte Gesamtmessunsicherheit der Kalibrierung bei sorgfältiger Ausführung geringer als 0,5 dB (95 %-Vertrauensniveau) sein kann, [8], [12].

8 Kalibrierung durch piezoelektrische Kompensation

8.1 Allgemeines

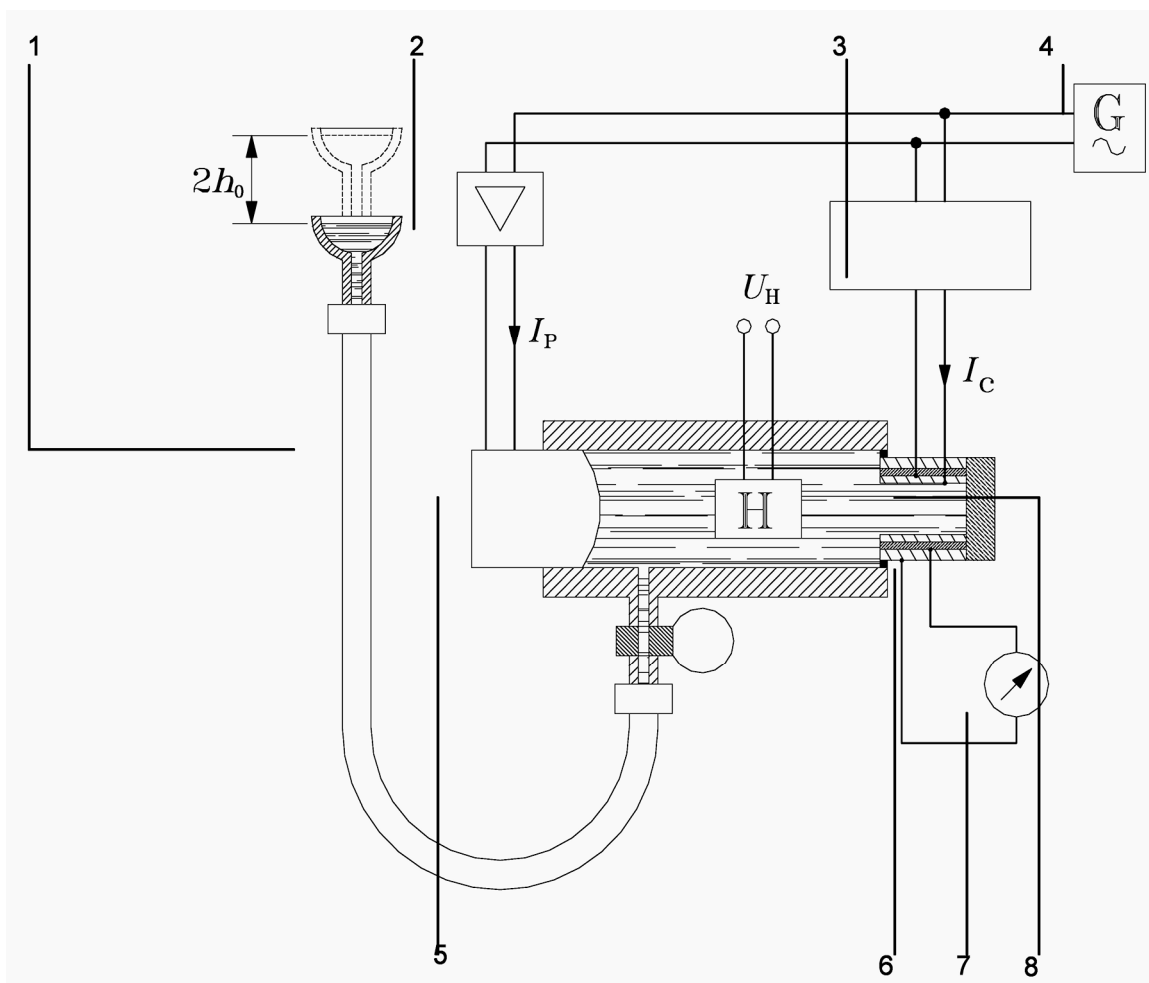
Dieses Verfahren zur Kalibrierung von Hydrophonen durch piezoelektrische Kompensation gilt für den Frequenzbereich von 1,0 Hz bis 4 kHz, das Verfahren zur Kalibrierung von Hydrophonen mittels Referenzwandler gilt dagegen für den Frequenzbereich von 1,0 Hz bis 2 kHz. Das Verfahren wird in einer kleinen, geschlossenen, wassergefüllten Kammer durchgeführt, deren Wellenlänge ausreichend größer als das Größtmaß der Kammer ist, [13] bis [16].

