

DIN EN 60565

ICS 17.140.50

Siehe jedoch Beginn der
Gültigkeit

**Wasserschall –
Hydrophone –
Kalibrierung im Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 1 MHz
(IEC 60565:2006);
Deutsche Fassung EN 60565:2007**

Underwater acoustics –
Hydrophones –
Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz (IEC 60565:2006);
German version EN 60565:2007

Acoustique sous-marine –
Hydrophones –
Étalonnage dans la bande de fréquences de 0,01 Hz à 1 MHz (CEI 60565:2006);
Version allemande EN 60565:2007

Gesamtumfang 78 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Beginn der Gültigkeit

Die von CENELEC am 2006-12-01 angenommene EN 60565 gilt als DIN-Norm ab 2007-08-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 60565:2005-02.

Für diese Norm ist das nationale Arbeitsgremium GUK 821.3 „Medizinische Ultraschallgeräte“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (<http://www.dke.de>) zuständig.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 87 „Ultrasonics“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ mit den Daten zu dieser Publikation angegebenen Datum (maintenance result date) unverändert bleiben soll. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnichtsnummer, 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.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen 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.

Deutsche Fassung

Wasserschall –
Hydrophone –
Kalibrierung im Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 1 MHz
(IEC 60565:2006)

Underwater acoustics –
Hydrophones –
Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1
MHz
(IEC 60565:2006)

Acoustique sous-marine –
Hydrophones –
Etalonnage dans la bande de fréquences de
0,01 Hz à 1 MHz
(CEI 60565:2006)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2006-12-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

© 2007 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 60565:2007 D

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 87/357/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe von IEC 60565, ausgearbeitet von dem IEC/TC 87 „Ultrasonics“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2006-12-01 als EN 60565 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2007-09-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2009-12-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 60565:2006 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort	2
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Formelzeichen/Symbole und Abkürzungen	12
5 Kalibrierverfahren	14
5.1 Kurzbeschreibung	14
5.2 Feldbegrenzungen	14
5.3 Schematische Übersicht der Verfahren	14
5.4 Darstellung der Ergebnisse	15
5.5 Intervalle für die Rekalibrierung	15
5.6 Betrachtungen über Temperatur und Druck für die Kalibrierung	15
6 Vorbereitung von Wandlern	16
6.1 Befeuchten	16
6.2 Hydrophonhalterung	16
6.3 Einfluss des Kabels	16
7 Elektrische Messungen	16
7.1 Signalart	16
7.2 Erdung	16
7.3 Messung der Ausgangsspannung des Hydrophons	17
7.4 Messung des Sendestroms	18
7.5 Messung der Übertragungsimpedanz	18
8 Freifeld-Reziprozitätskalibrierung	19
8.1 Allgemeines Prinzip	19
8.2 Theorie	19
8.3 Trennabstand	23
8.4 Mindestabstand von Wandlern zur Begrenzungsfläche	24
8.5 Frequenzbegrenzung	24
8.6 Messungen und Überprüfungen	25
8.7 Messunsicherheit	27
9 Freifeld-Vergleichskalibrierung	28
9.1 Kurzbeschreibung	28
9.2 Vergleich mit einem Standardhydrophon	28
9.3 Kalibrierung mit einem kalibrierten Sender	29
10 Kalibrierung durch hydrostatische Anregung	30
10.1 Kurzbeschreibung	30
10.2 Bestimmung des äquivalenten Drucks	30
10.3 Messung des Übertragungskoeffizienten von Hydrophonen	34

	Seite
10.4 Aufbau des Schwingungssystems.....	34
10.5 Messunsicherheit.....	35
10.6 Alternatives Verfahren für hydrostatische Anregung.....	35
11 Kalibrierung durch piezoelektrische Kompensation	36
11.1 Kurzbeschreibung.....	36
11.2 Verfahren	37
11.3 Aufbau der Kalibrierkammer.....	38
11.4 Praktische Einschränkungen des Verfahrens der piezoelektrischen Kompensation	39
11.5 Messunsicherheit.....	40
12 Reziprozitätskalibrierung mit dem akustischen Kuppler.....	40
12.1 Kurzbeschreibung.....	40
12.2 Verfahren	40
12.3 Theorie.....	41
12.4 Akustische Nachgiebigkeit	42
12.5 Obere Frequenzgrenze	42
12.6 Untere Frequenzgrenze.....	42
12.7 Messung	42
12.8 Messunsicherheit.....	42
12.9 Einschränkungen.....	43
12.10 Kalibrierung mit einem Bezugskuppler mit zwei reziproken Wandlern und einem Zusatzkuppler mit denselben beiden Wandlern und einem zu kalibrierenden Hydrophon.....	43
12.11 Kalibrierung mit einem Bezugskuppler mit zwei reziproken Wandlern und einem Zusatzkuppler mit denselben beiden Wandlern, einem zu kalibrierenden Hydrophon und einer Schallquelle	45
12.12 Kalibrierung mit einem Kuppler, einem reziproken Wandler, einem Sender, einem zu kalibrierenden Hydrophon und einem Zusatzkörper mit bekannter Nachgiebigkeit	46
13 Kalibrierung mit einem Pistonphon.....	49
13.1 Kurzbeschreibung.....	49
13.2 Verfahren	49
13.3 Einschränkungen.....	51
13.4 Messunsicherheit.....	52
14 Kalibrierung mit einer schwingenden Säule	53
14.1 Kurzbeschreibung.....	53
14.2 Verfahren	53
14.3 Darstellung des Drucks	54
14.4 Bestimmung des Übertragungskoeffizienten.....	54
14.5 Messbedingungen	56
14.6 Messunsicherheit.....	57
Anhang A (informativ) Richtungsempfindlichkeit eines Hydrophons.....	58
Anhang B (informativ) Korrekturen für elektrische Belastung	60
Anhang C (informativ) Impulsverfahren bei Freifeldkalibrierungen	61

Anhang D (informativ) Bewertung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Hydrophonen.....	69
Anhang E (informativ) Ersatzschaltung des Anregungssystems für die Kalibrierung mit einer schwingenden Säule	72
Literaturhinweise	73
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	76

Bilder

Bild 1 – Linkshändiges Koordinatensystem.....	6
Bild 3 – Darstellung des Verfahrens der hydrostatischen Anregung.....	31
Bild 4 – Schematische Darstellung des Messsystems	36
Bild 5 – Diagramm der Kammer für hohe Frequenzen	39
Bild 6 – Reziprozitätskuppler mit drei Wandlern: einem Sender P, einem reziproken Wandler T und einem zu kalibrierenden Hydrophon H.....	41
Bild 7 – Bezugskuppler mit zwei Wandlern: einem Sender P und einem reziproken Wandler T	44
Bild 8 – Zusatzkuppler mit drei Wandlern: einem Sender P, einem reziproken Wandler T und einem zu kalibrierenden Hydrophon H.....	44
Bild 9 – Zusatzkuppler mit vier Wandlern: einem Sender P, einem reziproken Wandler T, einer Schallquelle S und einem zu kalibrierenden Hydrophon H	46
Bild 10 – Schematische Darstellung des Messsystems	48
Bild 11 – Pistonphon.....	52
Bild 12 – Schwingende Säule.....	53
Bild C.1 – Schematische Darstellung eines Senders und eines Empfängers in einem Wassertank mit den Hauptreflexionsquellen.....	62
Bild C.2 – Echoankunftszeit in einem Tank von 6 m × 6 m × 5 m mit optimal angeordneten Wandlern	63
Bild C.3 – Hydrophonsignale für ein Paar kugelförmiger Wandler [Sender: 18 kHz Resonanzfrequenz; Q -Faktor von 3,5; Hydrophon: 350 kHz Resonanzfrequenz, Anregungsfrequenz: 2 kHz (links) und 18 kHz (rechts)]	64
Bild E.1 – Vereinfachte Ersatzschaltung der schwingenden Säule.....	72

