

DIN EN IEC 60565-1



ICS 17.140.50

Entwurf

Einsprüche bis 2019-08-21
Vorgesehen mit
E DIN EN 60565-2:2017-10
als Ersatz für
DIN EN 60565:2007-08

**Wasserschall – Hydrophone –
Kalibrierung von Hydrophonen –
Teil 1: Verfahren für die Freifeldkalibrierung von Hydrophonen
(IEC 87/708/CDV:2019);
Deutsche und Englische Fassung prEN IEC 60565-1:2019**

Underwater acoustics – Hydrophones –
Calibration of hydrophones –
Part 1: Procedures for free-field calibration
(IEC 87/708/CDV:2019);
German and English version prEN IEC 60565-1:2019

Acoustique sous-marine – Hydrophones –
Étalonnages des hydrophones –
Partie 1: Procédures d'étalonnage en champ libre des hydrophones
(IEC 87/708/CDV:2019);
Version allemande et anglaise prEN IEC 60565-1:2019

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-06-21 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 180 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments prEN IEC 60565-1:2019 „Wasserschall – Hydrophone – Kalibrierung von Hydrophonen – Teil 1: Verfahren für die Freifeldkalibrierung von Hydrophonen“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (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. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 87/708/CDV:2019 „Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones – Part 1: Procedures for free-field calibration“ unverändert in den Entwurf prEN IEC 60565-1:2019 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV 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.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

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. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Änderungen

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

- a) Verlagerung aller Beschreibungen der Verfahren für die Druckkalibrierung von Hydrophonen – diese sind jetzt in Teil 2 enthalten;

- b) Verlagerung der Ableitung der Gleichungen für die Freifeld-Reziprozitätskalibrierung (Amplitudenübertragungskoeffizient und Phasenübertragungskoeffizient) und deren Einordnung in einen informativen Anhang;
- c) Aufnahme der Kalibrierung des Sende-Übertragungskoeffizienten von Einzelquellen-Wandlern und Hydrophonen (aber keine Sonararrays) in den Anwendungsbereich;
- d) Neuordnung der Abschnitte innerhalb des Dokuments, damit die allgemeineren Verfahren für die Kalibrierung, wie die Anleitung zum Erhalten der akustischen Freifeld-, Fernfeld- und stationären Bedingungen vor den Beschreibungen der absoluten oder relativen Kalibrierverfahren dargestellt werden;
- e) Überarbeitung des informativen Anhangs A zur Aufnahme eines Leitfadens zur Messung der Richtungsempfindlichkeit eines Hydrophons oder Senders;
- f) Ergänzung eines neuen informativen Anhangs B zur Messung der elektrischen Impedanz von Hydrophonen und Sendern;
- g) Überarbeitung des vorherigen informativen Anhangs zu Korrekturen für elektrische Belastungen, um die elektrische Belastung durch zusätzliche Kabel zu erfassen (jetzt Anhang C);
- h) Ergänzung eines neuen informativen Anhangs D zu akustischen Fernfeldkriterien bei der Wasserschallkalibrierung;
- i) Überarbeitung des vorherigen informativen Anhangs zu Impulsverfahren bei Freifeldkalibrierungen (jetzt Anhang E);
- j) Überarbeitung des vorherigen informativen Anhangs zur Bewertung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Hydrophonen (jetzt Anhang F);
- k) Streichung des vorigen informativen Anhangs zur Ersatzschaltung des Anregungssystems für die Kalibrierung mit einer schwingenden Säule;
- l) Ergänzung eines neuen informativen Anhangs G über die Ableitung der Gleichung für Drei-Wandler-Reziprozitätskalibrierung mit Kugelwellen;
- m) Ergänzung eines neuen informativen Anhangs H zur Kalibrierung mit Wanderwellenrohren;
- n) Ergänzung eines neuen informativen Anhangs I zur Kalibrierung von Hydrophonen mit optischer Interferometrie;
- o) Ergänzung eines neuen informativen Anhangs J zur Kalibrierung in nachhallenden Wassertanks mit Dauerschallsignalen;
- p) die Deutsche Fassung wurde im Abschnitt 2 an den aktuellen Standardtext angepasst.

– Leerseite –

**Wasserschall – Hydrophone –
Kalibrierung von Hydrophonen –
Teil 1: Verfahren für die Freifeldkalibrierung von Hydrophonen**

Inhalt

	Seite
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	9
4 Symbole und Abkürzungen	15
5 Allgemeine Verfahren für die Kalibrierung	16
5.1 Allgemeine Kalibrieranforderungen	16
5.1.1 Arten der Kalibrierung	16
5.1.2 Anforderungen an das akustische Feld	17
5.2 Anforderungen an das akustische Freifeld	17
5.2.1 Dauerschallsignale	17
5.2.2 Zeitbegrenzte Signale	17
5.3 Anforderungen an das akustische Fernfeld	18
5.4 Anforderungen an stationäre Bedingungen	18
5.5 Anforderungen an die Ausrüstung	19
5.5.1 Kalibriereinrichtung	19
5.5.2 Prüfausrüstung	20
5.6 Positionierung und Ausrichtung	21
5.6.1 Koordinatensystem	21
5.6.2 Bezugsrichtung	22
5.6.3 Befestigung und Halterung der Wandler	22
5.6.4 Ausrichtung	22
5.6.5 Trennabstand	23
5.7 Darstellung des Frequenzganges	23
5.8 Frequenzeinschränkungen	24
5.8.1 Obere Frequenzgrenze	24
5.8.2 Untere Frequenzgrenze	24
5.9 Überprüfungen auf akustische Interferenz	25
6 Elektrische Messungen	25
6.1 Signalart	25
6.2 Elektrische Erdung	25
6.3 Messung der Ausgangsspannung des Hydrophons	26
6.3.1 Allgemeines	26
6.3.2 Signalanalyse	26

	Seite
6.3.3 Elektrische Belastung durch das Messgerät	26
6.3.4 Elektrische Belastung durch Verlängerungskabel	26
6.3.5 Elektrischer Rauschpegel	27
6.3.6 Übersprechen	27
6.3.7 Eingebaute Vorverstärker	28
6.4 Messung des Ansteuerstroms des Senders	28
6.4.1 Prüfausrüstung	28
6.4.2 Signalanalyse	28
6.5 Messung der Anregungsspannung des Senders	28
6.5.1 Prüfausrüstung	28
6.5.2 Signalanalyse	29
7 Vorbereitung und Konditionierung der Wandler	29
7.1 Eintauchen	29
7.2 Befeuchten	29
7.3 Verlängerung des Hydrophonkabels	29
7.4 Umgebungsbedingungen (Temperatur und Tiefe)	30
8 Reziprozitätskalibrierung mit drei Wandlern im Freifeld mit Kugelwellen	30
8.1 Allgemeine Grundsätze	30
8.2 Kalibrierung für die Bestimmung des Betrags des Übertragungskoeffizienten (ohne Phase)	32
8.2.1 Anforderungen an das akustische Feld	32
8.2.2 Trennabstand	32
8.2.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandlers	32
8.2.4 Signalart	32
8.2.5 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz	32
8.2.6 Berechnung des Empfangs-Übertragungskoeffizienten	32
8.2.7 Berechnung der Sende-Übertragungskoeffizienten	33
8.2.8 Wiederholpräzision	33
8.2.9 Überprüfungen	34
8.2.10 Messunsicherheit	36
8.3 Kalibrierung zur Bestimmung des Phasenwinkels des Hydrophon-Übertragungskoeffizienten	36
8.3.1 Allgemeine Grundsätze	36
8.3.2 Vorbereitung der Wandler	37
8.3.3 Anforderungen an das akustische Feld	37
8.3.4 Signalart	37
8.3.5 Befestigung und Ausrichtung des Wandlers	37
8.3.6 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz	37
8.3.7 Berechnung des Phasenwinkels des Übertragungskoeffizienten	38
8.3.8 Wiederholpräzision	38

	Seite
8.3.9 Überprüfungen	39
8.3.10 Messunsicherheit	39
9 Freifeld-Kalibrierung durch Vergleich mit einem akustischen Bezugsgerät	39
9.1 Kurzbeschreibung	39
9.1.1 Allgemeines	39
9.2 Arten des Vergleichskalibrierverfahrens	40
9.2.1 Hydrophonkalibrierung mit einem kalibrierten Bezugshydrophon	40
9.2.2 Hydrophonkalibrierung mit einem kalibrierten Bezugssender	40
9.2.3 Senderkalibrierung mit einem kalibrierten Bezugshydrophon	40
9.3 Hydrophonkalibrierung durch Vergleich mit einem Bezugshydrophon	40
9.3.1 Anforderungen an das akustische Feld	40
9.3.2 Trennabstand	40
9.3.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandlers	41
9.3.4 Signalart	41
9.3.5 Messung der elektrischen Spannung	41
9.3.6 Freifeld-Übertragungskoeffizient	41
9.3.7 Wiederholpräzision	41
9.3.8 Überprüfungen	42
9.3.9 Messunsicherheit	42
9.4 Hydrophonkalibrierung mit einem kalibrierten Sender	42
9.4.1 Anforderungen an das akustische Feld	42
9.4.2 Trennabstand	42
9.4.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandlers	43
9.4.4 Signalart	43
9.4.5 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz	43
9.4.6 Berechnung der Empfangs-Übertragungskoeffizienten	43
9.4.7 Wiederholpräzision	43
9.4.8 Überprüfungen	44
9.4.9 Messunsicherheit	44
9.5 Senderkalibrierung mit einem kalibrierten Hydrophon	45
9.5.1 Anforderungen an das akustische Feld	45
9.5.2 Trennabstand	45
9.5.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandlers	45
9.5.4 Signalart	45
9.5.5 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz	45
9.5.6 Berechnung des Sende-Übertragungskoeffizienten	45
9.5.7 Überprüfungen	46
9.5.8 Messunsicherheit	46

	Seite
10	Angabe der Ergebnisse 47
10.1	Übertragungskoeffizient..... 47
10.2	Übertragungsmaß..... 47
10.3	Kalibrierunsicherheiten 47
10.4	Zusätzliche Metadaten 47
11	Intervalle für die Rekalibrierung..... 48
Anhang A (informativ)	Richtungsempfindlichkeit eines Hydrophons oder Senders 49
A.1	Allgemeines Prinzip 49
A.2	Realisierungsarten der Messung..... 49
A.3	Koordinatensystem..... 50
A.4	Anforderungen an das akustische Feld..... 50
A.5	Positionierung und Ausrichtung..... 50
A.6	Messsignaltyp..... 50
A.7	Messung der Richtungsempfindlichkeit von Wandlern 50
A.7.1	Sender 50
A.7.2	Hydrophon 50
A.8	Berechnung des Richtungsempfindlichkeitsmaßes (Richtmaßes)..... 50
A.9	Messunsicherheit..... 51
A.10	Grafische Darstellung 51
A.11	Richtfaktor 52
A.12	Richtwirkungsmaß 53
Anhang B (informativ)	Messung der elektrischen Impedanz von Hydrophonen und Sendern..... 54
B.1	Allgemeines Prinzip 54
B.2	Messung der elektrischen Impedanz..... 54
B.3	Ableitung von weiteren Parametern der elektrische Impedanz..... 55
B.4	Grafische Darstellung..... 56
Anhang C (informativ)	Berechnung von Korrekturen für elektrische Belastungen 58
C.1	Korrekturen für elektrische Belastung 58
C.2	Korrekturen für Belastungen durch Verstärker mit der komplexen elektrischen Impedanz..... 58
C.3	Korrektur der durch Verlängerungskabel verursachten Belastung (mit der komplexen elektrischen Impedanz) 58
C.4	Korrekturen nur mit Kapazitäten..... 59
Anhang D (informativ)	Akustische Fernfeldkriterien bei der Unterwasserschallkalibrierung..... 60
D.1	Allgemeines 60
D.2	Das Feld für Kolben-Wandler 60
D.3	Kriterien für Fernfeldbedingungen..... 62
D.4	Fernfeldkriterien bei Messungen der Richtungsempfindlichkeit..... 62
Anhang E (informativ)	Impulsverfahren bei Freifeldkalibrierungen 63
E.1	Allgemeines 63

	Seite
E.2	Echofreie Zeit 63
E.3	Mindesttrennabstand 65
E.4	Einschwingvorgänge beim Einschalten 66
E.5	Betrachtungen zur Bandbreite 67
E.6	Elektrisches Übersprechen 67
E.7	Pulsdauer 67
E.8	Nachhall und Pulsfolgefrequenz 67
E.9	Typische Tankabmessungen 67
E.10	Kugelwellenbedingungen 68
E.11	Reflexionen von Befestigungsstangen und Aufstellungssystem 68
E.12	Analyseverfahren für tonfrequente Schwingungsimpulse 68
E.13	Einschränkungen bezüglich hoher Frequenz 69
E.14	Einschränkungen bezüglich niedriger Frequenz 71
E.15	Fortschrittliche Techniken zur Erweiterung des Frequenzbereichs über die untere Frequenzgrenze hinaus 71
Anhang F (informativ)	Bewertung der Messunsicherheit bei der Kalibrierung von Hydrophonen und Sendern 73
F.1	Allgemeines 73
F.2	Bewertung der Messunsicherheit nach Typ A 73
F.3	Bewertung der Messunsicherheit nach Typ B 73
F.4	Angegebene Messunsicherheit 73
F.5	Übliche Quellen der Messunsicherheit 74
Anhang G (informativ)	Ableitung der Gleichungen für Drei-Wandler-Reziprozitätskalibrierung mit Kugelwellen 76
G.1	Kalibrierung zur Bestimmung des Betrags des Übertragungskoeffizienten 76
G.2	Kalibrierung zur Bestimmung des komplexen Übertragungskoeffizienten 78
Anhang H (informativ)	Kalibrierung mit Wanderwellenrohren 81
H.1	Einleitung 81
H.2	Kalibrierverfahren 81
H.3	Grenzen des Verfahrens 81
H.4	Erweiterungen des Verfahrens 82
Anhang I (informativ)	Kalibrierung von Hydrophonen mit optischer Interferometrie 83
I.1	Einleitung 83
I.2	Allgemeines Prinzip 83
I.3	Verfahren 83
I.4	Diskussion des Verfahrens 84
Anhang J (informativ)	Kalibrierung in nachhallenden Wassertanks mit Dauerschallsignalen 86
J.1	Allgemeines Prinzip 86
J.2	Anwendung eines Rauschsignals 87