8.2 Kurzbeschreibung

8.2.1 Bestimmung des Schalldrucks

Das Hydrophon wird in einem geschlossenen, wassergefüllten Tank, der mit einem Schallquellensender und einem piezoelektrischen Nullwandler ausgerüstet ist, in der Nähe der geometrischen Mitte des Nullwandlers positioniert (siehe Bild 2). Der Nullwandler besteht aus zwei koaxial befestigten piezoelektrischen zylindrischen Keramikschaalen. Die innere Schale wirkt als Antriebswandler, während die äußere Schale als Verschiebungssensor dient. Der kleine ringförmige Spalt zwischen den Schalen wird mit einer elastischen Kopplungssubstanz gefüllt. Der Wert des Wechseldrucks, der vom Schallquellensender im Tank erzeugt wird, wird mit Hilfe des Nullwandlers gemessen.

Phase und Amplitude der Spannung U_c an den elektrischen Anschlüssen der Antriebsschale des Nullwandlers werden in Bezug auf die Spannung am Schallquellensender so lange angepasst, bis die Ausgangsspannung der äußeren Schale gleich null ist. Für die Speisung des Schallquellensenders und der Antriebsschale ist derselbe Signalgenerator zu verwenden.



Legende

- 1 Wassersäule
- 2 Leistungsverstärker
- 3 Phasen- und Amplitudenregler
- 4 Signalgenerator
- 5 Schallquellensender
- 6 Verschiebungssensor des Nullwandlers
- 7 Nullanzeigeeinrichtung
- 8 Antriebsschale des Nullwandlers

Bild 2 – Schematische Darstellung der Kalibrierung durch piezoelektrische Kompensation

Bei Frequenzen von mehr als 1 kHz muss die Kalibrierkammer 8.3.2 entsprechen.

Wenn sich die gleichzeitigen Einflüsse des Schallquellensenders und der Antriebsschale des Nullwandlers gegenseitig aufheben, ist die Verformung der äußeren Schale gleich null; der Schalldruck nahe dem Nullwandler ist dann gleich:

$$p = K(d_{jk}, E, r) U_c \quad (14)$$

Dabei ist

$K(d_{jk}, E, r)$	eine charakteristische Konstante des piezoelektrischen Nullwandlers;
d_{jk}	der piezoelektrische Modul des Schalenmaterials;
E	der Youngsche Modul des Schalenmaterials;
r	der mittlere Radius der Antriebswandlerschale;
U_c	die Kompensationsspannung bei der Frequenz f .

8.2.2 Bestimmung der charakteristischen Konstante

Die charakteristische Konstante $K(d_{jk}, E, r)$ ist im Allgemeinen nicht von der Frequenz abhängig. Sie wird experimentell durch harmonisches Ändern des Wasserspiegels über dem Nullwandler mit einer Amplitude h_0 und Kompensation der sich ergebenden Verformung des Nullwandlers durch eine Kompensationsspannung mit einer Amplitude U_{c0} am Nullsender bestimmt (siehe Bild 2). Diese Kompensationsspannung muss dieselbe Frequenz besitzen wie die Oszillation des Wasserspiegels. Sie muss entweder vom Oszillator, der die Veränderung des Wasserspiegels bewirkt, oder von einem Drucksensor, der die harmonische Verschiebung des Wasserspiegels in eine Wechselspannung umwandelt, ermittelt werden.

ANMERKUNG Zu diesem Zweck wird der Hohlraum des Messtanks über einen Schlauch mit einem offenen Gefäß verbunden, das auf einem Schüttelgerät befestigt ist, das vertikale sinusförmige Schwingungen mit bekannter Amplitude erzeugt. Dafür ist es notwendig, dass die Schwingfrequenz ausreichend tief ist (0,3 Hz), um die in der schwingenden Flüssigkeit entstehenden Trägheitskräfte vernachlässigen zu können.

Die Amplitude der Kompensationsspannung U_{c0} und ihre Phase werden so lange angepasst, bis die Verschiebung des Nullwandlers null ist.

Dann gilt:

$$K(d_{jk}, E, r) = \frac{p_0}{U_{c0}} = \frac{\rho g h_0}{U_{c0}} \quad (15)$$

8.2.3 Berechnung der Druckempfindlichkeit von Hydrophonen

Die Druckempfindlichkeit M_p des Hydrophons H in Bezug auf die Leerlaufspannung U_H ist gleich:

$$M_p = \frac{U_H U_{c0}}{\rho g h_0 U_c} \quad (16)$$

8.3 Entwurf der Kalibrierkammer

In Abhängigkeit vom Frequenzbereich werden beim Verfahren der piezoelektrischen Kompensation zwei Arten von Kammern verwendet, die eine bei tiefen und die andere bei hohen Frequenzen.

8.3.1 Kammer für tiefe Frequenzen

Die Kammer für tiefe Frequenzen muss aus einem Rohrabschnitt aufgebaut werden, der an beiden Enden mit Deckeln versehen ist. Auf den Deckeln sind ein Schallquellensender und ein Nullwandler zu befestigen (siehe Bild 2). Die geometrischen Mittelpunkte der Wandler müssen in derselben horizontalen Ebene angeordnet werden.

Der Schallquellensender muss einen ausreichend hohen Druckpegel erzeugen, um einen ausreichenden Rauschabstand zu erreichen.