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt Verfahren zur Kalibrierung von Hydrophonen oder von als Hydrophone verwendeten reversiblen Wandlern, insbesondere im Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 1 MHz, fest. Des Weiteren werden Regeln für die Darstellung der Kalibrierdaten aufgestellt.

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 60050-801, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*

IEC 60500:1974, *IEC Standard hydrophone*

IEC 60866:1987, *Characteristics and calibration of hydrophones for operation in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Richtmaß

Differenz zwischen dem Übertragungsmaß eines Wandlers auf der Hauptachse und dem Übertragungsmaß des Wandlers in einer vorgegebenen Richtung

[IEV-801-25-69]

3.2

Koordinatensystem

System zum Bezeichnen der Richtcharakteristik des Wandlers

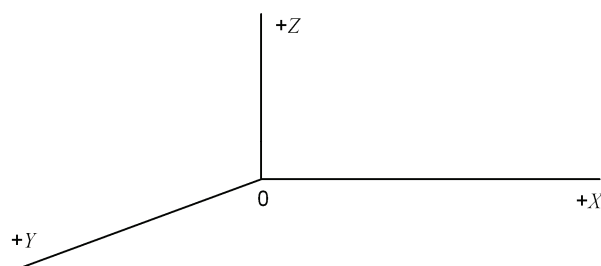


Bild 1 – Linkshändiges Koordinatensystem

Linearer Wandler: Symmetriemittellinie längs der Z-Achse

Dipol-Wandler: Beide Komponenten in gleichem Abstand vom Ursprung längs der +Z- und der –Z-Achse

Kolben-Wandler: Kolbenebene in ZOY-Ebene; Hauptachse längs X-Achse

ANMERKUNG 1 Für die Darstellung der Richtwirkung werden häufig die Benennungen „horizontale Richtcharakteristik“ und „vertikale Richtcharakteristik“ in der XY- bzw. XZ-(oder YZ-)Ebene verwendet.

ANMERKUNG 2 Siehe Anhang A, [1]¹ und [2].

¹ Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf die Literaturhinweise.

3.3**Kuppler**

Gerät, das aus einer starren flüssigkeitsgefüllten Kammer mit kleinen Abmessungen besteht, in die Wandler und Hydrophone eingesetzt werden können

3.4**Beugungsfaktor**

Verhältnis des am Empfangsteil des Hydrophons anliegenden mittleren Schalldrucks zum Schalldruck des freien Schallfelds am Bezugzentrum des Hydrophons

3.5**Richtungsempfindlichkeit**

im Allgemeinen grafisch dargestellte Beschreibung der Empfindlichkeit eines elektroakustischen Wandlers als Funktion der Ausbreitungsrichtung des abgestrahlten oder einfallenden Schalls in einer festgelegten Ebene durch das Bezugzentrum und bei einer festgelegten Frequenz

ANMERKUNG Siehe Anhang A.

3.6**Dynamikbereich**

Verhältnis des maximalen Schalldrucks im freien Schallfeld, der eine ungestörte Hydrophon-Ausgangsgröße erzeugt, zum äquivalenten Rauschdruck am Hydrophon

3.7**elektrische Impedanz eines Wandlers**

das komplexe Verhältnis der über den elektrischen Anschlüssen eines Wandlers bei einer vorgegebenen Frequenz angelegten momentanen Spannung zum resultierenden momentanen Strom

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist Ohm, Ω .

ANMERKUNG 2 Da diese Impedanz von den Feldbedingungen, dem hydrostatischen Druck, der Wassertemperatur und der Länge des am Wandler befestigten Kabels abhängt, sollten diese Parameter sowie die Frequenz und die Anschlüsse, an denen die Impedanz gemessen wird, festgelegt werden.

3.8**elektrische Anschlüsse eines reziproken Wandlers**

die Anschlüsse, an denen die Leerlaufspannung des Hydrophons sowie der Sendestrom gemessen werden

ANMERKUNG Wenn der Wandler in Wasser eingetaucht ist, wird der Anschluss mit der niedrigsten Impedanz, bezogen auf Wasser, „unterer Anschluss“ genannt. Folglich wird der andere Anschluss „hoher Anschluss“ genannt.

3.9**Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz**

Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz eines Wandlerpaars

ANMERKUNG Die Einheit ist Ohm, Ω .

3.10**elektrische Übertragungsimpedanz eines Wandlerpaars**

das komplexe Verhältnis der momentanen Leerlaufspannung U_H über den Hydrophonanschlüssen zum momentanen Strom I_P durch den Sender, wenn sich Sender und Hydrophon in einem freien Schallfeld befinden und ihre Hauptachsen in einer Linie und aufeinander zu gerichtet sind

ANMERKUNG 1
$$Z_{PH} = \frac{U_H}{I_P} \quad (1)$$

ANMERKUNG 2 Die Einheit ist Ohm, Ω .

ANMERKUNG 3 Diese Impedanz ist eine komplexe Größe. Sie besitzt sowohl Real- als auch Imaginärteil und kann als Betrag $|Z_{PH}|$ multipliziert mit einer Phase $\exp(j\varphi)$ dargestellt werden, wobei φ der Phasenwinkel zwischen Real- und Imaginärteil der Impedanz ist.

ANMERKUNG 4 Die Definition der Hauptachse ist in 3.23 angegeben.

ANMERKUNG 5 Siehe 7.5.

3.11

äquivalenter Rauschdruck

Schalldruck, der an das Hydrophon angelegt werden muss, um bei fehlendem Rauschen an den Anschlüssen des Hydrophons eine Spannung zu erzeugen, die gleich der an denselben Anschlüssen vorhandenen Rauschspannung ist, wenn kein Schalldruck vorhanden ist

ANMERKUNG Wenn der äquivalente Rauschdruck nicht gemessen werden kann, kann er aus dem äquivalenten Reihenwiderstand berechnet werden [2].

3.12

Fernfeld

Schallfeld in einem Abstand von der Schallquelle, in dem sich der Momentanwert des Schalldrucks und der Schallschnelle im Wesentlichen in Phase befinden

ANMERKUNG 1 Im Fernfeld scheint der Schalldruck kugelförmig von einem Punkt auf oder nahe der strahlenden Oberfläche divergierend auszugehen. Damit ist der durch die Schallquelle erzeugte Druck umgekehrt proportional zum Abstand von dieser Schallquelle.