	Seite
J.3 Anwendung des LFM-Signals	87
J.4 Messunsicherheiten.....	88
Literaturhinweise.....	89
Bilder	
Bild 1 – Messkonfigurationen für die Drei-Wandler-Reziprozität (Crown copyright, 2018)	31
Bild 2 – Messgestell zur Anbringung der drei Wandler in einer Reihe: eines Senders P, eines reziproken Wandlers T und eines zu kalibrierenden Hydrophons H.....	36
Bild A.1 – Beispiele von grafischen Darstellungen des Pegels der Richtungsempfindlichkeit: Polardiagramm (links) und kartesische Koordinaten (rechts) (© Crown copyright)	52
Bild B.1 – Beispiele von Darstellungen der elektrischen Impedanz eines Wandlers für ein kleines kugelförmiges Hydrophon mit einer Kapazität von 3 nF. Oben rechts: Betrag der elektrischen Impedanz; Oben links: Betrag der Impedanz und Widerstand und Reaktanz in der Nähe der Resonanzfrequenz von 240 kHz; Unten links: Betrag der Admittanz, Konduktanz und Suszeptanz in der Nähe der Resonanzfrequenz; Unten rechts: Darstellung der Admittanzschleife. (© Crown copyright)	57
Bild D.1 – Schalldruck als Funktion der Entfernung von der Quelle für eine Punktquelle und für eine Kolben-Quelle mit den Maßen $ka = 10$. Ebenso dargestellt ist der Schalldruck, der mit einem koaxial positionierten Kolbenempfänger mit den gleichen Maßen gemessen wurde.	61
Bild D.2 – Differenz des gemessenen Schalldrucks auf der Achse im Vergleich zur kugelförmigen Ausbreitung bei Messung mit einem Punkt- und einem Kolbenempfänger.	62
Bild E.1 – Schematische Darstellung eines Senders und eines Empfängers in einem Wassertank mit den Hauptreflexionsquellen	64
Bild E.2 – Echoankunftszeit in einem Tank von 6 m × 6 m × 5 m mit optimal angeordneten Wandlern	65
Bild E.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))	66
Bild E.4 – Beispiele von Schallwellenformen mit Zeitfenster für die Analyse von Signalfrequenzen 1 kHz (links) und 750 Hz (rechts) (Die Bilder wurden dem Literaturhinweis [58] entnommen.)	69
Bild E.5 – Werte für die Absorption in Reinwasser und Meerwasser, einschließlich Beiträge aufgrund von Komponentenfaktoren (Daten aus [20] und [22])	70
Bild I.1 – Konfiguration für die Kalibrierung von Hydrophonen mit der optischen Überlagerungsinterferometrie. Links: Schematische Darstellung des Interferometer; Rechts: Schematische Darstellung der Anordnung zur Kalibrierung (Crown copyright).....	84

Einleitung

Wasserschallmessungen werden durchgeführt, um Validierung und Qualifizierung in einem breiten Spektrum von Meeresanwendungen zu ermöglichen, einschließlich Ozeanographie, Verteidigung, Fischerei, Geophysik und in Entwicklungen in der Off-Shore-Energiewirtschaft. Darüber hinaus hat die zunehmende Besorgnis über die Auswirkungen von anthropogenem Schall auf die Meeresumwelt zu einer Regelung geführt, die die absolute akustische Messung des von bestimmten Quellen abgestrahlten Schalls und des Umgebungsschallfeldes fordern.

Die Messungen müssen technisch einwandfrei durchgeführt werden, sich auf gemeinsame Messnormen beziehen und mit kalibrierten Aufnehmern durchgeführt werden, damit sie aussagekräftig sind. Hydrophone sind der am häufigsten eingesetzte Aufnehmer zur Messung von Schall im Meer. Die zur Messung des Schalldrucks verwendeten Hydrophone müssen nach vereinbarten genormten Verfahren mit gültigen Messunsicherheiten kalibriert werden.

Der Zweck dieser Internationalen Norm ist die Festlegung von Kalibrierverfahren unter Freifeldbedingungen von Hydrophonen, die in der Unterwasserakustik für Meeresanwendungen eingesetzt werden. Behandelt werden ebenso Kalibrierverfahren für elektroakustische Unterwasserwandler, die als Hydrophon und/oder Quellenwandler verwendet werden können. Grundregeln, Verfahren und deren Quellen der Messunsicherheit werden in dieser Norm ebenso angegeben. Die beschriebenen Kalibrierverfahren umfassen absolute Verfahren, die keine akustischen Bezugswandler erfordern, und relative Verfahren, die ein kalibriertes Bezugshydrophon oder einen kalibrierten Bezugssender verwenden. Die beschriebenen Verfahren umfassen den Frequenzbereich von 200 Hz bis 1 MHz.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt Methoden und Verfahren für die Freifeldkalibrierung von Hydrophonen sowie einzelnen elektroakustischen Wandlern fest, die als Hydrophone (Empfänger) und/oder Sender (Schallquellenwandler) verwendet werden können. In dieser Norm werden zwei allgemeine Arten der Kalibrierung behandelt: absolute Kalibrierung nach der Methode der Drei-Wandler-Reziprozität mit Kugelwellen und die relative Kalibrierung durch Vergleich mit einem Bezugsgerät, das bereits einer absoluten Kalibrierung unterzogen wurde.

Der maximale Frequenzbereich der in dieser Norm beschriebenen Verfahren liegt zwischen 200 Hz und 1 MHz. Die niedrigste akustische Anwendungsfrequenz hängt von einer Reihe von Faktoren ab und liegt üblicherweise im Bereich von 200 Hz bis 5 kHz und hängt im Wesentlichen von der Größe des gewählten Versuchsfeldes ab. Die höchste Anwendungsfrequenz für die hier beschriebenen Verfahren beträgt 1 MHz.

Verfahren für die niederfrequente Druckkalibrierung von Hydrophonen können in IEC 60565-2 [1] nachgeschlagen werden. Verfahren für die Kalibrierung von Hydrophonen bei akustischen Frequenzen über 1 MHz werden in IEC 62127-2 [2] behandelt.

Ausgeschlossen aus dem Anwendungsbereich dieser Norm sind niederfrequente Druckkalibrierungen von Hydrophonen, die in IEC 60565-2 [1] beschrieben sind. Ebenfalls ausgeschlossen sind Kalibrierungen von digitalen Hydrophonen und Systemen, Kalibrierung von autonom arbeitenden Marine-Akustikrecordern, Kalibrierung von Vektorwandlern wie Schallschnelleaufnehmern und Druckgradienten-Hydrophonen, Kalibrierung von passiven Sonararrays aus mehreren Hydrophonen und die Kalibrierung von aktiven Sonararrays aus Sendern und Hydrophonen.

Diese Norm liefert eine Beschreibung der Anforderungen an die Freifeldkalibrierung in Bezug auf die Prüfeinrichtung, -ausrüstung und -instrumentierung, Signalverarbeitung und Frequenzbegrenzungen. Die erreichbare Messunsicherheit und die Regeln für die Darstellung der Kalibrierdaten werden beschrieben. Ebenso enthalten sind informative Anhänge mit zusätzlichen Anleitungen. Anhang A enthält einen Leitfaden zur Messung der Richtungsempfindlichkeit eines Hydrophons oder Senders. Anhang B enthält einen Leitfaden zur Messung der elektrischen Impedanz von Hydrophonen und Sendern. Anhang C enthält eine Anleitung zu Korrekturen für elektrische Belastungen. Anhang D enthält einen Leitfaden zu akustischen Fernfeldkriterien bei der Wasserschallkalibrierung. Anhang E enthält einen Leitfaden zu Impulsverfahren bei Freifeldkalibrierungen. Anhang F enthält eine Anleitung für die Bewertung der Messunsicherheit bei der Freifeldkalibrierung von Hydrophonen und Sendern. Anhang G beschreibt die Ableitung der Gleichungen für Drei-Wandler-Reziprozitätskalibrierungen mit Kugelwellen. Anhang H enthält eine Anleitung für die Kalibrierung mit Wanderwellenrohren. Anhang I enthält einen Leitfaden zur Kalibrierung von Hydrophonen mit optischer Interferometrie. Und schließlich enthält Anhang J einen Leitfaden zur Kalibrierung in nachhallenden Wassertanks mit Dauerschallsignalen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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).

Wenn Abweichungen von den Normen existieren, werden dies in den entsprechenden Abschnitten dieser Norm beschrieben.

IEC 60500:2017, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration in the frequency range 1 Hz to 500 kHz*

IEC 60050801, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-801 und IEC 60500:2017 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

IEC 60500:2017 ist erforderlich für die Festlegung der folgenden Begriffe hinsichtlich des Betriebsverhaltens von Hydrophonen und Wandlern:

Winkelkoordinatensystem, Beugungsfaktor, Richtungsempfindlichkeit, Dynamikbereich, elektrische Impedanz eines Wandlers, elektrische Anschlüsse eines Wandlers, Kapazität am Kabelende, Rauschdruck bei äquivalenter Bandbreite, Spektraldichte des äquivalenten Rauschdrucks, Spektraldichtepegel des äquivalenten Rauschdrucks, (akustisches) Freifeld, Leerlaufspannung, Hauptachse, Bezugszentrum, Schalldruck und Unsicherheit (einer Messung).

3.1

akustisches Fernfeld

Schallfeld in einem ausreichenden Abstand von der Schallquelle in einem gleichförmigen Medium, in dem sich der Schalldruck und die Schallschnelle im Wesentlichen in Phase befinden und die um das Absorptionsmaß korrigierte Amplitude des Direktschalldrucks sich entgegengesetzt zum Abstand ändert

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Entfernung (Abstand von der Schallquelle) wird auf einem direkten Weg zwischen Schallquelle und Empfänger gemessen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die entgegengesetzte Abhängigkeit von der Entfernung bedeutet nicht, dass die Schallquelle gleichmäßig in alle Richtungen strahlt.

[QUELLE: IEC 60050-801-23-30, modifiziert, ergänzt um „und die um das Absorptionsmaß korrigierte Amplitude des Direktschalldrucks sich entgegengesetzt zum Abstand ändert“, der zusätzliche Text wurde ISO 18405:2017 entnommen].

3.2

elektrische Übertragungsimpedanz (eines Wandlerpaars)

Z_{PH}

der Quotient der Fourier-Transformierten der Hydrophon-Leerlaufausgangsspannung $\Im(U_H(t))$ und der Fourier-Transformierten des elektrischen Ansteuerstromes durch den Sender $\Im(I_P(t))$ für ein Wandlerpaar bei einem festgelegten Trennabstand, von dem einer als ein Hydrophon und einer als ein Sender verwendet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

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

Anmerkung 2 zum Begriff: Diese elektrische Übertragungsimpedanz ist ein komplexer Parameter. Der Betrag der elektrischen Übertragungsimpedanz wird in der Einheit Ohm, Ω , angegeben. Der Phasenwinkel der elektrischen Übertragungsimpedanz ist das Argument der elektrischen Übertragungsimpedanz und ist die Phasendifferenz zwischen der Hydrophonspannung und dem Senderstrom [IEV 351-45-45]. Die Einheit des Phasenwinkels ist der Radiant.

Anmerkung 3 zum Begriff: Da die elektrische Übertragungsimpedanz von den Feldbedingungen, dem hydrostatischen Druck, der Wassertemperatur und der Länge des am Wandler befestigten Kabels abhängt, sollten diese Parameter sowie die Frequenz festgelegt werden.

Anmerkung 4 zum Begriff: In einem sich kugelförmig ausbreitendem Schallfeld hängt die elektrische Übertragungsimpedanz des Wandlerpaares vom Abstand zwischen der Schallquelle und dem Empfänger ab, wobei sich der Betrag umgekehrt mit dem Trennabstand d ändert und sich der Phasenwinkel mit $\exp(jkd)$ ändert, dabei ist j die Quadratwurzel von -1 und k ist die Wellenzahl (siehe 3.14).

3.3

elektroakustischer (Unterwasser-)Wandler

(Unterwasser-)Wandler

Gerät, das elektrische Signale in akustische Signale im Wasser umwandelt oder umgekehrt

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein elektroakustischer Wandler, der als ein akustischer Empfänger im Wasser verwendet wird, wird als Hydrophon bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein elektroakustischer Wandler, der als ein akustischer Sender im Wasser verwendet wird, wird als Sender bezeichnet.