Folgende Vorkehrungen müssen getroffen werden:

- a) Der Tank ist so auszuführen, dass eingeschlossene Luft leicht entfernt werden kann;
- b) die akustische Nachgiebigkeit der Tankwände muss geringer sein als die Nachgiebigkeit des Wasservolumens;
- c) Nut- und Federverbindungen oder Metalledichtungen sind nachgiebigeren Dichtungen gegenüber vorzuziehen;
- d) der Tank muss so ausgeführt und der Schallquellensender so befestigt werden, dass die Anregung von Biegeschwingungsformen der Tankwände auf ein Mindestmaß reduziert wird;
- e) es müssen alle notwendigen Maßnahmen getroffen werden, um jegliche Beeinflussung des Nullwandlers und des Hydrophons durch Schwingungen des Tanks zu vermeiden.

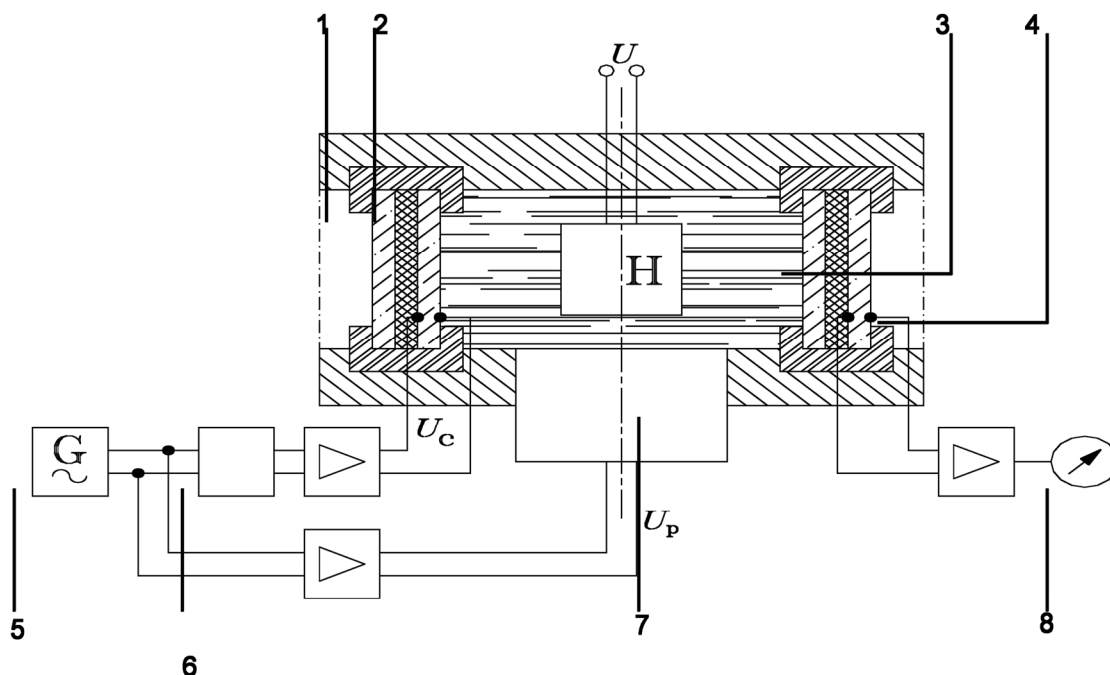
Um Umgebungsbedingungen zu regeln, muss der Tank mit Einrichtungen zum Entgasen, Umwälzen und zur Druckbeaufschlagung des Wassers und zur Regelung seiner Temperatur ausgerüstet sein. Das zu messende Hydrophon und der piezoelektrische Nullwandler müssen als gesonderte Einheiten eingebaut werden.

8.3.2 Kammer für hohe Frequenzen

Die Kammer für hohe Frequenzen muss Bild 3 entsprechen. Die Längenmaße müssen möglichst klein gehalten werden, um den oberen Grenzwert der Frequenz auf über 1 kHz zu erhöhen.

Der piezoelektrische Nullwandler muss aus zwei konzentrischen zylindrischen piezoelektrischen Keramikschalen bestehen, die zwischen zwei massiven Flanschen eingespannt sind. Der Raum zwischen den beiden Zylindern ist mit einem nicht leitenden Elastomerwerkstoff auszufüllen. Der Nullwandler muss die Zylinderwand der Kammer bilden, und der Messraum der Kammer darf nicht größer sein als das Innenvolumen der inneren Schale. Der Wechseldruck wird vom Schallquellensender, einem im Kammerboden befestigten piezoelektrischen Keramiksender, erzeugt. Dieser Sender muss einen ausreichend hohen Druckpegel erzeugen, um einen ausreichenden Rauschabstand sicherzustellen.