ANMERKUNG 2 Für alle praktischen Kalibrierungen ist der Trennungsabstand zwischen der Schallquelle und dem Punkt, an dem der Druck gemessen wird, ausreichend groß, so dass der Schalldruck im Fernfeld der Schallquelle gemessen wird.

3.13

freies Schallfeld

Schallfeld in einem homogenen und isotropen Medium, in dem die Wirkungen der Begrenzungen vernachlässigbar sind

3.14

Freifeldübertragungsmaß

zwanzigfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Freifeldübertragungskoeffizienten M_f zu einem Bezugsübertragungskoeffizienten M_{ref}

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist Dezibel, dB.

ANMERKUNG 2 M_{ref} ist gleich $1 \text{ V} \cdot \mu\text{Pa}^{-1}$.

ANMERKUNG 3 Die Verwendung von Einheiten, die um einen Faktor 10^n (wobei n eine positive oder negative ganze Zahl ist) abweichen, ist nach den allgemeinen Regeln für das SI-System zulässig. In derartigen Fällen wird der Wert von M_{ref} gesondert angegeben.

3.15

Freifeldübertragungskoeffizient eines Hydrophons

Verhältnis der Leerlaufspannung des Hydrophons zum Schalldruck im ungestörten freien Schallfeld an der Stelle des Bezugszentrums des Hydrophons ohne Hydrophon

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist Volt je Pascal, $\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

ANMERKUNG 2 Der Druck ist sinusförmig.

ANMERKUNG 3 Anstelle des englischen Begriffs „sensitivity“ wird manchmal der Begriff „response“ verwendet.

3.16**Hydrophon**

Wandler, der zu Wasserschall-Signalen analoge elektrische Signale erzeugt

ANMERKUNG Die meisten Hydrophone sind reversibel und entsprechen dem Reziprozitätsgesetz. Somit können sie als Sender betrieben werden, falls sie nicht ständig mit einem Vorverstärker ausgerüstet sind.

3.17**Messunsicherheit**

ein Bereich von Werten um einen Messwert, der eine festgelegte Wahrscheinlichkeit besitzt, den genauen Wert für die gemessene Größe zu enthalten

ANMERKUNG Die in dieser Norm angegebenen Messunsicherheiten stellen die erweiterte Messunsicherheit dar und bedeuten 95-%-Vertrauensgrenzen. Die Komponenten der Messunsicherheit umfassen Komponenten des Typs A, die durch statistische Verfahren bewertet werden, und Komponenten des Typs B, die durch andere Mittel bewertet werden [3]; siehe Anhang D.

3.18**ungerichtete Charakteristik**

Übertragungskoeffizient eines Wandlers, der bei einer Richtungsänderung Änderungen zeigt, die kleiner als eine vorgegebene Grenze sind

ANMERKUNG Die ungerichtete Charakteristik in einem zweidimensionalen Raum kann in nur einer Ebene auftreten, während ein Wandler in drei Abmessungen in allen Ebenen durch das Bezugszentrum ungerichtet sein kann.

3.19**Leerlaufspannung eines Hydrophons**

Spannung an den elektrischen Anschlussklemmen eines Hydrophons, wenn kein Strom durch die Anschlussklemmen fließt

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist Volt, V.

ANMERKUNG 2 In dieser Norm sind alle Spannungen, Ströme und Schalldrücke Effektivwerte, sofern es nicht anders angegeben ist.

3.20**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

ANMERKUNG Die größte Abmessung des umschlossenen Raums sollte gegenüber der Wellenlänge des Schalls in dem akustischen Medium ausreichend klein sein. Siehe Abschnitt 13.

3.21**Druckübertragungsmaß**

zwanzigfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Druckübertragungskoeffizienten M_p zu einem Bezugs-Druckübertragungskoeffizienten M_{ref}

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist Dezibel, dB.

ANMERKUNG 2 Siehe 3.10, Anmerkungen 3 und 4.

3.22**Druckübertragungskoeffizient eines Hydrophons**

Verhältnis der Ausgangsspannung zum tatsächlichen Schalldruck, der in dem Bereich des Hydrophons herrscht, der für Schallempfang vorgesehen ist

ANMERKUNG 1 Siehe 3.15, Anmerkungen 2 und 3.

ANMERKUNG 2 Die Einheit ist Volt je Pascal, $V \cdot Pa^{-1}$.

3.23

Hauptachse

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

ANMERKUNG 1 Im Allgemeinen wird als Hauptachse die Struktur-Symmetrieachse oder die Richtung des maximalen Verlaufs gewählt.

ANMERKUNG 2 Die Richtung des maximalen Verlaufs kann sich mit der Frequenz des Schalls ändern.

3.24

reziproker Wandler

linearer, passiver, reversibler Wandler

ANMERKUNG Ein Beispiel eines nichtreziproken Wandlers ist ein Wandler, der aus einer Kombination eines Geräts mit einem magnetischen und einem elektrischen Feld besteht.

3.25

Bezugszentrum

der Punkt auf oder nahe einem Wandler, für den sein akustischer Empfangs-Übertragungskoeffizient und sein Sende-Übertragungskoeffizient definiert sind

ANMERKUNG Im Allgemeinen sollte das Bezugszentrum in der oder nahe der Mitte des aktiven Wandlerteils gewählt werden. Dies entspricht häufig dem geometrischen Zentrum des Wandlers. Beispielsweise sollte sich das Bezugszentrum für einen Wandler mit einer kugelförmigen Wandung aus einer piezoelektrischen Keramik im Zentrum der Kugel befinden. Das Bezugszentrum einer piezoelektrischen kugelförmigen Schale sollte sich auf der Symmetrieachse zwischen dem Zentrum der Krümmung der Schale und dem geometrischen Zentrum der Schale befinden. Bei kleineren Schalenwinkeln sollte es sich näher am geometrischen Zentrum der Schale befinden. Im Grenzfall eines Kolbenwandlers sollte sich das Bezugszentrum im Zentrum der strahlenden Kolbenfläche befinden. Diese Wahl führt dazu, dass die Messunsicherheit minimiert wird, die durch Kalibrierungen bei Trennabständen hervorgerufen wird, die geringer als die für Fernfeldbedingungen geforderten Trennabstände sind. (Siehe 3.12.)

3.26

reversibler Wandler

Wandler, der sowohl als Sender als auch als Hydrophon arbeiten kann

3.27

Sende-Stromübertragungsmaß

zwanzigfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Sende-Stromübertragungskoeffizienten S zu einem Bezugs-Stromübertragungskoeffizienten S_{ref}

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist Dezibel, dB.

ANMERKUNG 2 S_{ref} ist gleich $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

3.28

Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Senders

Verhältnis des Schalldrucks in einem Bezugsabstand vom Bezugszentrum eines Senders, multipliziert mit dem Bezugsabstand, zu dem durch die elektrischen Anschlussklemmen fließenden Strom bei einer vorgegebenen Frequenz und in einer festgelegten Richtung

ANMERKUNG 1 Der Bezugsabstand ist 1 m.