3.4

Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient

$\underline{M}_f$

(eines Hydrophons) Quotient der Fourier-Transformierten der Hydrophon-Leerlaufspannungssignal $\Im(U(t))$ und der Fourier-Transformierten des Schalldrucksignals $\Im(p(t))$ für eine festgelegte Frequenz und festgelegte Richtung des Einfalls einer ebenen Schallwelle an der Position des Bezugszentrums des Hydrophons im ungestörten Freifeld, wenn das Hydrophon entfernt wurde

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

$$\underline{M}_f = \frac{\Im(U_H(t))}{\Im(p(t))} \quad (2)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient des Hydrophones ist ein komplexer Parameter. Der Betrag des Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizienten des Hydrophones wird in Volt je Pascal, V/Pa, angegeben. Der Phasenwinkel ist das Argument der Empfindlichkeit und ist die Phasendifferenz zwischen der elektrischen Hydrophonspannung und dem Schalldruck. Die Einheit des Phasenwinkels ist der Radiant.

Anmerkung 3 zum Begriff: Anstelle der „Empfindlichkeit“ (en: sensitivity) wird in einigen Fällen die Benennung „Antwort“ (en: response) verwendet.

[QUELLE: IEC 60500:2017, 3.15, modifiziert, gestrichen wurde „Effektivwert“ und ergänzt wurde „Fourier-Transformierte“ vor „der Leerlaufausgangsspannung“ und „des Schalldrucks“.]

3.5

Freifeld-Empfangsübertragungsmaß

L_M

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

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

$$L_M = 20 \log_{10} \frac{|M_f|}{M_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit des Freifeld-Empfangsübertragungsmaßes ist Dezibel, dB. Der Bezugsübertragungskoeffizient M_{ref} ist 1 V/Pa oder jedes gültige SI-Vielfache bzw. -Teil dieser Einheit. Der am häufigsten verwendete Bezugswert für die Unterwasserakustik ist 1 V/μPa.

[QUELLE: IEC 60500:2017, 3.16, modifiziert, ergänzt wurde „Betrag“ vor „Freifeldübertragungskoeffizient“.]

3.6

ungerichtete Charakteristik

Eigenschaft eines Übertragungskoeffizienten des Wandlers, dass er innerhalb einer festgelegten Grenzabweichung richtungsunabhängig ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Toleranz ist festgelegt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die ungerichtete Charakteristik kann in einem zweidimensionalen Raum nur in einer Ebene festgelegt werden, während ein Wandler in drei Dimensionen in allen Ebenen durch das Bezugszentrum ungerichtet sein kann.

Anmerkung 3 zum Begriff: Im Regelfall nähert sich die Richtungsempfindlichkeit eines Wandlers der ungerichteten Charakteristik, wenn die Maße des Wandlers viel kleiner als die akustische Wellenlänge sind.

3.7

reziproker Wandler

linearer, passiver und reversibler elektroakustischer Wandler, dessen Wandlerkoeffizienten gleich sind, unabhängig davon, ob die Wandlung elektrisch zu mechanisch oder umgekehrt ist

[QUELLE: IEC 60050-801-25-08; IEC 60565:2006, Begriff 3.24, modifiziert, Ergänzung von „unabhängig ... umgekehrt ist“.]

3.8

reversibler Wandler

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

3.9

Sender

Unterwasserschallsender

elektroakustischer Wandler, der elektrische Signale in Schall wandelt, der sich im Wasser ausbreitet

[QUELLE: IEC 60565:2006, 3.37; modifiziert durch Ergänzung des Synonyms „Unterwasserschallsender“ (en: underwater sound projector).]

3.10

Sende-Stromübertragungskoeffizient

S_1

Quotient des Produkts der Fourier-Transformierten des Schalldrucks $\Im(p(t))$ an einer Position im akustischen Fernfeld eines Senders (um das Absorptionsmaß kompensiert) und dem Abstand d vom Bezugszentrum des Senders zur Fourier-Transformierten des elektrischen Stroms durch den Sender $\Im(I(t))$ bei einer festgelegten Frequenz und in einer festgelegten Richtung unter akustischen Freifeldbedingungen in einem gleichförmigen Medium

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

$$\underline{S}_1 = \frac{\Im(p(t))d}{\Im(I(t))} \exp[jk(d - d_0)] \quad (4)$$

Dabei ist d_0 der Bezugsabstand, ausgewählt = 1 m.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Senders ist ein komplexer Parameter. Der Betrag des Sende-Stromübertragungskoeffizienten wird in der Einheit Pascal-Meter je Ampere, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$, angegeben. Der Phasenwinkel ist das Argument des Sende-Übertragungskoeffizienten und stellt die Phasendifferenz zwischen dem Schalldruck in einem Abstand d vom Sender und dem elektrischen Strom dar. Die Einheit des Phasenwinkels ist der Radiant.

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Begriff „Antwort“ wird manchmal anstatt des Begriffs „Empfindlichkeit“ benutzt.

3.11 Sende-Stromübertragungsmaß

$L_{S,I}$

zwanzigfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Betrags des Sende-Stromübertragungskoeffizienten S zu einem Bezugswert des Sende-Übertragungskoeffizienten $S_{I,ref}$ in Dezibel

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

$$L_{S,I} = 20 \log_{10} \frac{|S_f|}{S_{I,ref}} \text{ dB} \quad (5)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit des Sende-Stromübertragungsmaßes ist Dezibel, dB. Der Bezugswert des Sende-Übertragungskoeffizienten $S_{I,ref}$ ist $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$.

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Senders wird im Englischen manchmal auf „Transmitting Current Response“ oder „TCR“ abgekürzt.

[QUELLE: IEC 60565:2006, modifiziert durch Aufnahme von „Betrags des“ vor Sende-Stromübertragungskoeffizienten und Ergänzung von „in Dezibel“ am Ende. Ergänzung der Gleichung in der Anmerkung 1 zum Begriff.] Vorhandene Anmerkungen zum Begriff wurden zusammengefasst.]

3.12 Sende-Spannungsübertragungskoeffizient

$\underline{S}_V$

Quotient des Produkts der Fourier-Transformierten des Schalldrucks $\Im(p(t))$ an einer Position im akustischen Fernfeld eines Senders (um das Absorptionsmaß kompensiert) und dem Abstand d vom Bezugszentrum des Senders zur Fourier-Transformierten der elektrischen Spannung an den Anschlussklemmen des Senders $\Im(V(t))$ bei einer festgelegten Frequenz und in einer festgelegten Richtung unter akustischen Freifeldbedingungen in einem gleichförmigen Medium

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

$$\underline{S}_V = \frac{\Im(p(t))d}{\Im(V(t))} \exp[jk(d - d_0)] \quad (6)$$

Dabei ist d_0 der Bezugsabstand, ausgewählt = 1 m.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Sende-Spannungsübertragungskoeffizient eines Senders ist ein komplexer Parameter. Der Betrag des Sende-Spannungsübertragungskoeffizienten wird in der Einheit Pascal-Meter je Volt, $\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$, angegeben. Der Phasenwinkel ist das Argument des Sende-Übertragungskoeffizienten und stellt die Phasendifferenz zwischen dem Schalldruck in einem Abstand d vom Sender und dem elektrischen Strom dar. Die Einheit des Phasenwinkels ist der Radiant.

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Begriff „Antwort“ wird manchmal anstatt des Begriffs „Empfindlichkeit“ benutzt.

Anmerkung 4 zum Begriff: Der Sende-Spannungsübertragungskoeffizient eines Senders wird im Englischen manchmal auf „Transmitting Voltage Response“ oder „TVR“ abgekürzt.

3.13 Sende-Spannungsübertragungsmaß

$L_{S,V}$

zwanzigfacher dekadischer Logarithmus des Verhältnisses des Betrags des Sende-Spannungsübertragungskoeffizienten $\underline{S}_V$ zu einem Bezugswert des Sende-Übertragungskoeffizienten $S_{I,ref}$ in Dezibel

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

$$L_{S,V} = 20 \log_{10} \frac{|S_V|}{S_{ref}} \text{ dB} \quad (7)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Einheit des Sende-Spannungsübertragungsmaßes ist Dezibel, dB. Der Bezugswert des Sende-Übertragungskoeffizienten S_{ref} ist $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{V}^{-1}$.

[QUELLE: IEC 60565:2006, modifiziert durch Aufnahme von „Betrags des“ vor Sende-Spannungsübertragungskoeffizienten und Ergänzung von „in Dezibel“ am Ende. Ergänzung der Gleichung in der Anmerkung 1 zum Begriff.] Vorhandene Anmerkungen zum Begriff wurden zusammengefasst.]

3.14

Wellenzahl

k

Kehrwert der akustischen Wellenlänge, multipliziert mit 2π

Anmerkung 1 zum Begriff: In Gleichungsform:

$$k = 2\pi/\lambda \quad (8)$$

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Wellenzahl wird in der Einheit je Meter, m^{-1} angegeben.

Anmerkung 3 zum Begriff: In verschiedenen Gebieten der Physik kann der Begriff Wellenzahl entweder als $2\pi/\lambda$ oder $1/\lambda$, angesehen werden, in der technischen Akustik wird jedoch $2\pi/\lambda$ bevorzugt. Der Begriff wird in IEV 103-10-12 (Mathematik – Funktionen) als „Kreiswellenzahl“ bezeichnet.

[QUELLE: IEC 60050, 726-05-02, modifiziert durch streichen von „der Wellenlänge im Wellenleiter“ und ergänzen des Faktors 2π . Anmerkungen zum Begriff wurden ergänzt.]

3.15

Hydrophon

elektroakustischer Wandler, der zu im Wasser erzeugten Drucksignalen analoge elektrische Spannungen erzeugt

Anmerkung 1 zum Begriff: Ein Hydrophon ist dafür konstruiert, um prinzipiell auf Unterwasser-Schalldruck zu antworten.

Anmerkung 2 zum Begriff: Allgemein kann ein Hydrophon auch ein elektrisches Signal als Antwort auf nicht-akustische Druckschwankungen erzeugen (z. B. Schwankungen, die in einer turbulenten Grenzschicht während Bedingungen eines großen Wasserflusses bestehen).

Anmerkung 3 zum Begriff: Hydrophon-Typen sind Referenz-Hydrophone und Mess-Hydrophone. Mess-Hydrophone werden bei allgemeinen Messungen von Schallfeldern benutzt; Referenz-Hydrophone werden prinzipiell für Kalibrierzwecke benutzt (z. B. beim Vergleich von Kalibrierungen mit Mess-Hydrophonen).

Anmerkung 4 zum Begriff: Hydrophone werden prinzipiell als Hör-Geräte benutzt, aber bei reziproker Kalibrierung wird ein Hydrophon als reziproker Wandler benutzt; es funktioniert nicht nur als Hydrophon, sondern auch als Sender (Schallquelle).

Anmerkung 5 zum Begriff: Ein Hydrophon, das in ein digitales Aufnahmesystem integriert ist, wird manchmal als „digitales Hydrophon“ bezeichnet; die Kombination wird jedoch am besten als Mess-System betrachtet, nicht nur als Hydrophon alleine.

Anmerkung 6 zum Begriff: Wenn ein Hydrophon an einen Ladungsverstärker angeschlossen ist, wird die Empfindlichkeit des Hydrophons manchmal als Ladungsempfindlichkeit beschrieben, was in Bezug steht zur Spannungsempfindlichkeit des Hydrophons durch seine elektrische Kapazität.

[QUELLE: IEC 60500:2017 [2], 3.17]

3.16

Signal

festgelegte zeitveränderliche Feldgröße, wie elektrischer Strom, elektrische Spannung, Schalldruck, Schallschnelle oder andere Größe

[QUELLE: ISO 18405:2017]

3.17

Richtungsempfindlichkeit

Richtwirkung

Richtcharakteristik

normierte Änderung des Übertragungskoeffizienten des Wandlers in Abhängigkeit vom Winkel, die sowohl auf den Empfangs- als auch Sende-Übertragungskoeffizienten eines elektroakustischen Wandlers angewendet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Der für die Normalisierung verwendete Empfindlichkeitswert ist die Empfindlichkeit in einer festgelegten Bezugsrichtung, am häufigsten die Empfindlichkeit in der Richtung der Hauptachse des Wandlers (wie in IEC 60500:2017 definiert)

Anmerkung 2 zum Begriff: Bei einem reziproken Wandler ist die normalisierte Richtungsempfindlichkeit in den Sende- und Empfangsbetriebsarten die gleiche.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Empfindlichkeit wird manchmal als normalisiertes Richtungsempfindlichkeitsmaß in Dezibel angegeben.

Anmerkung 4 zum Begriff: Die Richtungsempfindlichkeit kann in einem zweidimensionalen Raum nur in einer Ebene festgelegt werden. Die zweidimensionale Richtungsempfindlichkeit wird vereinbarungsgemäß in den drei Ebenen (XY, XZ, YZ) festgelegt, die für das in IEC 60500:2017 definierte Koordinatensystem des Wandlers definiert sind. In drei Abmessungen eines Wandlers kann die Richtungsempfindlichkeit in allen Ebenen durch das Bezugszentrum festgelegt werden.

3.18

Richtmaß

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

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieses Maß wird als ein (relativer) Wert in Dezibel angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das Richtmaß ist das gleiche wie der Wert der normalisierten Richtungsempfindlichkeit.
[IEC 60050-801-25-69]

3.19

Gütefaktor

Q-Faktor

Q

Maß für die Resonanzschärfe eines Wandlers, gleich dem 2π -fachen des Verhältnisses der maximal gespeicherten Energie zu der während eines Zyklus abgegebenen Energie

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Gütefaktor wird üblicherweise als der Kehrwert der normierten Bandbreite bei Resonanz (siehe Anhang B).