Das Hydrophon ist auf dem Deckel der Kammer zu befestigen. Für den Entwurf der Kammer für hohe Frequenzen sind dieselben Vorkehrungen zu treffen, wie in 8.3.1 für die Kammer für tiefe Frequenzen festgelegt. Darüber hinaus müssen Maßnahmen getroffen werden, um den Einfluss der Längsverformung der piezoelektrischen Schalen infolge des piezoelektrischen Quereffekts auf die Ausgangsspannung des Verformungssensors zu verringern. Der Nullwandler und seine elektrischen Anschlüsse sind angemessen zu schirmen.



Legende

- 1 Verschiebungssensor des Nullwandlers
- 2 Antriebsschale des Nullwandlers
- 3 Elastische Füllmasse
- 4 Abschirmung
- 5 Signalgenerator
- 6 Phasen- und Amplitudenregler
- 7 Schallquellensender
- 8 Nullanzeigeeinrichtung

Bild 3 – Darstellung der Kammer für hohe Frequenzen

8.4 Praktische Einschränkungen des Verfahrens der piezoelektrischen Kompensation

Das Verfahren darf nicht bei Frequenzen oberhalb des oberen Frequenzgrenzwerts angewendet werden, der durch stehende Wellen auferlegt wird, die in der Kammer bei Frequenzen höher als 1 kHz auftreten können. Stehende Wellen rufen eine ungleichförmige Druckverteilung in der Kammer hervor, sodass der Ausgangspegel des Hydrophons von dessen Position in der Kammer abhängt.

Unabhängig von der Ausführung der Kammer darf das System nicht bei einer Frequenz angewendet werden, die höher als etwa zwei Drittel der Grundresonanzfrequenz des Tankraums ist.

Das Verfahren darf nicht bei Frequenzen unterhalb des unteren Frequenzgrenzwerts angewendet werden, der durch den Empfindlichkeitsverlust des piezoelektrischen Verformungssensors auferlegt ist, der durch seinen eigenen Streuwiderstand (Ableitwiderstand) und durch den Lastwiderstand des Eingangs der Nullanzeigeeinrichtung verursacht wird.

ANMERKUNG 1 Durch vorschriftsmäßigen Entwurf der Kammer kann mit diesem Verfahren ein Frequenzbereich von 1 Hz bis 4 kHz abgedeckt werden.

ANMERKUNG 2 Bei symmetrischen Hydrophonen ist es erforderlich, diese so in der Kammer anzuordnen, dass die akustischen Symmetrieebenen des Nullwandlers und des Hydrophons zusammenfallen. Auf diese Weise wird der Einfluss von stehenden Wellen auf das Kalibrierergebnis auf ein Mindestmaß verringert und kann der Frequenzbereich erweitert werden [13].

ANMERKUNG 3 Die akustische Symmetrieebene ist die Ebene, bei der sich mögliche Abweichungen des Schalldrucks vom Mittelwert, die auf verschiedene Wandlerteile wirken, gegenseitig kompensieren.

ANMERKUNG 4 In der Praxis fällt die akustische Symmetrieebene des Nullwandlers mit der geometrischen Symmetrieebene zusammen. Dasselbe gilt für ein einfaches ungerichtetes Hydrophon, wenn einerseits die Bereiche (Flächen) der aktiven Oberfläche auf gegenüberliegenden Seiten der Ebene und andererseits die örtlichen Empfindlichkeiten dieser Bereiche gleich sind.

8.5 Relatives Kalibrierverfahren

Bei diesem Verfahren kommt zur Erzeugung des Schalldruckfeldes in der geschlossenen Kammer ein Sender zum Einsatz, und ein kalibrierter Wandler und das unbekannte Hydrophon werden gleichzeitig oder abwechselnd nacheinander in die Kammer eingebracht; diese Kalibrierung gilt für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 2 kHz.

Die Empfindlichkeit des Hydrophons ist nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$M_H = \frac{U_H}{U_0} M_p \quad (17)$$

Die Einschränkungen entsprechen 8.3. Das Messverfahren ist leicht und einfach durchzuführen. Dieses Verfahren ist weitverbreitet und kann für Kalibrierungen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 2 kHz angewendet werden. Werden der kalibrierte Wandler und das unbekannte Hydrophon abwechselnd nacheinander in die Kammer eingebracht, so müssen sie identisch sein; anderenfalls entstehen aufgrund unterschiedlicher Bedingungen in der Messkammer (Änderung der Biegsamkeit, Eindringen von Luftblasen usw. beim Wiedereinsetzen der Hydrophone) weitere Messunsicherheitsquellen.

8.6 Messunsicherheit

Wenn die in 8.3 angegebenen Bedingungen erfüllt sind, ist die Kalibrierung mit dem Verfahren der piezoelektrischen Kompensation bei sorgfältiger Ausführung einer Freifeldkalibrierung mit einer möglichen erweiterten Gesamtmessunsicherheit von weniger als 0,5 dB (95 %-Vertrauensniveau) äquivalent. Bei Frequenzen bis etwa ein Fünftel der niedrigsten Resonanzfrequenz der Kammer kann die erweiterte Gesamtmessunsicherheit der Kalibrierung geringer als 0,3 dB (95 %-Vertrauensniveau) sein. Für das relative Kalibrierverfahren wird erwartet, dass die erweiterte Gesamtmessunsicherheit geringer als 1,2 dB (95 %-Vertrauensniveau) sein.