ANMERKUNG 2 Die Einheit ist Pascal-Meter je Ampere, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

3.29**Sende-Spannungsübertragungskoeffizient eines Senders**

Verhältnis des Schalldrucks in einem Bezugsabstand vom Bezugszentrum eines Senders, multipliziert mit dem Bezugsabstand, zu der Spannung über den elektrischen Anschlussklemmen bei einer vorgegebenen Frequenz und in einer festgelegten Richtung

ANMERKUNG 1 Der Bezugsabstand ist 1 m.

ANMERKUNG 2 Die Einheit ist Pascal-Meter je Volt, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

3.30**Sende-Spannungsübertragungsmaß**

zwanzigfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Sende-Spannungsübertragungskoeffizienten S_V zu einem Bezugs-Sende-Spannungsübertragungskoeffizienten $S_{V, \text{ref}}$

ANMERKUNG 1 Die Einheit ist Dezibel, dB.

ANMERKUNG 2 $S_{V, \text{ref}}$ ist gleich $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

3.31**Punktwandler**

Wandler, der in allen Ebenen eine ungerichtete Charakteristik besitzt und dessen Achse eine beliebige Richtung einnehmen kann

3.32**Linienwandler**

Wandler, der in einer Ebene eine ungerichtete Charakteristik besitzt und dessen Achse innerhalb dieser Ebene eine beliebige Richtung einnehmen kann

3.33**Dipolwandler**

Wandler, der zweiseitig gerichtet ist und zwei Achsen besitzt, die entgegengesetzt gerichtet sind

3.34**Flachkolbenwandler**

Wandler, der in einer Richtung wirksam ist und eine Achse im Allgemeinen senkrecht zur Kolbenoberfläche besitzt

3.35**Wandler mit einseitiger Richtwirkung**

Wandler, der vornehmlich gegenüber einem Schall empfindlich ist, der innerhalb eines Raumwinkels von nicht mehr als einer Halbkugel abgestrahlt wird oder einfällt

ANMERKUNG Siehe [4] bis [7].

3.36**Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Wandlers in einer kleinen Kammer**

Verhältnis des Schalldrucks (gleichförmig angenommen) in einer kleinen Kammer zu dem durch die elektrischen Anschlussklemmen eines Wandlers innerhalb der Kammer bei einer bestimmten Frequenz fließenden Stroms

ANMERKUNG Die Einheit ist Pascal je Ampere, $\text{Pa} \cdot \text{A}^{-1}$.

3.37**Sender**

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

3.38**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

ANMERKUNG 1 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.

ANMERKUNG 2 Siehe Abschnitt 14.

4 Formelzeichen/Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
A	effektive empfindliche Wandlerfläche
a	Längenabmessung des Wandlers
B	Flussdichte des Magnetfelds durch die Wandler­spule
C	Kapazität
C_c	akustische Nachgiebigkeit der Kammerwände
C_f	akustische Nachgiebigkeit des Flüssigkeitsvolumens in der Kammer
C_{mt}	mechanische Nachgiebigkeit der Kammer
C_t	akustische Nachgiebigkeit der Kammer
C_w	akustische Nachgiebigkeit des Wasservolumens in der Kammer
c	Schallgeschwindigkeit in Wasser
c_f	Schallgeschwindigkeit in einem Fluid
D	mittlerer Durchmesser des zylindrischen Gehäuses
D_i	Richtwirkungsmaß
d	Abstand zwischen Sender und Hydrophon
d_{31}	piezoelektrischer Modul
dS	differentielle Fläche auf einer Kugel
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
g	Erdbeschleunigung
h	Höhe der Wassersäule
I	Strom
I_p	Strom durch den Sender
I_T	Strom durch den Wandler
I_c	Kompensationsstrom durch den Nullsender
K	charakteristische Konstante des piezoelektrischen Nullwandlers
K_f^2	Korrekturfaktor
K_0	Erhöhungsfaktor
$l_{\text{Säule}}$	Länge der Säule
l	Breite des Tanks

M_f	Freifeldübertragungskoeffizient
M_H	Freifeldübertragungskoeffizient des Hydrophons
M_M	Druckübertragungskoeffizient des Mikrofons
M_T	Freifeldübertragungskoeffizient des Wandlers
M_P	Freifeldübertragungskoeffizient des Senders
M_p	Druckübertragungskoeffizient
m	Masse des Wassers im Innern der Kammer
p	Schalldruck
P	Sender
Q	Gütefaktor
R	Widerstand
R_θ	Richtfaktor
r	Radius des Wandlergehäuses
S	Sende-Stromübertragungskoeffizient
S_H	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Hydrophons bei Verwendung als Sender
S_P	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Senders
S_T	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Wandlers
S_V	Sende-Spannungsübertragungskoeffizient eines Senders
t	Dicke des zylindrischen Gehäuses
U	Spannung
U_c	Kompensationsspannung am Nullsender
U_H	Leerlaufspannung am Hydrophon
U_M	Leerlaufspannung am Mikrofon
U_P	Sendespannung am Sender
U_T	Sendespannung am Wandler
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
V	Wasservolumen, Kammervolumen
V_D	Verschiebungsvolumen
W	Bandbreite
x	Verschiebung des Nullwandlers, Schwingungsamplitude
Z	Impedanz
Z_{eq}	Funktion der Übertragungsimpedanzen mit der Maßeinheit der Impedanz
Z_{PH}	elektrische Übertragungsimpedanz von Sender und Hydrophon
Z_{TH}	elektrische Übertragungsimpedanz von Wandler und Hydrophon
Z_{PT}	elektrische Übertragungsimpedanz von Wandler und Sender

γ	Verhältnis der spezifischen Wärmen
θ	vertikaler Winkel
λ	Wellenlänge des Schalls in Wasser
λ_f	Wellenlänge des Schalls in einem Fluid
v	Rotationsgeschwindigkeit
ρ	Dichte von Wasser
ρ_f	Dichte des Fluids
σ	Poissonscher Modul
τ	Pulsdauer
φ	Azimutwinkel
ω	Kreisfrequenz = $2 \pi f$
S_T	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Wandlers in einer kleinen Kammer

5 Kalibrierverfahren

5.1 Kurzbeschreibung

a) Kalibrierung ohne Standardwandler

1) Reziprozitätskalibrierung

Eine Kalibrierung auf der Grundlage des Reziprozitätsgesetzes, bei der mindestens ein Wandler ein reziproker Wandler ist.

2) Physikalische Kalibrierung

Der Schalldruck am Hydrophon wird aus der Messung physikalischer Parameter, wie Verschiebung, Schallschnelle oder Beschleunigung, Nachgiebigkeit des Mediums usw. berechnet (z. B. Nullwandler, Pistonphon, schwingende Säule usw.).

b) Kalibrierung mit einem Standardwandler

Ein Hydrophon oder ein Sender wird durch Vergleich mit einem kalibrierten Standardwandler kalibriert.