[IEC 60050-801-24-12, modifiziert mit Ergänzung der Anmerkung 1 zum Begriff]]

4 Symbole und Abkürzungen

Formelzeichen	Bedeutung
D	längstes Längenmaß des Wandlers
C	elektrische Kapazität
c	Schallgeschwindigkeit in Wasser
D_i	Richtwirkungsmaß
d	Abstand zwischen Sender und Hydrophon
dS	differentielle Fläche auf einer Kugel
f	akustische Frequenz
f_R	Resonanzfrequenz (eines Wandlers)
I	elektrischer Strom
I_P	elektrischer Strom durch den Sender
I_T	elektrischer Strom durch den Wandler
j	Quadratwurzel aus minus eins
K_f	Fernfeldkorrekturfaktor
l	Breite des Tanks
L_M	Freifeld-Empfangsübertragungsmaß
$L_{S,I}$	Sende-Stromübertragungsmaß
$L_{S,V}$	Sende-Spannungsübertragungsmaß
$\underline{M}_f$	Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient
M_H	Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient eines Hydrophones
$\underline{M}_T$	Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient eines Wandlers
M_P	Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient eines Senders (bei Verwendung als Hydrophon)
M_R	Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient eines Bezugshydrophones
p	Schalldruck
p_a	Schalldruck in der Bezugsrichtung für R_0 während der Messungen der Richtungsempfindlichkeit
P	Sender
Q	Gütefaktor eines Wandlers (oder Messsystems)
r	Bereich von der Schallquelle (Abstand von Schallquelle zum Punkt im akustischen Feld)
R	Widerstand
R_0	Richtfaktor
S_i	Sende-Stromübertragungskoeffizient
$S_{i,H}$	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Hydrophons (bei Verwendung als Sender)
$S_{i,P}$	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Senders

$S_{I,T}$	Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Wandlers
S_V	Sende-Spannungsübertragungskoeffizient eines Senders
U	elektrische Spannung
U_H	Leerlaufspannung am Hydrophon
U_R	Leerlaufspannung an einem kalibrierten Bezugshydrophon
U_{PH}	Leerlaufspannung am Hydrophon von einem Sender als Schallquelle
U_{PT}	Leerlaufspannung am Hydrophon von einem Wandler als Schallquelle
U_{PT}	Leerlaufspannung am Wandler von einem Sender als Schallquelle
V_P	an einen Sender übertragene elektrische Anregungsspannung
V_T	an einen Wandler übertragene elektrische Spannung
W	Bandbreite
Z	elektrische 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
θ	vertikaler Winkel (Erhebungswinkel)
λ	Wellenlänge des Schalls in Wasser
ρ	Dichte von Wasser
τ	Pulsdauer
φ	Azimutwinkel (Horizontalebene)
ω	Kreisfrequenz

5 Allgemeine Verfahren für die Kalibrierung

5.1 Allgemeine Kalibrieranforderungen

5.1.1 Arten der Kalibrierung

Im Anwendungsbereich dieser Norm werden zwei allgemeine Typen der Kalibrierung behandelt:

- Absolute Kalibrierung, bei der kein akustischer Bezugswandler erforderlich ist
Die Kalibrierung basiert in diesem Fall auf dem Prinzip der akustischen Reziprozität, bei dem das Verfahren drei elektroakustische Wandler erforderlich macht, von denen mindestens einer ein reziproker Wandler sein muss. Dies ist eine primäre Kalibrierung, die rückverfolgbar auf elektrische Primärnormale ist und mit der eine hohe Genauigkeit erreicht werden kann.
- Relative Kalibrierung, bei der ein kalibrierter akustischer Bezugswandler verwendet wird.
Die Kalibrierung wird hier durch Vergleich mit einem weiteren akustischen Wandler durchgeführt, der bereits kalibriert worden ist. Der Bezugswandler darf entweder ein kalibriertes Hydrophon oder ein kalibrierter Sender sein. Die Genauigkeit ist im Vergleich zu einer Reziprozitätskalibrierung typischerweise beeinträchtigt, was hauptsächlich auf die zusätzliche Unsicherheit durch das akustische Bezugsgerät zurückzuführen ist.

5.1.2 Anforderungen an das akustische Feld

Die folgenden allgemeinen Anforderungen müssen erfüllt sein, damit die Kalibrierungen gültig sind [3]-[5]:

- Akustische Freifeldbedingungen, die einen minimalen Einfluss von Schallreflexionen von den Grenzen des Mediums erfordern (siehe 5.2);
- Akustische Fernfeldbedingungen, die einen ausreichenden Trennabstand zwischen Quelle und Empfänger erfordern (siehe 5.3);
- Akustische stationäre Bedingungen, die ein Abklingen des transienten Verhaltens durch resonante Wandler erfordern (siehe 5.4).

5.2 Anforderungen an das akustische Freifeld

5.2.1 Dauerschallsignale

Bei Dauerschallsignalen muss der Mindestabstand von den Wandlern zur nächsten Begrenzung des Mediums derart sein, dass die Amplitude der reflektierten Signale nicht mehr als 3 % der Amplitude des direkten Signals beträgt, um die Schwankungen der Signalamplitude aufgrund von Störungen durch Reflexionen von den Begrenzungen zu begrenzen.

ANMERKUNG 1 Bei einer bestimmten Messanordnung hängt der Mindestabstand zu den Begrenzungen, um die vorstehende Anforderung zu erfüllen, von der Richtwirkung der Wandler, dem Reflexionskoeffizienten der Begrenzungsflächen und von der Signalfrequenz ab (bei hohen Schallfrequenzen erhöht die Absorption im Wasser den Ausbreitungsverlust und verringert den erforderlichen Mindestabstand). Bevor über den Mindestabstand zu den Begrenzungen entschieden wird, kann eine individuelle Bewertung dieser Faktoren vorgenommen werden, um die Anforderungen an Dauerschallsignale zu erfüllen. Oftmals ist die Wasseroberfläche die nächstliegende Begrenzung. Beispielsweise müssen die Wandler für zwei omnidirektionale Wandler, die in einem Abstand von 5 m positioniert sind, damit die Amplitude der Reflexionen innerhalb der vorstehenden Anforderung liegt, in einer Tiefe von etwa 16 m positioniert werden (wobei vorausgesetzt wird, dass die Gesamtschallreflexion an der Wasseroberfläche auftritt und dass die akustische Frequenz ausreichend niedrig ist, damit die Absorption nicht maßgeblich wird) [4], [5].

ANMERKUNG 2 Eine alternative Möglichkeit, akustische Freifeldbedingungen für Dauerschallsignale zu erzielen, ist die Verwendung einer reflexionsarmen akustischen Auskleidung auf der Innenfläche eines Prüftanks. In diesem Fall muss die Wirksamkeit des reflexionsarmen Materials (in Bezug auf den Reflexionsverlust als Funktion des Winkels) ausreichend sein, um die vorstehende Anforderung an die reflektierte Signalamplitude am Hydrophon über den zu untersuchenden Frequenzbereich zu erreichen. Es ist zu beachten, dass die Wasseroberfläche ein starker Schallreflektor ist, und ein vollständig echofreier Prüftank erfordert zusätzlich zur Auskleidung der Wände und des Bodens des Tanks, dass das reflexionsarme Material direkt unter der Wasseroberfläche aufgehängt wird [4].

ANMERKUNG 3 Einige Kalibrierverfahren mit nachhallenden Wassertanks verwenden Dauerschallsignale (oder zumindest Signale, die deutlich länger als die echofreie Zeit des Tanks sind). Bei diesen Verfahren können Pseudo-Freifeldbedingungen mit Signalverarbeitungstechniken erreicht werden, die den Effekt von Reflexionen an den Tankbegrenzungen kompensieren. Zu Beispielen derartiger Verfahren siehe Anhang J.

5.2.2 Zeitbegrenzte Signale

Bei der Anwendung von zeitbegrenzten Signalen, wie Impulsen oder infrequenten Schwingungsimpulsen (tonfrequente Schwingungsimpulse), müssen Reflexionen durch Auswahl des Mindestabstands von jedem Wandler zu jeder Begrenzungsfläche (Wasseroberfläche, Tankboden und Seitenwände) beseitigt werden, damit die Zeitverzögerung der reflektierten Signale in Bezug auf das Direktsignal größer ist als die Dauer des Direktsignals.

ANMERKUNG Schwingungsimpulse oder Impulssignale können in Prüftanks endlicher Größe angewendet werden, um Reflexionen durch Anwendung von Signalen mit endlicher Dauer und Anwendung geeigneter Zeitfenstertechnik zu beseitigen. Auf diese Weise treffen die reflektierten Signale später als die Direktsignale ein, so dass es ein ausreichend echofreies Signal für die Ausführung der erforderlichen Analyse gibt. In derartigen Fällen gibt es eine untere Grenzfrequenz, unterhalb derer es nicht möglich ist, Messungen des stationären Signals mit herkömmlichen Mitteln durch-

zuföhren. Zur detaillierten Beschreibung der Anwendung von Impulssignalen und Schwingungsimpulsen bei der Kalibrierung siehe Anhang E [4]-[6].

5.3 Anforderungen an das akustische Fernfeld

Der Abstand d zwischen dem Sender und dem Hydrophon muss ausreichend groß sein, damit die Bedingungen für das akustische Fernfeld erfüllt werden und Fehler aufgrund der endlichen Größe der Wandler auf ein Mindestmaß gesenkt werden. Zu diesem Zweck muss die Trennung Sender-Hydrophon größer sein als die Größe des größten Wandler und das Hydrophon muss im akustischen Fernfeld der Schallquelle positioniert sein.

Für die beiden Wandler mit maximalen Maßen der empfindlichen Flächen D_1 bzw. D_2 muss der kleinste Trennabstand d ausgewählt werden nach den Beziehungen:

$$d > K_f \left(\frac{D_1^2}{\lambda} + \frac{D_2^2}{\lambda} \right) \quad (9)$$

und gleichzeitig:

$$d > 5D_1 \text{ und } d > 5D_2 \quad (10)$$

Dabei ist K_f der Fernfeld-Korrekturfaktor, um sicherzustellen, dass sich das Schallfeld mit einer festgelegten Toleranz der kugelförmigen Ausbreitung annähert.

Um eine Trennung zu erhalten, die den Fehler aufgrund des Fehlens einer kugelförmigen Divergenz auf weniger als 0,2 dB verringert, muss der Wert von K_f in Gleichung (9) mit größer als 1,3 ausgewählt werden.

Zu weiteren Einzelheiten der vorstehend angegebenen Kriterien siehe Anhang D.

ANMERKUNG Bei der Messung des Richtungsverhaltens eines Wandler wird der Abstand zwischen dem Sender und dem Hydrophon so ausgewählt, dass er größer ist als der durch (9) und (10) vorgegebene. Der Abstand ist kleiner als das Zweifache des durch Gleichung (9) oder Gleichung (10) gegebene Abstand, je nachdem, welcher Wert größer ist. Siehe Anhang D und Literaturhinweise [3]-[9].

5.4 Anforderungen an stationäre Bedingungen

Wenn bei der Kalibrierung tonfrequente Schwingungsimpulse verwendet werden, muss das Zeitfenster, das bei der Auswahl des zu analysierenden Signals angewendet wird, so positioniert werden, dass der Beginn des Fensters mit einer Zeitverzögerung erfolgt, der mindestens Q Perioden der Resonanzfrequenz des Senders nach dem Eintreffen des Direktsignals entspricht, dabei stellt Q den Gütefaktor (Q -Faktor) der Hauptresonanz des Senders dar.

ANMERKUNG 1 In der herkömmlichen Anordnung für tonfrequente Schwingungsimpulse, die für Kalibrierungen in Prüftanks verwendet werden, werden Messungen am stationären Teil des empfangenen Signals durchgeführt, wobei zeitgesteuerte Techniken verwendet werden, um das Direktwegsignal von Reflexionen von den Tankbegrenzungen und der Wasseroberfläche zu trennen. Bei derartigen Messungen wird das zur Analyse zur Verfügung stehende stationäre Signal zeitlich begrenzt, und zwar sowohl durch das Eintreffen von Reflexionen von den Begrenzungen als auch durch Anlauftransienten, die durch das Resonanzverhalten der zu prüfenden Wandler verursacht werden. Bei einem einfachen Mess-Hydrophon liegt der Q -Faktor üblicherweise in der Größenordnung von nur 3 oder 4 bei einer relativ hohen Resonanzfrequenz, was zu kurzen Anlauftransienten führt und die für die Messung zur Verfügung stehende Signaldauer unwesentlich eingeschränkt wird. Allerdings können als Sender verwendete Wandler einen höheren Q -Faktor besitzen, der das verfügbare Signal verringert (besonders bei deren niedriger Resonanzfrequenz) [4]-[6], [10].

ANMERKUNG 2 Wenn das vom Hydrophon erzeugte Spannungssignal während der verfügbaren echofreien Zeit keine stationären Bedingungen erreicht, ist es nicht möglich, den stationären Zustand direkt zu beobachten. Das bedeutet, dass es bei einer gegebenen Tankgröße und gegebenem Q -Faktor des Wandler eine untere Grenzfrequenz gibt, unterhalb

der es nicht möglich ist, Kalibrierungen mit tonfrequenten Schwingungsimpulsen mit konventionellen Mitteln durchzuführen. Weitere Anleitungen zur Sicherstellung der stationären Bedingungen sind in Anhang E beschrieben.

ANMERKUNG 3 Wenn Schmalbandfilterung auf die Signale angewendet wird (möglicherweise, um bei vorhandenem Breitbandrauschen das Signal-Rausch-Verhältnis zu erhöhen), verändert dies das transiente Einschwingen zu Beginn der tonfrequenten Schwingungsimpulse. Obwohl eine derartige Filterung die Transienten aufgrund höherfrequenter Wandlerresonanzen unterdrücken kann, so kann sie auch das Einsetzen des stationären Zustandes verzögern und die für die Analyse verfügbare Signaldauer verkürzen. Aus diesem Grund ist es ratsam, dass die Filterbandbreite nicht schmäler als eine Oktave ist.