9 Reziprozitätskalibrierung mit dem akustischen Koppler

9.1 Allgemeines

Dieses Verfahren der Hydrophonkalibrierung nach dem Reziprozitätsgesetz mit akustischem Koppler und ohne Referenzwandler gilt für den Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 5 kHz. Es handelt sich bei diesem Verfahren um eine absolute Kalibrierung von Hydrophonen, die in einem Koppler unter Anwendung des Reziprozitätsgrundsatzes durchgeführt wird, [17] bis [20]. Dieses Verfahren eignet sich zur Bestimmung der Empfindlichkeit von Hydrophonen in Abhängigkeit von der Temperatur und dem statischen Druck.

9.2 Kurzbeschreibung

9.2.1 Theorie der Reziprozität des akustischen Kopplers

Die Anordnung der Wandler in einem zur Reziprozitätskalibrierung zu verwendenden Koppler muss Bild 4 entsprechen. Ein reziproker Wandler T, eine lineare elektroakustische Schallquelle P und ein Hydrophon H werden in einem mit Fluid gefüllten Koppler befestigt. Bei Verwendung des reziproken Wandlers als Sender und des Hydrophons als Empfänger oder alternativ bei Verwendung der Schallquelle als Sender und abwechselnd des reziproken Wandlers und des Hydrophons als Empfänger wird der Wert der elektrischen Übertragungsimpedanz bei einer Anzahl von über den gesamten interessierenden Frequenzbereich verteilten

Frequenzen gemessen. Aus den so bei jeder Frequenz gemessenen drei Übertragungsimpedanzen lässt sich die Druckempfindlichkeit M_p des Hydrophons wie folgt berechnen:

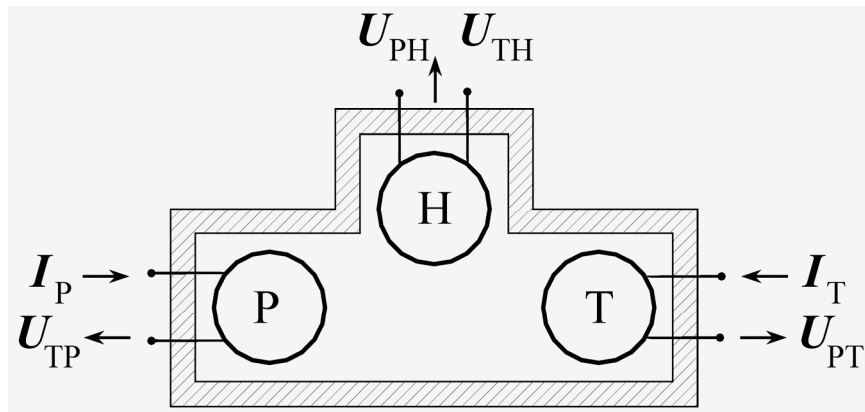


Bild 4 – Reziprozitätskoppler mit drei Wandlern: einem Sender P, einem reziproken Wandler T und dem zu kalibrierenden Hydrophon H

9.2.2 Verfahren der Reziprozitätskalibrierung

Wenn ein Strom I_P durch einen Sender P mit einer bestimmten Übertragungsantwort für den Strom in einer kleinen Kammer, S_P , fließt, erzeugt der Sender einen Schalldruck p , der wie folgt zu berechnen ist:

$$p = S_P I_P \quad (18)$$

Im Koppler wird ein Hydrophon H mit einer Druckempfindlichkeit M_p angeordnet, wodurch eine Leerlaufspannung U_{PH} erzeugt wird, die wie folgt gegeben ist:

$$U_{PH} = M_p p = M_p S_P I_P \quad (19)$$

Der Wert der elektrischen Übertragungsimpedanz $|Z_{PH}|$ dieses Wandlerpaars ist wie folgt zu berechnen:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_P} = M_p S_P \quad (20)$$

Im zweiten Schritt wird der Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz $|Z_{PT}|$, nachdem das Hydrophon H durch einen reziproken Wandler T ersetzt wurde, wie folgt bestimmt:

$$|Z_{PT}| = \frac{U_{PT}}{I_P} = M_T S_P \quad (21)$$

Im dritten Schritt wird der Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz $|Z_{TH}|$ wie folgt berechnet:

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = M_p S_T \quad (22)$$

Nun kann leicht gezeigt werden, dass:

$$\frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} = M_T S_T \quad (23)$$

Bei einem reziproken Wandler ist der Quotient aus der Druckempfindlichkeit und dem für den Strom in einer kleinen Kammer geltenden Übertragungskoeffizient gleich dem Reziprozitätsparameter für eine kleine Kammer, ωC_t :

$$\frac{M_T}{S_T} = \omega C_t \quad (24)$$

Dabei ist

C_t die akustische Gesamtnachgiebigkeit des Kopplers.