ANMERKUNG In letzterem Fall kann der kalibrierte Sender für die Kalibrierung eines weiteren Hydrophons verwendet werden.

5.2 Feldbegrenzungen

Die Kalibrierung muss nach einem der folgenden Verfahren durchgeführt werden:

a) Freifeld-Kalibrierung nach Abschnitt 8 oder 9;

ANMERKUNG Die Begrenzungen des Schallfelds sind derartig, dass eine Kalibrierung unter den Bedingungen eines freien Schallfelds möglich ist (siehe 3.13).

b) Kalibrierung in einer kleinen Kammer nach den Abschnitten 10, 11, 12 oder 13.

ANMERKUNG In diesem Fall ist das Schallfeld auf einen kleinen Raum begrenzt, dessen größte Abmessung ausreichend kleiner als eine Wellenlänge des Schalls ist (siehe 11.4 und 11.5).

5.3 Schematische Übersicht der Verfahren

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

- a) Freifeldkalibrierung nach dem Reziprozitätsgesetz nach Abschnitt 8 bei einer Kalibrierung ohne Standardwandler in einem freien Schallfeld zwischen 1 kHz und 1 MHz.
- b) Freifeldkalibrierung durch Vergleich nach Abschnitt 9 bei einer Kalibrierung mit Standardwandler in einem freien Schallfeld zwischen 10 Hz und 1 MHz.
- c) Kalibrierung durch hydrostatische Anregung nach Abschnitt 10 bei einer physikalischen Kalibrierung ohne Standardwandler in einer kleinen Kammer zwischen 0,01 Hz und 2 Hz.
- d) Kalibrierung durch piezoelektrische Kompensation nach Abschnitt 11 bei einer physikalischen Kalibrierung ohne Standardwandler in einer kleinen geschlossenen Kammer zwischen 1,0 Hz und 5 kHz.
- e) Kalibrierung nach dem Reziprozitätsgesetz mit akustischem Kuppler nach Abschnitt 12 bei einer Kalibrierung ohne Standardwandler in einer kleinen geschlossenen Kammer zwischen 0,1 Hz und 5 kHz.
- f) Kalibrierung mit Pistonphon nach Abschnitt 13 bei einer physikalischen Kalibrierung ohne und mit Standardwandler in einer kleinen Kammer von einigen Hertz bis mehreren hundert Hertz.
- g) Kalibrierung mit schwingender Säule nach Abschnitt 14 bei einer physikalischen Kalibrierung ohne Standardwandler in einer kleinen Kammer zwischen 10 Hz und 1 kHz.

5.4 Darstellung 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 den Übertragungskoeffizienten des Geräts beeinflussen können [8], [9], [10], [11] und [12].

ANMERKUNG 1 Anzugebende Bedingungen können umfassen:

- Datum der Bewertung;
- Wassertemperatur;
- Eintauchtiefe (oder angelegter hydrostatischer Druck);
- Art der verwendeten Befestigung oder Aufstellung;
- Länge der Eintauchzeit und alle angewendeten Befeuchtungsverfahren;
- Ausrichtung des Wandlers um eine Achse oder 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).

ANMERKUNG 2 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

Für Absolut(wert)messungen verwendete Bezugshydrophone müssen regelmäßig kalibriert werden, um einen gültigen Kalibrierstatus aufrechtzuerhalten. Unter Berücksichtigung der vorgesehenen Verwendung des Hydrophons und der Wahrscheinlichkeit der Beschädigung des Gerätes muss eine angemessene Zeitspanne zwischen den Kalibrierungen gewählt werden.

ANMERKUNG Bei Bezugshydrophonen, die ausschließlich für Kalibrierzwecke eingesetzt werden, kann eine jährliche Rekalibrierung angemessen sein (siehe IEC 60866). Werden Hydrophone bei Feldmessungen eingesetzt und besteht die Möglichkeit falscher Verwendung, können Kalibrierungen in kürzeren Intervallen erforderlich werden.

5.6 Betrachtungen über Temperatur und Druck für die Kalibrierung

ANMERKUNG Die elektroakustischen Eigenschaften von Wandlern neigen dazu, sich sowohl mit der Umgebungstemperatur als auch mit dem hydrostatischen Druck (Eintauchtiefe) zu ändern [9], [10].

Wenn der Übertragungskoeffizient des Wandlers für bestimmte Bedingungen der Wassertemperatur und des hydrostatischen Drucks (der Eintauchtiefe) erforderlich ist, muss entweder der Wandler

- a) unter denselben Bedingungen von Temperatur und Druck kalibriert werden, bei denen er eingesetzt wird oder
- b) müssen Korrekturen am Übertragungskoeffizienten des Wandlers und den Werten der Übertragungskoeffizienten auf der Grundlage früherer Kalibrierungen oder validierter Analysemodelle vorgenommen werden.

6 Vorbereitung von Wandlern

6.1 Befeuchten

Um sicherzustellen, dass der Wandler ohne einen Luftfilm oder Blasen auf seiner Oberfläche vom Wasser richtig befeuchtet ist, sollte ein Benetzungsmittel auf der gesamten Wandleroberfläche aufgebracht werden. Wenn der Wandler in Wasser eingetaucht und dann wieder herausgenommen wird, sollten keine trockenen Flecken auf ihm sichtbar sein [11].

6.2 Hydrophonhalterung

Die Befestigung für ein Hydrophon muss so gewählt werden, dass sie einen minimalen Einfluss auf den gemessenen Übertragungskoeffizienten hat. Wenn die Befestigung den gemessenen Übertragungskoeffizienten beeinflusst, muss das Hydrophon in derselben Halterung kalibriert werden, die für Messungen mit dem Hydrophon im Feld verwendet wird. Wird vermutet, dass das Hydrophon empfindlich auf die Auflage-/Befestigungsart reagiert, sollte eine Beschreibung der Befestigungsanordnung mit den Ergebnissen angegeben werden.

ANMERKUNG 1 Einige Hydrophone sind gegenüber dem Einfluss der Befestigungsverfahren anfälliger als andere.

ANMERKUNG 2 Es sollte darauf geachtet werden, dass der Anteil von aufgenommenem Körperschall so gering wie möglich gehalten wird.

6.3 Einfluss des Kabels

Muss das Kabel des Hydrophons für die Kalibrierung verlängert werden, dann ist die elektrische Impedanz des Verlängerungskabels gesondert zu messen, um den Einfluss der elektrischen Belastung zu berechnen.

ANMERKUNG Eine Beschreibung über die Berücksichtigung des Einflusses der elektrischen Last ist in Anhang B angegeben. Siehe auch 7.3.

7 Elektrische Messungen

7.1 Signalart

Das für die Kalibrierung verwendete Signal muss entweder sinusförmig (Dauerschall) oder eine gepulste Sinuswelle (torgesteuerter tonfrequenter Schwingungsimpuls) sein. Es muss eine ausreichende Anzahl an Frequenzen ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass das Leistungsvermögen des Hydrophons über den gewünschten Frequenzbereich sicher charakterisiert wird.