ANMERKUNG 4 Die Anforderung von 5.4 gilt nur für zeitlich begrenzte Signale. Bei der Verwendung von Dauerschallsignalen werden die Wandler so angesehen, dass sie den stationären Zustand erreicht haben.

ANMERKUNG 5 Die erforderlichen Signalparameter können auch mit moderneren Signalverarbeitungsverfahren bestimmt werden. Diese machen es möglich, die Amplitude und Phase des stationären Signals zu schätzen, ohne eine vollständige stationäre Periode betrachten zu müssen. Dazu gehören die Anwendung moderner Signalmodellierungs- und Signalvorhersageverfahren, bei denen der transiente Teil des Signals genutzt wird, um die stationäre Amplitude und Phase vorherzusagen, und auch die Anwendung quadraturergänzter tonfrequenter Schwingungsimpulse (zu weiteren Einzelheiten siehe Anhang E und Anhang J).

5.5 Anforderungen an die Ausrüstung

5.5.1 Kalibriereinrichtung

Die verwendete Kalibriereinrichtung muss geeignet sein, die in 5.2, 5.3 und 5.4 beschriebenen akustischen Anforderungen über den beabsichtigten Frequenzbereich und für die zu prüfenden Arten von Hydrophonen und Wandlern zu erfüllen.

Die Kalibriereinrichtung muss es ermöglichen, mindestens zwei Wandler gleichzeitig mit einem bekannten Trennabstand reproduzierbar zu positionieren und zur Kalibrierung entsprechend den Anforderungen in 5.6 auszurichten.

ANMERKUNG 1 Die häufigste Art der Kalibrierung basiert auf einem wassergefüllten Prüftank aus Beton, Stahl oder Holz (wodurch der Tank aufgrund der reflektierenden Begrenzung nachhallend ist). Zeitlich begrenzte Signale (wie tonfrequente Schwingungsimpulse) werden zeitlich torgesteuert angewendet, um Reflexionen zu eliminieren. Eine derartige Einrichtung ermöglicht einen praktischen Zugang, präzise Positionierung der Geräte (durch Benutzung eines starren Gestells oder Positionierungssystems) und die Kontrolle über die Umgebungsbedingungen. Allerdings schränkt die endliche Größe den Frequenzbereich und die Art des zu kalibrierenden Wandlers ein. Die Prüfung eines Senders mit großer Apertur bei hohen Frequenzen (ein Wandler mit „hohem ka -Wert“) kann schwierig in einem kleinen Prüftank sein, weil es nicht immer möglich ist, Fernfeldbedingungen zu erreichen (siehe 5.3). Ein kleiner Prüftank begrenzt auch die echofreie Zeit, so dass es nicht immer möglich ist, bei Wandlern mit hohem Q -Faktor das stationäre Signal zu beobachten (siehe 5.4). Zu weiteren Anleitung siehe Anhang E und Literaturhinweise [3]–[6], [10].

ANMERKUNG 2 Wenn der Prüftank mit einem reflexionsarmen Material ausgekleidet ist, ist das Erreichen der in 5.2 geforderten Freifeldbedingungen in einem kleineren Prüftank möglich, abhängig von der bestätigten Wirksamkeit des reflexionsarmen Materials (siehe 5.2.1). Weiterhin gelten jedoch die Anforderungen von 5.3 und 5.4. Darüber hinaus kann die Positionierung der Wandler im Tank praktisch schwieriger sein, wenn die Wasseroberfläche mit dem reflexionsarmen Material abgedeckt ist [4].

ANMERKUNG 3 Bei Freiwasseranlagen wird die Positionierung der Wandler üblicherweise von der Oberfläche aus mit einer schwimmenden Konstruktion, z. B. einem Floß oder Ponton durchgeführt. Die Wandler werden üblicherweise in größerer Tiefe positioniert als bei Tanks, aber die Genauigkeit der Positionierung und Ausrichtung kann im Vergleich zu Prüftanks schlechter sein. Die mangelnde Kontrolle über die Umgebungsbedingungen kann zusätzliche Probleme aufwerfen durch: (i) Schwankungen der Wassertemperatur (sowohl tageszeitlich als auch saisonal), die Veränderungen im Betriebsverhalten der Wandler verursachen und Temperatursprungschichten ausbilden; (ii) Wetter (Wind- und Wellenwirkung), die eine relative Bewegung der Wandler verursachen und (iii) Geräusche von natürlichen Quellen und anderen menschlichen Aktivitäten in der Nähe [4].

5.5.2 Prüfausrüstung

Die folgende Messausrüstung ist erforderlich, um eine Kalibrierung eines elektroakustischen Unterwasserwandlers durchzuführen. Von der gesamten Prüfausrüstung wird eine Leistungsfähigkeit gefordert, die den beabsichtigten akustischen Frequenzbereich umfasst (das ist ein Maximum von 200 Hz bis 1 MHz, darf aber je nach Anwendung ein schmalerer Bereich sein) [4], [6], [10].

5.5.2.1 Signalquelle

Die Signalquelle muss zur Bereitstellung des elektrischen Signals zur Ansteuerung des Senders eingesetzt werden. Sie kann auch verwendet werden, um den Triggerimpuls bereitzustellen, der zur Synchronisierung der Signalerfassung durch den Digitalisierer verwendet wird.

ANMERKUNG Die Signalquelle liefert im Regelfall eine maximale Ausgangsspannung von nur wenigen Volt, stellt aber eine Reihe von Signalarten bereit, einschließlich torgesteuerte Schwingungsimpulse.

5.5.2.2 Leistungsverstärker

Der Leistungsverstärker ist erforderlich, um den als Sender verwendeten Wandler mit ausreichender elektrischer Leistung anzusteuern, damit am Hydrophon Schalldrücke erzeugt werden, die mindestens 6 dB über dem Umgebungsgeräusch in der Einrichtung liegen.

ANMERKUNG 1 Ein Leistungsverstärker mit einer Ausgangsleistung von 100 W ist üblicherweise für die meisten Kalibrierzwecke von Hydrophonen und Wandlern ausreichend, aber für speziellere Anwendungen kann manchmal ein höheres Leistungsvermögen erforderlich sein.

ANMERKUNG 2 Der Leistungsverstärker hat üblicherweise eine niedrige elektrische Ausgangsimpedanz (alternativ kann die elektrische Ausgangsimpedanz an den Wandler angepasst sein, um die maximale Leistung zu liefern).

5.5.2.3 Hydrophon-Vorverstärker

Der Vorverstärker ist erforderlich, um die vom Hydrophon entwickelte elektrische Spannung zu verstärken und hat im Idealfall eine elektrische Eingangsimpedanz, die mindestens um den Faktor 100 höher als die Impedanz des Hydrophones ist (weil die elektrische Impedanz eines piezoelektrischen Hydrophones überwiegend kapazitiv ist, muss die Eingangskapazität des Vorverstärkers einen ausreichend kleinen Wert haben).

ANMERKUNG 1 Der Vorverstärker besitzt üblicherweise eine wählbare Spannungsverstärkung und eine wählbare elektronische Filterung (alternativ kann die Filterung mit einer gesonderten zugeordneten Einheit oder digital in der Nachbearbeitung durchgeführt werden).

ANMERKUNG 2 Bei der Verwendung eines Hydrophones mit eingebautem integrierten Verstärker ist kein gesonderter Hydrophonvorverstärker erforderlich.

5.5.2.4 Strommessgerät

Das Strommessgerät ist erforderlich, wenn der elektrische Ansteuerungsstrom durch den Sender gemessen wird (z. B. während einer Freifeld-Reziprozitätskalibrierung). Das Strommessgerät muss vorzugsweise aus einem kalibrierten Stromwandler bestehen, der eine dem elektrischen Strom proportionale Ausgangsspannung liefert (dabei wird die Spannung anschließend von Digitalisierer gemeinsam mit der Hydrophonspannung gemessen).

ANMERKUNG Alternativ kann ein kalibrierter Widerstand und ein Spannungsmessgerät verwendet werden.

5.5.2.5 Messgerät für die Anregungsspannung

Dieses Messgerät ist erforderlich, wenn die elektrische Anregungsspannung am Sender gemessen wird, z. B. bei der Bestimmung des Sende-Spannungsübertragungskoeffizienten (TVR).

ANMERKUNG Dieses besteht üblicherweise aus einem Tastkopf mit hoher Impedanz oder einem kalibrierten Abschwächer, um die Anregungsspannung um bis zu 40 dB zu verringern, damit sie mit dem Digitalisierer gemessen werden kann.

5.5.2.6 Digitalisierer

Der eingesetzte Digitalisierer muss ein Analog-Digital-Wandler (ADC) oder ein digitalisierendes Oszilloskop sein, der bzw. das eine digitale Wellenform als Aufzeichnung der elektrischen Signale während der Kalibrierung erfasst (z. B. Hydrophonspannung, Spannung vom Stromwandler usw.).

Die Abtastrate des Digitalisierers muss mindestens das Zweieinhalbfache der höchsten zu untersuchenden Frequenz betragen und die Auflösung muss für eine genaue Aufzeichnung des Signals ohne Quantisierungsfehler mit einer empfohlenen Mindestauflösung von 8 Bit ausreichend sein. Es wird empfohlen, dass der Digitalisierer extern getriggert werden kann (üblicherweise von der Signalquelle oder einem Computer). Bei der Durchführung absoluter elektrischer Messungen muss der Digitalisierer über den gesamten Betriebsbereich kalibriert werden.

ANMERKUNG 1 Digitalisierer und digitalisierende Oszilloskope mit den geforderten Abtastraten sind mit Auflösungen zwischen 8 Bit und 16 Bit erhältlich. Je höher die Auflösung, desto besser für die Messung der Signale mit abnehmender Fehlerwahrscheinlichkeit aufgrund des Quantisierungsrauschens.

ANMERKUNG 2 Die Anforderung für eine eindeutige Darstellung der Signale innerhalb des beabsichtigten Frequenzbereichs macht es erforderlich, dass die Abtastrate des ADC höher ist als die Nyquistfrequenz des Signals, welche die Eingangsgröße des ADC ist. Für die Bereitstellung einer Anti-Aliasing-Funktion kann ein Tiefpassfilter verwendet werden, der den Frequenzinhalt des Signals vor der Digitalisierung begrenzen soll, damit sie unterhalb der Nyquistfrequenz des Erfassungssystems liegt.

5.5.2.7 Rechnersteuerung

Es wird empfohlen, die Kalibrierung über einen Rechner zu steuern, auf dem eine geeignete Erfassungsssoftware läuft und die den Digitalisierer und die Signalerfassung steuert (und die auch das Triggersignal für die Signalquelle bereitstellen kann).

ANMERKUNG 1 Die Software wird üblicherweise für die Ausführung der geforderten Signalanalyse eingesetzt, einschließlich der Zeitfensterung und der Berechnung der Amplitude der aufgezeichneten Signale. Einige dieser Funktionen können aber bereits mit den integrierten Verarbeitungsfunktionen ausgeführt werden, die in den digitalisierenden Oszilloskopen zur Verfügung stehen.

ANMERKUNG 2 Obwohl einige der vorstehend genannten Messaufgaben manuell ausgeführt werden können (beispielsweise mit einem analogen Oszilloskop), wird von dieser Vorgehensweise mittlerweile abgeraten.

5.5.2.8 Elektroakustische Wandler

Während der Kalibrierungen sind als Sender und Hydrophone eine Reihe von Wandlern erforderlich. Beispielsweise erfordert die Drei-Wandler-Freifeld-Reziprozitätskalibrierung mindestens zwei Wandler zusätzlich zu dem zu prüfenden Gerät (siehe Abschnitt 8), und die relative Kalibrierung mit einem kalibrierten Hydrophone oder Sender macht kalibrierte Bezugswandler und möglicherweise Hilfssender zur Erzeugung eines geeigneten Schallfeldes erforderlich (siehe Abschnitt 9).

ANMERKUNG Für die Erfassung eines weiten Frequenzbereiches sind verschiedene Wandler erforderlich (dies gilt vor allem für Sender, die aufgrund ihres Eigenresonanzverhaltens einen eingeschränkten Frequenzbereich haben können).

5.6 Positionierung und Ausrichtung

5.6.1 Koordinatensystem

Das ausgewählte Winkelkoordinatensystem muss dem in IEC 60500:2017 festgelegten Koordinatensystem entsprechen.

5.6.2 Bezugsrichtung

Vor der Kalibrierung muss für jedes Hydrophon und jeden Sender eine Bezugsrichtung festgelegt werden. Die Bezugsrichtung muss so ausgewählt werden, dass sie mit der Hauptachse des Hydrophons oder Senders übereinstimmt, sofern es keinen gegenteiligen Grund gibt.

Bei ungerichteten Hydrophonen mit symmetrischem Aufbau muss die Bezugsrichtung in einer Ebene rechtwinklig zur Achse des Hydrophonkörpers liegen und durch eine Markierung am Hydrophonkörper angegeben werden [10].

ANMERKUNG 1 Diese Bezugsrichtung ist die Richtung, für die die Kalibrierung im freien Schallfeld gültig ist. Bei gerichteten Wandlern wird die Bezugsrichtung im Allgemeinen so ausgewählt, dass sie mit der Hauptachse des Wandlers übereinstimmt.

ANMERKUNG 2 Die Richtung kann auch dadurch gewählt werden, dass der Winkel des maximalen Wandler Signals bei einer gegebenen Frequenz mit einer Messung der Richtungsempfindlichkeit bestimmt wird (Beschreibung siehe Anhang A).