Da das Produkt und der Quotient der Druckempfindlichkeit M_p und der Strom-Übertragungskoeffizient, S_T , des Wandlers T bekannt sind, müssen die Werte für M_p und S_T anhand der Gleichungen (23) und (24) wie folgt berechnet werden:

$$M_T^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (25)$$

$$S_T^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (26)$$

Anhand der Gleichungen (22) und (26) wird für die Empfindlichkeit des Hydrophons M_H Folgendes berechnet:

$$M_H^2 = \omega C_t \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (27)$$

In ähnlicher Weise wird anhand der Gleichungen (20) und (27) der Stromübertragungskoeffizient S_P des Senders P berechnet:

$$S_P^2 = \frac{1}{\omega C_t} \frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} \quad (28)$$

ANMERKUNG 1 Die statistische Genauigkeit kann verbessert und die Reziprozität überprüft werden, wenn mehr als ein Wandler reziprok ist. Falls z. B. der Sender P auch als Hydrophon verwendet werden kann, kann auch der Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz $|Z_{TP}|$ bestimmt werden. Nun kann mit dem Reziprozitätsgesetz gezeigt werden, dass $|Z_{TP}|$ gleich $|Z_{PT}|$ ist. Damit kann $|Z_{PT}|$ auch zweifach ermittelt werden, einmal durch Verwendung von P als Sender und T als Hydrophon und außerdem durch Verwendung von T als Sender und P als Hydrophon.

Ergibt sich zwischen diesen beiden Werten bei derselben Frequenz eine Differenz, so zeigt dies an, dass keine Reziprozität oder Linearität besteht oder dass ein Messfehler vorliegt. Die Messunsicherheit des Mittelwertes kann geringer als die jedes Einzelwerts sein.

ANMERKUNG 2 Wird die Kalibrierung mit mehr als drei Wandlern durchgeführt und sind zwei oder mehr reziprok, so kann die Messunsicherheit verringert werden, weil die Empfindlichkeit mehrmals berechnet werden kann, wobei unabhängige Ergebnisse von verschiedenen Wandlerkombinationen verwendet werden. Der Mittelwert aller Ergebnisse bei derselben Frequenz besitzt eine geringere statistische Unsicherheit als jeder Einzelwert.

9.2.3 Berechnung der Übertragungsimpedanz

Die elektrische Übertragungsimpedanz zwischen einem Sender und einem Hydrophon wird aus den gemessenen komplexen Werten des Sendestroms und der Hydrophonspannung berechnet.

Für höchste Genauigkeit muss der Strom durch denselben Messkanal wie die Hydrophonspannung gemessen werden (der Messkanal kann aus einem Verstärker, einem Filter, einem A/D-Umsetzer usw. bestehen).

ANMERKUNG 1 Im letztgenannten Fall erfordern die im Messkanal verwendeten Geräte keine absolute Kalibrierung.

ANMERKUNG 2 Falls erforderlich darf ein kalibriertes Dämpfungsglied verwendet werden, um die den Sendestrom repräsentierende Spannung der Hydrophonspannung anzugleichen. Dies reduziert Fehler infolge von Nichtlinearität im Messkanal auf ein Mindestmaß.

ANMERKUNG 3 Da diese Impedanz von den Feldbedingungen und den elektrischen Lastbedingungen des Senders und des Hydrophons abhängt, werden diese Bedingungen sowie die elektrischen Anschlüsse, an denen die Spannung und der Strom gemessen werden, festgelegt.

9.2.4 Bestimmung der akustischen Nachgiebigkeit

Sind der Koppler und die Wandler im Koppler starr und ist das Volumen V_f des Fluids im Koppler genau bekannt, so ist die akustische Nachgiebigkeit gegeben mit:

$$C_t = \frac{V_f}{\rho_f c_f^2} \quad (29)$$

Dabei ist

ρ_f die Dichte des Fluids;

c_f die Schallgeschwindigkeit im Fluid.

Für die höchste Genauigkeit müssen die Nachgiebigkeiten der Kopplerwände und der Wandler im Koppler berücksichtigt werden. Elastische Dichtungen müssen so ausgeführt sein, dass sie dem akustischen Feld im Koppler nicht ausgesetzt werden. Die Nachgiebigkeiten der aktiven Elemente der elektroakustischen Wandler im Koppler müssen entweder aus den veröffentlichten Materialeigenschaften berechnet oder nach dem von McKinney et al., siehe [21], entwickelten Verfahren im Koppler gemessen werden.

ANMERKUNG Für die höchste Genauigkeit kann die Nachgiebigkeit der Kopplerwand nach der Methode der finiten Elemente berechnet werden.

Bauteile mit Gewinde, die den Innendruck des Kopplers aushalten sollen und mit groben großen Gewinden versehen sind, müssen vermieden werden, weil sie keine gut definierte Randbedingung bieten.