7.2 Erdung

Zur Vermeidung von Erdschleifen dürfen die elektrischen Anschlüsse der Wandler nicht mit Wasser in Kontakt gelangen. Freiliegende Metallteile eines Hydrophons müssen die einzige Erdverbindung für die Kabelschirmung des Hydrophons und für den Hydrophonverstärker darstellen. Alle anderen Erdkontakte sind zu vermeiden.

7.3 Messung der Ausgangsspannung des Hydrophons

7.3.1 Allgemeines

Die Leerlaufspannung des Hydrophons ist am Ende des Hydrophonkabels zu messen. Die gewählten elektrischen Anschlüsse sind anzugeben (siehe 3.8).

Bei einem Dauerschallsignal muss die Messung mit einem Spannungsmessgerät hoher Eingangsimpedanz durchgeführt werden. Bei tonfrequenten Schwingungsimpulsen (Bursts) muss die Wellenform der Hydrophonspannung jedoch digitalisiert werden, indem beispielsweise ein digitalisierendes Oszilloskop oder ein rechnergestützter Analog-Digital-Umsetzer verwendet wird.

Wird zur Bildung eines Messkanals ein Verstärker, ein Dämpfungsglied oder ein Filter in Kombination mit dem Spannungsmessgerät oder dem A/D-Umsetzer verwendet, müssen diese Elemente kalibriert werden, sofern nicht derselbe Messkanal auch für die Messung des Sendestroms verwendet wird (siehe 7.4).

7.3.2 Elektrische Last durch das Messgerät

Bei den Messungen muss das Hydrophon so an ein Messgerät mit einer hohen Eingangsimpedanz (Verstärker, Spannungsmessgerät, Oszilloskop oder A/D-Umsetzer) angeschlossen werden, dass die Eingangsimpedanz viel größer (im Idealfall mehr als das 100fache) als die Impedanz des Hydrophons ist. Bei Messung des Phasenwinkels der Ausgangsspannung des Hydrophons muss die Eingangsimpedanz des Messgeräts im Idealfall mehr als das 1 000fache der Impedanz des Hydrophons betragen. Ist die Impedanz des Hydrophons hoch (zum Beispiel bei einem kleinen piezoelektrischen Hydrophon mit geringer Kapazität), muss die elektrische Last des Hydrophons am Messgerät berücksichtigt werden. In derartigen Fällen müssen Lastkorrekturen an der gemessenen Spannung durchgeführt werden, um die Leerlaufspannung zu erhalten.

ANMERKUNG 1 Die Korrekturen können mit dem in Anhang B angegebenen Verfahren berechnet werden.

ANMERKUNG 2 Wenn dieselbe Last bei der Kalibrierung eines besonderen Hydrophons verwendet wird, können die Korrekturen am Übertragungskoeffizienten statt an den gemessenen Einzelspannungen durchgeführt werden.

7.3.3 Elektrische Last durch Verlängerungskabel

Wird ein Verlängerungskabel an das Hydrophon angeschlossen, belastet es das Hydrophon elektrisch, und es sind Korrekturen vorzunehmen, um die Leerlaufspannung am Kabelende des Hydrophons zu erhalten. Stellen Kabel und Hydrophon elektrisch eine rein kapazitive Last dar (dies ist im Allgemeinen bei einem Kabel und bei einem Hydrophon im Frequenzbereich weit unter der Resonanzfrequenz der Fall), muss eine Korrektur aus den Kapazitäten des Hydrophons und des Kabels bestimmt werden. Ist die Impedanz des Hydrophons nicht rein kapazitiv, zum Beispiel bei Frequenzen nahe der Resonanzfrequenz, muss die komplexe Impedanz zur Berechnung der Lastkorrektur verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Eine Anleitung für beide obigen Fälle ist in Anhang B angegeben.

ANMERKUNG 2 Wird durchweg dasselbe Verlängerungskabel während der Kalibrierung eines besonderen Hydrophons verwendet, können die Korrekturen am Übertragungskoeffizienten statt an den gemessenen Einzelspannungen durchgeführt werden.

7.3.4 Rauschen

Der Rauschabstand muss ausreichend sein, damit die Messungen ohne großen Genauigkeitsverlust durchgeführt werden können, siehe IEC 60500, [1], [13].

ANMERKUNG 1 Der elektrische Rauschpegel kann die Genauigkeit bei elektrischen Messungen herabsetzen.

ANMERKUNG 2 Die Signalamplitude sollte vorzugsweise mindestens 20 dB größer als der Rauschpegel sein.

ANMERKUNG 3 Der breitbandige Störgeräuschpegel kann durch die Verwendung eines Bandpasses mit einer genügenden Bandbreite verringert werden, bei dem das Signal ohne Verzerrung hindurchgelassen wird.

ANMERKUNG 4 Bei Anwesenheit von elektrischem Rauschen kann der Rauschabstand verbessert werden, indem sich wiederholende Signale gemittelt werden. Bei weißem Rauschen verbessert die Mittelung von N Signalen den Rauschabstand um den Faktor der Quadratwurzel aus N .

7.3.5 Übersprechen und akustische Interferenz

Bei Interferenzen und Übersprechen führen Signalmittelung und Schmalbandfilterung gewöhnlich nicht zu einer Verbesserung. Es müssen Anstrengungen unternommen werden, den Grund des Problems zu ermitteln und Maßnahmen zur Minimierung der Wirkungen zu bestimmen. Der akustische Interferenzpegel (Störpegel) muss mindestens 30 dB niedriger als der Signalpegel sein.

Bei Übersprechen mit tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen ist darauf zu achten, dass die Länge des Schwingungsimpulses größer als die Verzögerung der akustischen Ausbreitung ist.

Bei einem Dauerschallsignal muss der Übersprechpegel mindestens 40 dB niedriger als der Signalpegel sein.

ANMERKUNG Siehe 8.6.5.

7.3.6 Eingebaute Vorverstärker

Besitzt ein Hydrophon einen eingebauten Vorverstärker, muss der Übertragungskoeffizient als Übertragungskoeffizient am Kabelende (einschließlich der Eigenschaften des Vorverstärkers) angegeben werden.

ANMERKUNG Besitzt ein Hydrophon einen eingebauten Vorverstärker, sind Lastkorrekturen infolge von Verlängerungskabeln oder Messgeräten nicht erforderlich.

7.4 Messung des Sendestroms

Der Strom durch den Sender muss entweder mit einem kalibrierten Stromwandler (der eine Spannung erzeugt, die dem Ansteuerungsstrom proportional ist) oder durch Messen des Spannungsabfalls über einem kleinen kalibrierten Widerstand (Wert von nur einigen Ohm) in Reihe mit dem Sender bestimmt werden.

ANMERKUNG Das erste Verfahren ist das bevorzugte Verfahren.

7.5 Messung der Übertragungsimpedanz

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

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 Erforderlichenfalls kann ein kalibriertes Dämpfungsglied verwendet werden, um die zum Sendestrom gehörende Spannung der Hydrophonspannung anzugleichen. Dies minimiert Fehler infolge Nichtlinearität im Messkanal.