5.6.3 Befestigung und Halterung der Wandler

Jeder Sender und jedes Hydrophon muss fest in einer Halterung angebracht sein, die es ermöglicht, die Geräte präzise und reproduzierbar an bestimmten Punkten im Wasser zu positionieren.

Die Befestigung für ein Hydrophon muss so ausgewählt werden, dass sie einen minimalen Einfluss auf den gemessenen Übertragungskoeffizienten hat, soweit sie der vorstehenden Anforderung an die genaue Positionierung der Aufnehmer entspricht.

Wenn ein Drehtisch in das Gestell oder Positionierungssystem eingebaut ist, muss die Befestigung zulassen, dass ein Wandler mit seinem Bezugszentrum in Richtung der Drehachse positioniert werden kann.

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Befestigung den gemessenen Übertragungskoeffizienten beeinflusst, muss der Wandler in derselben Halterung kalibriert werden, die für Messungen mit dem Gerät im Feld verwendet wird. Wird vermutet, dass das Gerät empfindlich auf die Halterungs- oder Befestigungsart reagiert, muss eine Beschreibung der Befestigungsanordnung mit den Ergebnissen angegeben werden.

ANMERKUNG 1 Einige Wandler sind gegenüber dem Einfluss der Befestigungsverfahren anfälliger als andere. Zur Vermeidung des Einflusses der Befestigung ist es ratsam, keine luftgefüllten Halterungen oder Stangen zu verwenden. Empfohlen wird die Anwendung von frei schwimmenden Unterlagen, wie Hohlstangen, die, wo möglich, aus Kohlenstofffasern oder Kunststoffen gebaut sind. Dabei ist jedoch zu beachten, dass für jede Halterung zur präzise Positionierung oder Ausrichtung eine bestimmte Steifigkeit erforderlich ist [10].

ANMERKUNG 2 Bei einigen gerichteten Wandlern ist eine rechtwinklige Halterung erforderlich, um den Wandler in der richtigen Ausrichtung im Wasser zu positionieren und die Hauptachse auf die des anderen Wandlers auszurichten. Bei einem schweren Wandler ist ein Gegengewicht erforderlich, um ein Kippen der Halterung zu verhindern und damit ein Abweichen der Hauptachse von der beabsichtigten horizontalen Ausrichtung verursacht. Bei der Verwendung einer derartigen rechtwinkligen Halterung ist zu beachten, dass das Bezugszentrum des Wandlers weiterhin in Richtung der Drehachse eines Drehtisches liegen muss, der in das Gestell oder Positionierungssystem eingebaut ist [4], [10].

ANMERKUNG 3 Es ist darauf zu achten, dass der Körperschall, der von der Halterung und dem Gestell aufgenommen und an die Wandler weitergeleitet werden kann, so gering wie möglich ist.

5.6.4 Ausrichtung

Vor jeder akustischen Messung während der Kalibrierung muss das passende Wandlerpaar (z. B. ein Sender und ein Hydrophon) in der gleichen Wassertiefe positioniert und so ausgerichtet sein, dass die Bezugsrichtungen der Wandler ausgerichtet sind. [4], [10]

ANMERKUNG 1 Diese Ausrichtung kann entweder mechanisch mit speziellen Befestigungsstangen oder Aufstellung oder mit einem automatisierten Positionierungssystem (z. B. mit Schrittmotoren und Steuerungen) erfolgen. Wenn beide Wandler kleine omnidirektionale Hydrophone sind, deren Übertragungskoeffizient sich nur wenig mit dem Winkel ändert, wird die mechanische Ausrichtung der akustischen Ausrichtung bevorzugt. Es ist zu beachten, dass die Länge der Befestigungsstangen zu den aktiven Elementen der Hydrophone sorgfältig gemessen werden, damit sie genau auf die gleiche Tiefe eingetaucht werden können.

ANMERKUNG 2 Bei Wandlern, die eine deutliche Richtwirkung um ihre Hauptachse zeigen, können die Wandler akustisch ausgerichtet werden, indem das höchste empfangene Signal bei einer bestimmten Frequenz gesucht wird. Manchmal wird die Bezugsrichtung in einem Winkel der Richtcharakteristik gewählt werden, in dem sich die Empfindlichkeit bei einer bestimmten Frequenz nicht sehr mit dem Richtungswinkel ändert. Es ist zu beachten, dass bei einer derartigen Auswahl der Bezugsrichtung anschließend für alle Frequenzen die gleiche Richtung ausgewählt wird.

ANMERKUNG 3 Für die akustische Ausrichtung zwischen zwei Wandlern (durch Aufsuchen des höchsten empfangenen Signals bei einer bestimmten Frequenz) sind für jede Wandlerhalterung mindestens zwei Freiheitsgrade erforderlich: vertikale Verschiebung im Wasser, um die Tiefenänderung der Wandler zu ermöglichen, und Drehung um eine vertikale Achse, die durch das Bezugszentrum des Wandlers verläuft, mit einem in das Gestell oder Positionierungssystem eingebauten Drehtisch.

5.6.5 Trennabstand

Die Halterung und das Gestell müssen zulassen, den Sender und das Hydrophon in einem bekannten Trennabstand und mit einer kleineren Messunsicherheit als 2 % im Wasser zu positionieren.

ANMERKUNG 1 Der Trennabstand kann auf unterschiedliche Art und Weise mechanisch gemessen werden. Ein starres Gestell kann derart kalibriert werden, dass die Wandler-Befestigungsstangen an festen Positionen am Gestell über dem Tank mit bekannten Abständen zwischen den voreingestellten Positionen aufgehängt werden (unter der Annahme, dass die Wandler vertikal hängen). Wenn ein automatisiertes Positioniersystem angewendet wird, welches kalibriert worden ist, dann kann der Trennabstand der Wandler von den Anzeigen der Steuerungen abgelesen werden. Es ist zu beachten, dass manchmal Abgleicharbeiten durchgeführt werden müssen, um kleinere Versätze zu berücksichtigen, die bei der Befestigung der Wandler aufgetreten sind.

ANMERKUNG 2 Der Trennabstand kann aus der akustischen Laufzeitverzögerung zwischen dem Signaltrigger und dem Eintreffen des Direktsignals am Hydrophon berechnet werden. Dazu muss die Schallgeschwindigkeit bekannt sein, die mit Gleichungen aus der wissenschaftlichen Literatur und bei bekannter Wassertemperatur und -tiefe sowie dem Salzgehalt berechnet werden kann [11]-[14]. Es ist zu beachten, dass ein Wandler auf die Schallwelle zu reagieren beginnt, sobald sie auf das aktive Element trifft, und so muss bei einem großen kugelförmigen oder zylindrischen Gerät manchmal eine kleine Korrektur des akustisch abgeleiteten Trennabstands vorgenommen werden, um damit die Trennung der Wandler-Bezugszentren zu ermitteln (z. B. um den Radius jedes Gerätes zu berücksichtigen).

ANMERKUNG 3 Wenn der Körper eines Hydrophones groß im Vergleich zu seinem aktiven Element ist, kann der auf den Körper auftreffende Streuschall die direkt am Element ankommende Schallwelle stören und kleine Schwankungen im Frequenzgang verursachen. Bei kleineren Trennabständen können diese Schwankungen bei der Sender-Hydrophon-Trennung unterschiedlich sein, weil sich die Unterschiede des akustischen Pfades nur geringfügig unterscheiden, wenn der Trennabstand verändert wird. In derartigen Fällen wird empfohlen, das Hydrophon mit dem größten möglichen Abstand in der Anlage zu kalibrieren (damit das auftreffende Feld eine möglichst genaue Annäherung an eine ebene Welle ist). Außerdem wird empfohlen, den Trennabstand gemeinsam mit den Kalibrierergebnissen anzugeben [15], [16].

5.7 Darstellung des Frequenzganges

Für die Kalibrierung muss eine ausreichende Anzahl akustischer Frequenzen ausgewählt werden, um sicherzustellen, dass das Leistungsvermögen des Wandlers über den gewünschten Frequenzbereich sicher charakterisiert wird.

ANMERKUNG 1 Bei Hydrophonen, deren Übertragungskoeffizient im Niederfrequenzbereich relativ frequenzunabhängig ist, ist die empfohlene Mindestauflösung ein Abstand von einer Terz für die akustischen Frequenzen.

ANMERKUNG 2 In der Nähe der Resonanzfrequenz ändert sich bei Sendern und Hydrophonen der Übertragungskoeffizient stärker mit der Frequenz und die empfohlene Mindestauflösung ist ein Abstand von einer Zwölfteloktave für die akustischen Frequenzen.

5.8 Frequenzeinschränkungen

5.8.1 Obere Frequenzgrenze

Die hier beschriebenen Kalibrierverfahren können für Frequenzen bis 1 MHz angewendet werden, jedoch können die Messunsicherheiten bei Frequenzen von einigen hundert Kilohertz größer sein. Den Beschränkungen des Verfahrens bei hohen Frequenzen muss ausreichend Beachtung zukommen und der Einfluss jeglicher Beschränkungen muss bei der Bewertung der Gesamtunsicherheit berücksichtigt werden (siehe Anhang E).

ANMERKUNG 1 Der Mindesttrennabstand, der gefordert wird, um geeignete akustische Fernfeldbedingungen für ein spezielles Wandlerpaar zu ermöglichen, erhöht sich mit der Frequenz (siehe 5.3). Bei ausreichend hohen Frequenzen kann der erforderliche Abstand zum Erreichen der akustischen Fernfeldbedingungen die Maße des Tanks überschreiten. Eine Vergrößerung des Trennabstands der Wandler führt bei der Anwendung von tonfrequenten Schwingungsimpulsen tendenziell zu einer Verringerung der echofreien Zeit, weil die Wandler näher an den Tankbegrenzungen liegen und dadurch die Messungen erschweren.

ANMERKUNG 2 Die Dämpfung des Schalls infolge Absorption im Wasser erhöht sich stark mit der Frequenz und erreicht etwa 0,25 dB/m bei 1 MHz für Süßwasser (bei 16 °C) und 0,4 dB/m für Meerwasser (bei 8 °C, 5 m Tiefe, pH 8 und einer Salzmassenkonzentration von 35/1 000) [8]. Dies erhöht den Ausbreitungsverlust bei sehr hohen Frequenzen und verursachen ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis bei großen Trennabständen. Wenn bei der Kalibrierung sehr hohe akustische Frequenzen angewendet werden, ist es erforderlich, Korrekturen für den Ausbreitungsverlust aufgrund der Schallabsorption des Wassers vorzunehmen. Die Schalldämpfung durch Absorption im Wasser ist bei den bei der Kalibrierung üblicherweise angewendeten Trennabständen relativ gering. Die Korrektur ist kleiner als 0,05 dB und kann bei Trennabständen in der Größenordnung von wenigen Meter und bei akustischen Frequenzen unter 500 kHz in Süßwasser und bei akustischen Frequenzen unter 300 kHz in Meerwasser vernachlässigt werden. Angaben über die Absorption von Schall im Wasser und deren Abhängigkeit von Temperatur, Tiefe, pH-Wert und Salzmassenkonzentration sind in der wissenschaftlichen Literatur zu finden (siehe Anhang E und Literaturhinweise [17]-[22]).

ANMERKUNG 3 Die obere Frequenzgrenze wird durch eine Anzahl von Faktoren bestimmt. Diese sind in Anhang E im Einzelnen beschrieben.

ANMERKUNG 4 Bei Frequenzen über 0,5 MHz können die in IEC 62127-2 beschriebenen alternativen primären Kalibrierverfahren angewendet werden [3].

5.8.2 Untere Frequenzgrenze

Den Beschränkungen des Kalibrierverfahrens bei niedrigen Frequenzen muss ausreichend Beachtung zukommen und der Einfluss jeglicher Beschränkungen muss bei der Bewertung der Gesamtunsicherheit berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 1 Eine der Haupteinschränkungen bei der Anwendung von tonfrequenten Schwingungsimpulsen in Prüftanks endlicher Größe ist die geringe Periodenanzahl des stationären Signals, das für die Messung zur Verfügung steht, abhängig vom Gütefaktor der Wandler und der echofreien Zeit des Prüftanks (die wiederum von der Tankgröße und der Trennung der Wandler abhängig ist.) Wenn die Frequenz verringert wird, wird die Anzahl der Perioden im verfügbaren Zeitfenster verringert, bis schließlich die Amplitude des stationären Signals mit konventionellen Mitteln nicht länger bestimmt werden kann. Dies führt bei Messungen mit tonfrequenten Schwingungsimpulsen zu einer niedrigeren Grenzfrequenz. Für die meisten großen Prüftankeinrichtungen mit einem Mindestmaß von 5 Meter oder mehr liegt die praktische untere Frequenzgrenze für die Kalibrierung von Hydrophonen in der Größenordnung von 1 kHz in Abhängigkeit vom Q -Faktor des Schallquellenwandlers, der den Anstieg und die Resonanzschärfe des Sende-Übertragungskoeffizienten bestimmt. Die Faktoren, die die niedrigste Frequenz für Kalibrierungen bestimmt, werden im Einzelnen in Anhang E beschrieben.

ANMERKUNG 2 Der vom Sender erzeugte Schalldruckpegel wird außerdem mit abnehmender Frequenz verringert und geht schließlich so weit zurück, dass er weniger als 6 dB über dem Umgebungsgeräuschpegel liegt und damit die niedrigste Frequenz für Kalibrierungen begrenzt.