9.3 Begrenzung der Reziprozität des akustischen Kopplers

9.3.1 Frequenzgrenze

9.3.1.1 Obere Frequenzgrenze

Die obere Frequenzgrenze wird durch das größte Innenmaß des Kopplers bestimmt. Ist dieses Maß größer als ein Zehntel der Wellenlänge, so kann der Schalldruck im Koppler nicht mehr als gleichförmig angesehen werden und verliert die Kalibrierung ihre Gültigkeit.

ANMERKUNG In einigen Fällen ist es möglich, das akustische Feld innerhalb des Kopplers zu berechnen und eine entsprechende Korrektur vorzunehmen, wodurch die obere Frequenzgrenze ansteigt. Bei 5 kHz beträgt das Größtmaß eines mit Wasser gefüllten Kopplers 30 mm.

9.3.1.2 Untere Frequenzgrenze

Das Verfahren darf bei Frequenzen unterhalb der unteren Frequenzgrenze für den Koppler nicht angewendet werden.

ANMERKUNG Es gibt keine theoretische untere Frequenzgrenze. In der Praxis setzen jedoch die elektrischen Probleme beim Ansteuern eines kleinen piezoelektrischen Senders mit sehr hoher elektrischer Impedanz eine praktische untere Grenze von etwa 0,1 Hz für einen Koppler, der für die Verwendung bis zu einigen hundert Hertz ausgelegt ist. Ein kleinerer, für die Verwendung bei einer höheren Frequenz vorgesehener Koppler hat untere Frequenzgrenzen, die entsprechend höher sind.

9.3.2 Hydrophonbezogene Einschränkungen

Der Koppler darf nicht für die Kalibrierung von großen, gerichteten oder akustisch weichen Hydrophonen oder für die Kalibrierung von Hydrophonen nahe der Resonanz verwendet werden.

ANMERKUNG Im Falle von Hydrophonen, die im Reziprozitätskoppler kalibriert werden können, ist es notwendig, dass diese so im Koppler angebracht werden können, dass sie darin eine harte akustische Begrenzung bilden, oder dass ihr Beitrag zur Nachgiebigkeit des Kopplers bekannt ist. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass sie so ausgelegt sind, dass das Innenvolumen des Kopplers bekannt ist, wenn sie darin befestigt werden. Es gibt nur wenige Hydrophone, die diese Einschränkungen erfüllen. Um eine weiter gefasste Gruppe von Hydrophonen zu kalibrieren, ist es erforderlich, den Prozess um die in 9.6, 9.7 und 9.8 beschriebenen Verfahren zu erweitern.

9.4 Messung

Die Messung muss nach 6.3, 6.4 und wie folgt durchgeführt werden:

9.4.1 Auftreten von Interferenzeffekten

Es muss sorgfältig sichergestellt werden, dass bei den Messungen keine Störungen durch elektrisches Übersprechen auftreten.

9.4.2 Überprüfung der Reziprozität

Da das Verfahren von der Annahme abhängt, dass mindestens ein Wandler reziprok ist, muss diese Annahme nachgeprüft werden. Die Reziprozität eines Paares reziproker Wandler ist durch Vergleich der Beträge der elektrischen Übertragungsimpedanzen zu überprüfen, wenn die Funktionen von Sender und

Empfänger ohne Änderung der Wandlerpositionen vertauscht werden (d. h. durch Vergleich von Z_{PT} und Z_{TP} , wobei sowohl P als auch T reziprok sind) [8].

ANMERKUNG 1 Bei guten Wandlern, die innerhalb ihres Hauptbetriebsbereichs eingesetzt werden, ist es möglich, eine Übereinstimmung zwischen den Übertragungsimpedanzen von wenigen Prozent zu erreichen.

ANMERKUNG 2 Eine Abweichung von mehr als $\pm 5\%$ weist darauf hin, dass wahrscheinlich mindestens einer der Wandler kein reziprokes Verhalten aufweist. Die Verwendung eines dritten reversiblen Wandlers bei der Überprüfung der Reziprozität kann aufzeigen, welcher der Wandler nicht reziprok ist. Bei einer Reziprozitätskalibrierung dürfen nicht-reziproke Wandler nur als Sender oder Hydrophon (je nach Zweckmäßigkeit) verwendet werden.

Es können große Diskrepanzen zwischen Z_{PT} und Z_{TP} auftreten, wenn ein (oder beide) Wandler zu stark angeregt wird (werden), was zu nichtlinearem Verhalten führt. In diesem Falle führt eine Verringerung der Amplitude des Anregungssignals für die Wandler zu einer Verbesserung der Übereinstimmung. Führt eine derartige Verringerung jedoch zu einem unannehmbar geringen Rauschabstand, so muss die Verwendung alternativer Wandler in Betracht gezogen werden.