ANMERKUNG 3 Da diese Impedanz von den Feldbedingungen und den Lastbedingungen des Senders und des Hydrophons abhängt, werden diese Bedingungen sowie die Anschlüsse, an denen die Spannung und der Strom gemessen werden, festgelegt. Wird das Hydrophon in das Fernfeld des Senders gebracht, ist die Übertragungsimpedanz umgekehrt proportional zum Abstand d zwischen den Bezugszentren des Senders und des Hydrophons:

$$Z_{PH} d = \text{constant} \quad (2)$$

8 Freifeld-Reziprozitätskalibrierung

8.1 Allgemeines Prinzip

Um mit der geringsten erreichbaren Messunsicherheit kalibrieren zu können, wird die Primärkalibrierung der Hydrophone unter Bedingungen des freien Schallfelds (siehe 3.13) nach einem Verfahren auf Grundlage des Reziprozitätsgesetzes vorgenommen. Der Frequenzbereich der Kalibrierung ist gewöhnlich auf die Frequenzen zwischen 1 kHz und 1 MHz beschränkt [1], [2], [12], [14] bis [51], siehe IEC 60866, IEC 60500.

Für das Kalibrierverfahren müssen mindestens drei Wandler verwendet werden, von denen mindestens einer ein reziproker Wandler sein muss.

Zwei der Wandler müssen unter Wasser unter Freifeld-Bedingungen in einem bekannten Abstand d voneinander getrennt und weit von den Begrenzungen des Wasservolumens entfernt angeordnet werden, wobei ihre Achsen zueinander gerichtet sind.

Unter Verwendung eines der Wandler als Sender und des anderen als Hydrophon muss die elektrische Übertragungsimpedanz bei einer Anzahl von Frequenzen über den gesamten betrachteten Frequenzbereich bestimmt werden (siehe 7.5).

Mit mindestens drei Paaren aus mindestens drei Wandlern müssen mindestens drei unabhängige elektrische Übertragungsimpedanzen ermittelt werden. Aus diesen Größen müssen der Freifeldübertragungskoeffizient des zu kalibrierenden Hydrophons und aller reziproker Wandler sowie der Sende-Stromübertragungskoeffizient jedes Senders und aller reziproken Wandler bei jeder Frequenz berechnet werden, was zu den erforderlichen Frequenzabhängigkeitskurven der beteiligten Wandler führt.

ANMERKUNG Mit einem perfekten Schallreflektor, wie der Wasseroberfläche, ist eine Kalibrierung nach dem Reziprozitätsgesetz mit nur einem reziproken Wandler möglich.

8.2 Theorie

8.2.1 Kalibrierung ohne Phase

ANMERKUNG Das Reziprozitätsgesetz besagt, dass für einen reziproken Wandler der Freifeldübertragungskoeffizient, dividiert durch den Sende-Stromübertragungskoeffizienten, gleich einem bekannten Wert ist: dem Freifeld-Reziprozitätsparameter. Wenn der Quotient von zwei Größen sowie ihr Produkt bekannt sind, können die Größen berechnet werden.

Das Produkt aus Freifeldübertragungskoeffizient und Sende-Stromübertragungskoeffizient muss nach dem Freifeld-Reziprozitätskalibrierverfahren mit einem Sender, einem Hydrophon und einem reziproken Wandler gemessen werden.

Angenommen, es fließt ein Strom I_P durch einen Sender P mit einem Sende-Stromübertragungskoeffizienten S_P . In einem Abstand d von seinem Bezugszentrum und in der in der Definition von S_P festgelegten Bezugsrichtung erzeugt der Sender einen Schalldruck p , der berechnet werden muss nach:

$$p = \frac{S_P I_P}{d} \quad (3)$$

wobei eine kugelförmige Ausbreitung der Schallenergie vom Sender angenommen wird.

Ein Hydrophon H mit dem Freifeldübertragungskoeffizienten M_H , das so in diesem Schallfeld angeordnet ist, dass sich sein Bezugszentrum in einem Abstand d_1 vom Bezugszentrum des Senders P befindet, erzeugt eine Leerlaufspannung U_{PH} , die gegeben ist durch:

$$U_{PH} = M_H p = \frac{M_H S_P I_P}{d_1} \quad (4)$$

Der Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz $|Z_{PH}|$ dieses Wandlerpaars muss berechnet werden mit:

$$|Z_{PH}| = \frac{U_{PH}}{I_P} = \frac{M_H S_P}{d_1} \quad (5)$$

In einem zweiten Schritt ist der Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz $|Z_{PT}|$, nachdem das Hydrophon H durch einen reziproken Wandler T ersetzt wurde, folgendermaßen zu bestimmen:

$$|Z_{PT}| = \frac{U_{PT}}{I_P} = \frac{M_T S_P}{d_2} \quad (6)$$

wobei d_2 der Abstand zwischen den Bezugszentren des reziproken Wandlers T und des Senders P ist.

In einem dritten Schritt ist der Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz $|Z_{TH}|$ folgendermaßen zu bestimmen:

$$|Z_{TH}| = \frac{U_{TH}}{I_T} = \frac{M_H S_T}{d_3} \quad (7)$$

wobei d_3 den Abstand zwischen dem Bezugszentrum des reziproken Wandlers T und des Hydrophons H bedeutet.

ANMERKUNG In diesem Fall wird der Wandler T als Sender und H wiederum als Hydrophon verwendet.

Nun kann leicht gezeigt werden, dass:

$$\frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} = \frac{M_T S_T d_1}{d_2 d_3} \quad (8)$$

Der Abstand zwischen Sender und Hydrophon muss groß genug sein, damit das Hydrophon sich im Fernfeld des Senders befindet (siehe 3.12) und das Hydrophon eine im Wesentlichen ebene Welle empfängt (siehe auch 8.3).

Bei einem reziproken Wandler ist der Quotient aus Freifeldübertragungskoeffizient und Sende-Stromübertragungskoeffizient gleich dem Reziprozitätsparameter für Kugelwellen $2 d_0 / \rho f$ im Bezugsabstand von $d_0 = 1$ m:

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{\rho f} \quad (9)$$

wobei ρ die Dichte von Wasser und f die Frequenz bedeuten.