ANMERKUNG 3 Bei Dauerschallsignalen in reflexionsarmen Tanks kann die Wirksamkeit der reflexionsarmen Auskleidung bei niedrigeren Frequenzen abnehmen und schränkt damit die Bedingungen zum Erreichen von Freifeldbedingungen ein.

ANMERKUNG 4 Die untere Frequenzgrenze für die Freifeldkalibrierung in nachhallenden Tanks kann durch die Anwendung modernerer Signalverarbeitungstechniken erweitert werden. Bei einigen dieser Techniken ist es nicht notwendig, über eine vollständige Signalperiode für die Amplituden- und Phasenschätzung zu verfügen. Siehe Anhang E und Anhang J zu weiteren Einzelheiten.

5.9 Überprüfungen auf akustische Interferenz

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulsen muss eine ausreichend niedrige Pulsfolgefrequenz gewählt werden, damit jeglicher Nachhall im Tank vor der Übertragung des nächsten Impulses abgeklungen ist.

Der Interferenzpegel (Störpegel) der reflektierten akustischen Signale muss mindestens 30 dB niedriger als der Signalpegel sein.

ANMERKUNG 1 Weitere Einzelheiten zum Einfluss von Reflexionen sind in Anhang E angeführt.

ANMERKUNG 2 Werden in einer grafischen Darstellung der elektrischen Übertragungsimpedanz (oder des Übertragungskoeffizienten) über der Frequenz gleichmäßige periodische Welligkeiten beobachtet, weist dies darauf hin, dass es wahrscheinlich Schallreflexionen gibt, die zu positiven und negativen Interferenzeffekten führen. Wenn Δf der Frequenzabstand aufeinanderfolgender Spitzen in der Darstellung und c die Schallgeschwindigkeit im Medium ist, dann kann die Wegdifferenz Δd zwischen den direkten und den reflektierten Signalen, die das Hydrophon erreichen, berechnet werden aus $\Delta d = c / \Delta f$ [1].

ANMERKUNG 3 Die Schwingungen, die von einem reflektierten akustischen Signal mit einer Wegdifferenz Δd verursacht werden, können durch eine komplexe gleitende Mittelung der Frequenzabhängigkeit im Frequenzintervall Δf beseitigt werden. Auf diesem Ansatz beruhen die Verfahren zur Freifeldkalibrierung in den Hallschallfeldern von Signalen mit einer im Frequenzband verteilten Leistung. Siehe Anhang J zu weiteren Einzelheiten.

6 Elektrische Messungen

6.1 Signalart

Das für die Kalibrierung verwendete elektrische Standardsignal ist entweder ein Dauerschallsignal (sinusförmig) oder tonfrequente Schwingungsimpulse (torgesteuerter tonfrequenter Schwingungsimpuls).

ANMERKUNG 1 Unabhängig von der gewählten Signalart gelten weiterhin die Anforderungen nach 5.2, 5.3 und 5.4. Es ist zu beachten, dass die Anforderungen an das Erreichen eines akustischen Freifeldes je nach verwendeter Signalart unterschiedlich sind (siehe 5.2).

ANMERKUNG 2 Andere Signalarten sind möglich, wie z. B. kurze breitbandige Impulse oder frequenzmodulierte Chirps. Die Signalanalyseverfahren für derartige Signale machen eine Spektralanalyse erforderlich, um die Signalamplitude (und -phase) als Funktion der Frequenz zu bestimmen. Erfolgt die Signalanalyse mit der Fourier-Transformation, hängt die Frequenzauflösung (in 5.7 festgelegt) von der Länge der Signalaufzeichnung ab.

6.2 Elektrische Erdung

Zur Vermeidung von Erdschleifen müssen die elektrischen Anschlüsse der Wandler vor dem Kontakt mit Wasser geschützt werden. Freiliegende Metallteile eines Hydrophons müssen die einzige Erdverbindung für die Kabelschirmung des Hydrophons und für den Hydrophonverstärker darstellen. Jeglicher sonstiger Erdkontakt ist zu vermeiden.

6.3 Messung der Ausgangsspannung des Hydrophons

6.3.1 Allgemeines

Die Leerlaufspannung des Hydrophons muss am Ende des Hydrophonkabels gemessen werden. Die ausgewählten elektrischen Anschlüsse müssen festgelegt sein (siehe IEC 60500:2017, 3.7).

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulsen (Bursts) muss die Wellenform der Hydrophonspannung digitalisiert werden, indem beispielsweise ein digitalisierendes Oszilloskop oder ein rechnergestützter Analog-Digital-Umsetzer verwendet wird.

Bei einem Dauerschallsignal muss die Messung mit einem Spannungsmessgerät mit hoher elektrischer Eingangsimpedanz oder mit einem digitalisierendem Oszilloskop oder einem rechnergestützten Analog-Digital-Umsetzer vorgenommen werden.

Wo ein Verstärker, Dämpfungsglied oder Filter in Kombination mit dem Spannungsmessgerät oder A/D-Umsetzer verwendet wird, um einen Kanal für die Absolutmessung aufzubauen, müssen diese Elemente kalibriert sein. Eine Kalibrierung ist jedoch nicht notwendig, wenn der gleiche Messkanal ausschließlich für die Messung von Spannungsverhältnissen verwendet wird, wobei in diesem Fall die Linearität des Kanals noch bestimmt werden muss. Bei der Messung von Spannungsverhältnissen müssen beide Spannungen in derselben Metrik angegeben werden (z. B. beide als Scheitelspannungen oder als Spannungseffektivwerte).

6.3.2 Signalanalyse

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen muss die Signalamplitude (und falls gefordert die Signalphase) aus der zeitgefensterten Spannungswellenform des Hydrophons bestimmt werden; dabei ist das Zeitfenster auf dem stationären Teil des echofreien Signals positioniert. Der Beginn des Zeitfensters muss auf der Wellenform so positioniert werden, nachdem alle Anlauftransienten des Senders abgeklungen sind, und das Ende des Fensters muss vor dem Eintreffen des ersten reflektierten Signals oder vor dem Ende des Direktsignals positioniert werden (je nachdem, was zuerst eintritt). Zu weiteren Anleitungen hinsichtlich der Messung von Amplitude und Phase von zeitgefensterten stationären Signalen siehe Anhang E.

6.3.3 Elektrische Belastung durch das Messgerät

Bei den Messungen muss das Hydrophon so an ein Messgerät mit einer hohen Eingangsimpedanz (Vorverstärker, Spannungsmessgerät, Oszilloskop oder A/D-Umsetzer) angeschlossen werden, dass die Eingangsimpedanz viel größer (im Idealfall mehr als das 100-Fache) als die Impedanz des Hydrophons ist.

Bei der Messung des Phasenwinkels der Hydrophon-Ausgangsspannung sollte die elektrische Eingangsimpedanz des Messgerätes im Idealfall mehr als 1 000 Mal größer als die elektrische Impedanz des Hydrophons sein.

Ist die Impedanz des Hydrophons hoch (zum Beispiel bei einem kleinen piezoelektrischen Hydrophon mit geringer Kapazität), muss die elektrische Belastung des Hydrophons durch das Messgerät berücksichtigt werden. In derartigen Fällen muss die gemessene Spannung in Bezug auf die elektrische Belastung berichtigt werden, um die Leerlaufspannung zu erhalten. Die Korrekturen können mit dem in Anhang C angegebenen Verfahren berechnet werden [2].

ANMERKUNG 1 Wenn dieselbe Last bei der Kalibrierung eines besonderen Hydrophons verwendet wird, können die Korrekturen am Übertragungskoeffizienten statt an den gemessenen Einzelspannungen durchgeführt werden.

6.3.4 Elektrische Belastung durch Verlängerungskabel

Wenn ein Verlängerungskabel mit nicht unerheblicher Länge an das Hydrophon angeschlossen ist, wird dieses Kabel das Hydrophon elektrisch belasten und die gemessene Spannung am Kabelende verringern (und damit auch den Übertragungskoeffizienten). In diesem Fall müssen Korrekturen vorgenommen werden, um die Leerlaufspannung des Hydrophons am Kabelende zu erhalten. Hinweise zur Berechnung der Korrektur der elektrischen Belastung werden in Anhang C gegeben.

ANMERKUNG 1 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), kann eine Korrektur aus den Kapazitäten des Hydrophons und des Kabels bestimmt werden. Siehe Anhang C zu weiteren Einzelheiten [23].

ANMERKUNG 2 Ist die Impedanz des Hydrophons nicht rein kapazitiv, zum Beispiel bei Frequenzen nahe der Resonanzfrequenz, wird die komplexe Impedanz des Hydrophons und der Verlängerung zur Berechnung der Lastkorrektur verwendet werden. Siehe Anhang C zu weiteren Einzelheiten [23].

ANMERKUNG 3 Wird durchweg dasselbe Verlängerungskabel während der Kalibrierung eines besonderen Hydrophons verwendet, können die Korrekturen am Übertragungskoeffizienten statt an den gemessenen Einzelspannungen durchgeführt werden.

6.3.5 Elektrischer Rauschpegel

Das Signal-Rausch-Verhältnis muss ausreichend sein, damit die Messungen ohne wesentlichen Genauigkeitsverlust durchgeführt werden können. Der gemessene Schalldruck sollte mindestens 6 dB größer als der Rauschdruck bei äquivalenter Bandbreite sein (siehe IEC 60500:2017).

ANMERKUNG 1 Der Pegel des elektrischen Rauschens kann die Genauigkeit bei elektrischen Messungen beeinträchtigen [3], [4]. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird wahrscheinlich kleiner sein, wenn die Sender mit Frequenzen weit unterhalb der Resonanzfrequenz betrieben werden.

ANMERKUNG 2 Der breitbandige Störgeräuschpegel kann durch die Verwendung eines Bandpasses verringert werden. Die Bandbreite muss jedoch genügend breit sein, damit das Signal ohne Verzerrung hindurchgelassen wird.

ANMERKUNG 3 Bei Anwesenheit von elektrischem Rauschen kann der Rauschabstand verbessert werden, indem sich wiederholende Signale kohärent gemittelt werden. Bei weißem Rauschen verbessert die Mittelung von N Signalen den Rauschabstand um den Faktor der Quadratwurzel aus $\sqrt{N}$.

6.3.6 Übersprechen

Bei kohärenter Interferenz aus elektrischem Übersprechen führen Signalmittelung und Schmalbandfilterung im Allgemeinen nicht zu einer Verbesserung der Genauigkeit. In derartigen Fällen sind deshalb Anstrengungen zu unternehmen, um die Ursache des Problems zu ermitteln und Vorkehrungen zu treffen, um die Auswirkungen durch geeignete elektrische Erdung, z. B. der Kabel für die Senderansteuerung, auf ein Mindestmaß zu senken.

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

Bei Übersprechen mit tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen wird die Interferenz nur verursacht, wenn die Länge des Schwingungsimpulses größer als die Verzögerung der akustischen Ausbreitung ist. Wenn sich das Übersprechen nicht durch eine geeignete elektrische Erdung beseitigen lässt, dann muss die Länge der Schwingungsimpulse soweit verringert werden, dass es nicht zu einer zeitlichen Überschneidung mit dem akustischen Signal kommt.

ANMERKUNG Bei Schwingungsimpulssignalen kann die Wirkung der Störung auch deutlich durch Signalsubtraktion verringert werden. Dies erfolgt durch Anpassung einer Annäherung an das Übersprechsignal bei der Frequenz des Ansteuersignals in dem Bereich, bevor das akustische Signal eintrifft, fortgesetzt für die Dauer der Überschneidung des gesendeten Signals mit dem akustischen Signal und anschließender Subtraktion vom Gesamtsignal im Bereich der Überschneidung. Die Auswirkung des Übersprechens kann auch durch Beobachtung der Signaländerung bestimmt werden, wenn der Abstand zwischen dem Sender und dem Empfänger um einen vorher festgelegten Betrag verändert wird (z. B. um die Hälfte der akustischen Wellenlänge).

6.3.7 Eingebaute Vorverstärker

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

ANMERKUNG Besitzt ein Hydrophon einen eingebauten Vorverstärker, sind Lastkorrekturen infolge von Verlängerungskabeln oder Messgeräten nicht erforderlich [23].

6.4 Messung des Ansteuerstroms des Senders

6.4.1 Prüfausrüstung

Der Strom durch den Sender muss mit einem kalibrierten Stromwandler (der eine Spannung proportional zum Ansteuerstrom erzeugt) bestimmt werden.

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulsen muss die Spannungswellenform des Stromwandlers digitalisiert werden, indem beispielsweise ein digitalisierendes Oszilloskop oder ein rechnergestützter Analog-Digital-Umsetzer verwendet wird.

Bei einem Dauerschallsignal muss die Spannung des Stromwandlers mit einem Spannungsmessgerät mit hoher elektrischer Eingangsimpedanz oder mit einem digitalisierendem Oszilloskop oder einem rechnergestützten Analog-Digital-Umsetzer gemessen werden.

Wo ein Verstärker, Dämpfungsglied oder Filter in Kombination mit dem Spannungsmessgerät oder Digitalisierer verwendet wird, um einen Kanal für die Absolutmessung aufzubauen, müssen diese Elemente kalibriert sein, sofern nicht der gleiche Messkanal ausschließlich für die Messung von Spannungsverhältnissen verwendet wird.

ANMERKUNG Obwohl der Stromwandler die bevorzugte Messausrüstung ist, besteht ein alternatives Verfahren darin, den Spannungsfall über einem klein bemessenen kalibrierten Widerstand (von einigen wenigen Ohm) zu messen, der in Reihe mit dem Sender liegt.