Um bei der Reziprozitätskalibrierung die geringste Messunsicherheit zu erreichen, müssen die reziproken Wandler innerhalb ihres für den Normalbetrieb vorgesehenen Frequenzbandes (bei einem piezoelektrischen Wandler typischerweise bis zur ersten Resonanzfrequenz) verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Die Verwendung eines Wandlers bei Frequenzen außerhalb dieses Bands (z. B. bei Frequenzen, die viel größer als die Resonanzfrequenz sind) kann zu einem nichtreziproken Verhalten und zu einer Verschlechterung der Genauigkeit der Kalibrierung führen.

ANMERKUNG 2 Die Kalibrierung eines Hydrophons über einen großen Frequenzbereich kann den Einsatz mehrerer verschiedener reziproker Wandler erfordern, um den gesamten Bereich mit ausreichend geringer Messunsicherheit abzudecken.

ANMERKUNG 3 Wenn die bei der Überprüfung der Reziprozität verwendeten Wandler in ihrem Aufbau identisch sind, können sie im selben Maße nichtlinear sein und dennoch reziprok erscheinen. Daher sollte die Überprüfung der Reziprozität mit Wandlern unterschiedlichen Aufbaus durchgeführt werden, bevor einer von ihnen als reziprok angesehen werden kann.

9.4.3 Überprüfung der Linearität

Falls irgendein Zweifel bezüglich der Linearität der Wandler besteht, muss die Linearität jedes Wandlerpaars durch Vergleich der Beträge der elektrischen Übertragungsimpedanz bei verschiedenen Sendestromwerten innerhalb des Dynamikbereichs des Systems bei derselben Frequenz überprüft werden. Bei einem Pegel beginnend, der 20 dB höher als der Grundrauschpegel ist, bis zum höchsten verwendeten Pegel muss der Betrag der Übertragungsimpedanz innerhalb von $\pm 5\%$ konstant bleiben.

ANMERKUNG Es wird dafür gesorgt, dass die Signalpegel während der eigentlichen Kalibrierung innerhalb des Linearitätsbereichs gehalten werden. Da dieser Bereich für jedes Wandlerpaar unterschiedlich sein kann, ist eine sorgfältige Beobachtung der Signalpegel erforderlich.

9.5 Messunsicherheit

Die Bedingungen von Reziprozität, Linearität und oberer Frequenzgrenze nach 9.3.1, 9.4.2 und 9.4.3 müssen erfüllt sein, dann kann die erweiterte Gesamtmessunsicherheit (95 %-Vertrauensniveau) der Kalibrierung bei sorgfältiger Ausführung unter der Voraussetzung, dass Gleichung (29) gültig ist, geringer als 0,5 dB sein.

ANMERKUNG 1 Die Hauptbeiträge zur Gesamtmessunsicherheit sind die Unsicherheit in der Nachgiebigkeit des Kopplers und die Ungleichförmigkeit des Schallfelds im Koppler.

ANMERKUNG 2 Unter Beachtung aller Beiträge zur Nachgiebigkeit des Kopplers, durch Beschränkung der Betriebsfrequenz auf noch niedrigere Frequenzen und durch Berechnung der Wirkungen der Ungleichförmigkeit des Schallfelds kann die erweiterte Gesamtmessunsicherheit (95 %-Vertrauensniveau) der Kalibrierung auf unter 0,2 dB verringert werden.

ANMERKUNG 3 Wenn ein Hydrophon einen Vorverstärker besitzt, ist es üblich, nur das aktive Element des Hydrophons in den Koppler einzusetzen, um die Größe des Kopplers klein zu halten. Falls das Vorverstärkergehäuse des Hydrophons Schall streut, dann weicht die Freifeldempfindlichkeit des Hydrophons von der Druckempfindlichkeit des Hydrophons ab. Dies ist ein möglicher Grund, dass der Beugungsfaktor von eins abweicht.

9.6 Kalibrierung mit einem Referenzkoppler mit zwei reziproken Wandlern und einem Zusatzkoppler mit denselben beiden Wandlern und einem zu kalibrierenden Hydrophon

9.6.1 Allgemeines

Die beiden reziproken Wandler werden in einem Referenzkoppler angeordnet, dessen Volumen und akustische Nachgiebigkeit genau bekannt sind. Die elektrische Übertragungsimpedanz zwischen einem der Wandler, der als Sender verwendet wird, und dem anderen Wandler, der als Hydrophon verwendet wird, wird bei einer Anzahl von über den gesamten interessierenden Frequenzbereich verteilten Frequenzen gemessen.

Die beiden reziproken Wandler werden zusammen mit dem zu kalibrierenden Hydrophon in einem Zusatzkoppler angeordnet. Die elektrischen Übertragungsimpedanzen zwischen jedem der Wandler und dem Hydrophon und zwischen jedem der Wandler und dem anderen Wandler, der als Hydrophon verwendet wird, werden bei denselben Frequenzen, wie oben festgelegt, gemessen.

Aus den fünf bei jeder Frequenz gemessenen elektrischen Übertragungsimpedanzen wird die akustische Druckempfindlichkeit des Hydrophons berechnet.