Da das Produkt und der Quotient des Freifeldübertragungskoeffizienten M und des Sende-Stromübertragungskoeffizienten S des Wandlers T bekannt sind, müssen die Werte von M und S mit den Gleichungen (8) und (9) folgendermaßen berechnet werden:

$$M_T^2 = \frac{2 d_2 d_3}{\rho f d_1} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (10)$$

$$S_T^2 = \frac{\rho f d_2 d_3}{2 d_1} \frac{|Z_{PT}| |Z_{TH}|}{|Z_{PH}|} \quad (11)$$

Mit den Gleichungen (7) und (11) ergibt sich der Übertragungskoeffizient des Hydrophons M_H zu:

$$M_H^2 = \frac{2 d_1 d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}| |Z_{TH}|}{|Z_{PT}|} \quad (12)$$

Ähnlich ergibt sich mit den Gleichungen (5) und (12) der Sende-Stromübertragungskoeffizient S_P des Senders P:

$$S_P^2 = \frac{\rho f d_1 d_2}{2 d_3} \frac{|Z_{PH}| |Z_{PT}|}{|Z_{TH}|} \quad (13)$$

ANMERKUNG 1 Es kann eine bessere statistische Genauigkeit erhalten und die Reziprozität kann überprüft werden, wenn mehr als ein Wandler reziprok ist. Wenn beispielsweise 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. Demnach kann $|Z_{PT}|$ auch zweifach bestimmt werden, einmal durch Verwendung von P als Sender und T als Hydrophon und außerdem durch Verwendung von T als Sender und P als Hydrophon.

Jegliche Differenz zwischen diesen beiden Werten bei derselben Frequenz deutet darauf hin, dass keine Reziprozität oder Linearität vorhanden ist oder dass ein Messfehler vorliegt. Die Messunsicherheit des Mittelwerts kann geringer als die jedes Einzelwerts sein.

ANMERKUNG 2 Wird die Kalibrierung mit mehr als drei Wandlern durchgeführt und sind zwei oder mehr reziprok, kann die Messunsicherheit verringert werden, weil der Übertragungskoeffizient 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.

8.2.2 Kalibrierung mit Phase

Es muss auch der Phasenwinkel des Freifeldübertragungskoeffizienten durch Einbeziehung von Phasenmessungen bestimmt werden.

ANMERKUNG 1 Alle Drücke, Eingangsströme, Ausgangsspannungen, elektrischen Übertragungsimpedanzen, Sende-Übertragungskoeffizienten und Freifeldübertragungskoeffizienten sind nun komplex; sie umfassen sowohl Amplitude als auch Phase. Beispielsweise wird Gleichung (3) für den vom Sender P am Hydrophon H erzeugten Druck:

$$p = \exp \left[j k (d_0 - d_1) \right] \frac{S_P I_P}{d_1} \quad (14)$$

wobei der Abstand d_1 vom Bezugszentrum des Senders zum Bezugszentrum des Hydrophons gemessen wird. Die Wellenzahl $k = 2 \pi f / c$, wobei c die Schallgeschwindigkeit im umgebenden Medium ist. Der in der Definition des Sende-Übertragungskoeffizienten verwendete Bezugsabstand d_0 ist gleich 1 m.

Die komplexe elektrische Übertragungsimpedanz Z_{PH} ist gegeben nach:

$$Z_{PH} = \exp \left[j k (d_0 - d_1) \right] \frac{M_H S_P}{d_1} \quad (15)$$

In ähnlicher Weise sind die elektrischen Übertragungsimpedanzen Z_{PT} und Z_{TH} wie folgt zu berechnen:

$$Z_{PT} = \exp \left[j k (d_0 - d_2) \right] \frac{M_T S_P}{d_2} \quad (16)$$

$$Z_{TH} = \exp \left[j k (d_0 - d_3) \right] \frac{M_H S_T}{d_3} \quad (17)$$

wobei d_2 der Abstand zwischen den Bezugszentren von P und T und d_3 der Abstand zwischen den Bezugszentren von T und H ist.

Die Gleichungen (15) bis (17) müssen zu dem komplexen Äquivalent von Gleichung (8) kombiniert werden:

$$\frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} = \exp \left[j k (d_0 + d_1 - d_2 - d_3) \right] \frac{M_T S_T d_1}{d_2 d_3} \quad (18)$$

Mit dem komplexen Reziprozitätsparameter für Kugelwellen ergibt sich anstelle von Gleichung (9):

$$\frac{M_T}{S_T} = \frac{2}{j \rho f} \exp(j k d_0) \quad (19)$$

Die Gleichungen (10) und (11) entsprechenden Ausdrücke müssen aus der Kombination der Gleichungen (18) und (19) erhalten werden:

$$M_T^2 = \frac{2 d_2 d_3}{j \rho f d_1} \exp \left[j k (d_2 + d_3 - d_1) \right] \frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} \quad (20)$$

$$S_T^2 = \frac{j \rho f d_2 d_3}{2 d_1} \exp \left[j k (d_2 + d_3 - d_1 - 2d_0) \right] \frac{Z_{PT} Z_{TH}}{Z_{PH}} \quad (21)$$

Die Gleichungen (17) und (21) müssen zur Herleitung des folgenden Ausdrucks für den komplexen Freifeldübertragungskoeffizienten des Hydrophons H verwendet werden.

$$M_H^2 = \frac{2 d_1 d_3}{j \rho f d_2} \exp \left[j k (d_1 + d_3 - d_2) \right] \frac{Z_{PH} Z_{TH}}{Z_{PT}} \quad (22)$$

In ähnlicher Weise muss der Ausdruck für den Sende-Stromübertragungskoeffizienten S_P entsprechend Gleichung (13) folgendermaßen berechnet werden:

$$S_P^2 = \frac{j \rho f d_1 d_2}{2 d_3} \exp \left[j k (d_1 + d_2 - d_3 - 2d_0) \right] \frac{Z_{PH} Z_{PT}}{Z_{TH}} \quad (23)$$

ANMERKUNG 2 Die Schwierigkeit, mit diesem Verfahren die Phase von M_H zu bestimmen, liegt in der genauen Bestimmung sowohl der Schallgeschwindigkeit als auch der Messabstände d_1 , d_2 und d_3 . Zum Beispiel ergibt ein Fehler von lediglich 1,0 mm in einem der Abstände bei 100 kHz in Wasser einen Phasenfehler von etwa 12°.

Um dies zu vermeiden, werden die drei Wandler P, H und T auf einer Geraden bei Anordnung von H zwischen P und T angeordnet, so dass $d_2 = d_1 + d_3$. Damit vereinfacht sich Gleichung (22) zu:

$$M_H^2 = \frac{2 d_1 d_3}{j \rho f d_2} \frac{Z_{PH} Z_{TH}}{Z_{PT}} \quad (24)$$

ANMERKUNG 3 Da die Abstände und die Schallgeschwindigkeit in Gleichung (24) nicht explizit in einem Phasenterm erscheinen, wird die Genauigkeit der berechneten Phase von M_H nur durch die Genauigkeit der Phasenmessungen der Spannungen und Ströme und durch die Stellung begrenzt. In Bild 2 ist ein spezielles Messgestell dargestellt, das Stellungsfehler minimieren kann.

Die Messungen müssen folgendermaßen durchgeführt werden:

- Die Wandler sind, wie in Bild 2 dargestellt, mit ihren Bezugszentren durch die Abstände d_1 , d_2 und d_3 getrennt, so anzuordnen, dass $d_3 = d_2 - d_1$ gilt. Ihre Bezugsrichtungen sind mit P in Richtung H und T weisend auszurichten. Die komplexe elektrische Übertragungsimpedanz Z_{PH} ist aus dem Eingangsstrom in P und der Ausgangsspannung von H zu bestimmen.