6.4.2 Signalanalyse

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen muss die Signalamplitude (und falls gefordert die Signalphase) aus der zeitgefensterten Spannungswellenform des Stromwandlers bestimmt werden; dabei ist das Zeitfenster auf dem stationären Teil des echofreien Signals positioniert.

Der Beginn und das Ende des Zeitfensters müssen auf der Wellenform an den gleichen Stellen positioniert werden, wie sie für die Hydrophonspannung ausgewählt wurden (siehe 6.3.2).

6.5 Messung der Anregungsspannung des Senders

6.5.1 Prüfausrüstung

Die Anregungsspannung über dem Sender muss bestimmt werden mit einem kalibrierten Tastkopf mit hoher Impedanz oder einem kalibrierten Abschwächer, um die Anregungsspannung um bis zu 40 dB zu verringern, damit sie mit dem Digitalisierer gemessen werden kann.

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulsen (Bursts) muss die Spannungsform am Ausgang des Tastkopfes oder kalibrierten Abschwächers digitalisiert werden, indem beispielsweise ein digitalisierendes Oszilloskop oder ein rechnergestützter Analog-Digital-Umsetzer verwendet wird.

Bei einem Dauerschallsignal muss die Spannung am Ausgang des Tastkopfes oder eines kalibrierten Abschwächers mit einem Spannungsmessgerät mit hoher elektrischer Eingangsimpedanz oder mit einem digitalisierendem Oszilloskop oder einem rechnergestützten Analog-Digital-Umsetzer gemessen werden.

Wo ein Verstärker, Dämpfungsglied oder Filter in Kombination mit dem Spannungsmessgerät oder Digitalisierer verwendet wird, um einen Messkanal aufzubauen, müssen diese Elemente kalibriert sein, sofern nicht der gleiche Messkanal ausschließlich für die Messung von Spannungsverhältnissen verwendet wird.

6.5.2 Signalanalyse

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen muss die Signalamplitude (und falls gefordert die Signalphase) aus der zeitgefensterten Spannungswellenform am Ausgang des Tastkopfes oder kalibrierten Abschwächers bestimmt werden; dabei ist das Zeitfenster auf dem stationären Teil des echofreien Signals positioniert.

Der Beginn und das Ende des Zeitfensters müssen auf der Wellenform an den gleichen Stellen positioniert werden, wie sie für die Hydrophonspannung ausgewählt wurden (siehe 6.3.2).

7 Vorbereitung und Konditionierung der Wandler

7.1 Eintauchen

Der Wandler muss vor der Kalibrierung für eine ausreichend kurze Dauer eingetaucht werden, um einen Temperaturangleich mit dem Wasser zu ermöglichen.

ANMERKUNG Wo die Lufttemperatur, bei der der Wandler gelagert und vorbereitet wird nahezu der Wassertemperatur entspricht (wie es bei einem Innenraum-Prüftank der Fall wäre) braucht die Eintauchdauer nur wenige Minuten zu betragen. In Fällen, in denen die Wassertemperatur jedoch deutlich unter der Lufttemperatur im Laboratorium liegt (wie es bei einer Freiwasseranlage unter Winterbedingungen der Fall sein kann), wird eine Eintauchdauer von mindestens 30 Minuten empfohlen.

7.2 Befeuchten

Vor dem Eintauchen in das Wasser muss auf die gesamte Oberfläche des Wandlers ein Netzmittel, z. B. ein mildes Reinigungsmittel, aufgetragen werden. Wenn der Wandler in Wasser eingetaucht und dann wieder schnell herausgenommen wird, dürfen keine trockenen Flecken auf ihm sichtbar sein [24].

ANMERKUNG 1 Das Ziel der Befeuchtung des Wandlers ist es, die Auswirkungen von Gasblasen oder eingefangener Luft, die an seiner Oberfläche haften, abzuschwächen. Eingefangene Luft und Blasen sind der Grund für eine erhebliche Streuung von Schallwellen und können sich stark resonant verhalten und zu unvorhersehbaren Fehlern bei der Kalibrierung führen. Die Anwendung eines Reinigungsmittels als Netzmittel verringert die Oberflächenspannung des Wassers und behindert das Anhaften von Blasen an der Oberfläche.

ANMERKUNG 2 Die Anwesenheit von eingefangener Luft kann sich manchmal wie eine Luftschicht zeigen, die als silberner Glanz auf der Oberfläche des Wandlers erscheint. Alle Vertiefungen auf dem Gehäuse des Wandlers (z. B. in der Nähe von Dichtungen oder Verschraubungen) können Luftblasen einfangen. In Fällen, in denen eingefangene Luft oder Blasen sichtbar sind, kann das Reinigungsmittel mehrfach angewendet werden.

ANMERKUNG 3 Der Vorgang des Anhaftens von Luftblasen an der Oberfläche des Wandlers wird deutlicher, wenn warme Wandler in kaltes Wasser getaucht werden, weil die warmen Wandler eine leichte Wärmewirkung auf das kältere Wasser haben, was dazu führt, das gelöste Gas aus der Lösung austritt (Luft ist in warmem Wasser weniger löslich als in kaltem).

7.3 Verlängerung des Hydrophonkabels

Wenn es notwendig ist, das Kabel zum Hydrophon für die Zwecke der Kalibrierung zu verlängern (beispielsweise um die entsprechenden Ausrüstungen zu erreichen), dann muss die Anleitung in 6.3.4 befolgt werden.

ANMERKUNG Eine Beschreibung, wie der Einfluss des Verlängerungskabels zu berücksichtigen ist, ist in Anhang C angegeben [23].

7.4 Umgebungsbedingungen (Temperatur und Tiefe)

Wird der Übertragungskoeffizient eines Wandlers für bestimmte Bedingungen der Wassertemperatur und der Eintauchtiefe gefordert, muss der Wandler entweder:

- i. unter denselben Bedingungen von Temperatur und Druck kalibriert werden, bei denen er eingesetzt wird, oder
- ii. es sind Korrekturen an seinen Werten des Übertragungskoeffizienten vorzunehmen, um die anderen Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen, wobei diese Korrekturen auf vorherigen Kalibrierungen in Abhängigkeit von der Temperatur oder Tiefe beruhen oder durch Anwendung validierter Analysenmodelle.

ANMERKUNG 1 Der Übertragungskoeffizient einiger elektroakustischer Wandler kann sich mit der Umgebungstemperatur und mit der Eintauchtiefe (letztenannte aufgrund des erhöhten hydrostatischen Drucks) verändern [25], [26]. Die Befähigung zur Durchführung von Kalibrierungen in einem bestimmten Wertebereich von Temperatur und Tiefe ist relativ selten und macht spezielle Einrichtungen erforderlich [25], [26].

ANMERKUNG 2 Die Umgebungsbedingungen, die in einem Innenraum-Prüftank vorliegen, können wahrscheinlich nicht die Bedingungen im Ozean (z. B. Wassertemperatur oder -tiefe) reproduzieren. Kalibrierungen sind grundsätzlich nur für die Bedingungen gültig, die während der Kalibrierung herrschen. Wenn eine Schätzung des Betriebsverhaltens unter Meeresbedingungen gefordert wird, kann der bei der Kalibrierung im Tank erhaltene Übertragungskoeffizient korrigiert werden (mit einer geeigneten hinzugefügten Unsicherheitskomponente, um die Unsicherheit in der Korrektur erkennbar zu machen) [25], [26].

ANMERKUNG 3 Bei Messungen in Freiwasseranlagen sind die Umgebungsbedingungen (Wassertemperatur oder -tiefe) (im Allgemeinen) nicht die gleichen, wie bei der vorgesehenen Endanwendung. Wenn eine Schätzung des Betriebsverhaltens unter den Bedingungen gefordert wird, die bei der vorgesehenen Endanwendung herrschen, kann der bei der Kalibrierung in der Freiwassereinrichtung erhaltene Übertragungskoeffizient korrigiert werden (mit einer geeigneten hinzugefügten Unsicherheitskomponente, um die Unsicherheit in der Korrektur erkennbar zu machen) [25], [27].

8 Reziprozitätskalibrierung mit drei Wandlern im Freifeld mit Kugelwellen

8.1 Allgemeine Grundsätze

Für dieses Kalibrierverfahren müssen mindestens drei Wandler (die Wandler-Dreiergruppe) verwendet werden, von denen mindestens einer ein reziproker Wandler sein muss. Aus Gründen der Übersichtlichkeit müssen die drei Geräte mit P (Sender), H (Hydrophon) und T (reziproker Wandler) gekennzeichnet werden.

Die Geräte müssen in drei Messkonfigurationen paarweise gekoppelt werden, wie es in Bild 1 dargestellt ist. Wenn der Sender P auch ein reziproker Wandler ist, dann muss auch die vierte Konfiguration, die ebenfalls in Bild 1 dargestellt ist, angewendet werden.

Für jede Messkonfiguration muss das Wandlerpaar im Wasser getrennt durch einen bekannten Abstand d positioniert und ihre Achsen zueinander ausgerichtet werden (8.2.1, 8.2.2).

Für alle Konfigurationen müssen die Anforderungen an die akustischen Freifeldbedingungen (5.2), Fernfeldbedingungen (5.3) und stationären Bedingungen (5.4) erfüllt sein.

In jedem Fall muss mit einem Gerät als Sender und dem anderen als Hydrophon die elektrische Übertragungsimpedanz bei einer bestimmten Anzahl von Frequenzen in dem zu untersuchenden Frequenzbereich bestimmt werden (8.2.4).

Mit Anwendung mindestens der ersten drei Konfigurationen der Wandlerpaare wird der Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizient und der Sende-Stromübertragungskoeffizient von jedem der drei Geräte bei jeder Kalibrierfrequenz aus den Messungen rein elektrischer Größen (Übertragungsimpedanzen), dem Trennabstand sowie der Wasserdichte und der akustischen Frequenz berechnet. (8.2.5) (8.2.6)

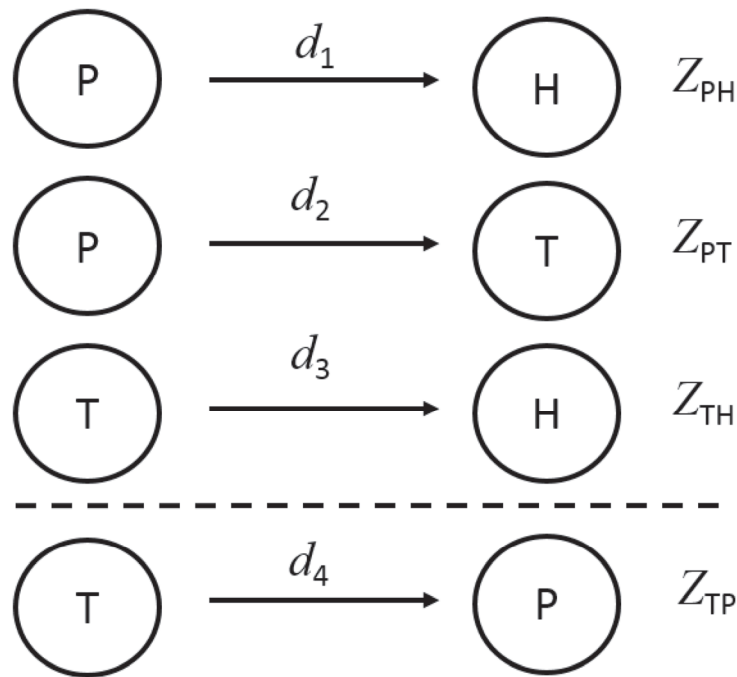


Bild 1 – Messkonfigurationen für die Drei-Wandler-Reziprozität (Crown copyright, 2018)

Wenn der Sender P auch ein reziproker Wandler ist, dann kann die Messung der vierten elektrischen Übertragungsimpedanz (siehe Bild 1) dazu verwendet werden, die Gültigkeit der Annahme des reziproken Verhaltens (8.2.8) zu bestimmen.

ANMERKUNG 1 Es gibt eine Reihe von Kalibrierkonfigurationen nach dem Prinzip der akustischen Reziprozität. [28]-[32] Die hier gegebene Beschreibung des Reziprozitätskalibrierverfahrens gilt ausschließlich für die Drei-Wandler-Reziprozität mit Kugelwellen. Das Reziprozitätsverfahren kann für weitere Konfigurationen angewendet werden, bei denen andere akustische Schallgeometrien, wie ebene Wellen oder Zylinderwellen verwendet werden, und es kann für Druckkalibrierungen angewendet werden, die innerhalb einer Druckkammer durchgeführt werden [1], [3], [33]-[36]. Eine Selbstreziprozitätskalibrierung kann auch mit einem Reflektor durchgeführt werden, der eine spiegelnde akustische Reflexion liefert. [2], [37]-[39]. Obwohl das Prinzip ähnlich ist, führt die abweichende akustische Übertragungsimpedanz zwischen Schallquelle und Empfänger in jedem Fall zu einer anderen Gleichung zur Berechnung der Übertragungskoeffizienten der Geräte.

ANMERKUNG 2 Dieses Verfahren ist ein primäres Kalibrierverfahren und ist nicht auf die Verwendung eines anderen akustischen Bezugswandlers angewiesen. Die akustischen Kalibrierungen sind auf Primärnormale der elektrischen Messung, der Längenmessung und der Frequenzmessung rückführbar.

ANMERKUNG 3 Jede Messkonfiguration erfordert die Positionierung eines Wandlerpaares in Wasser. Dies wird oft mit zwei Positioniergestellen oder Halterungen zur Ausrichtung erreicht, und die Empfänger werden in der Reihenfolge nach Bild 1 gekoppelt. Es ist aber auch möglich, alle drei gleichzeitig im Prüftank zu positionieren. Eine Anordnung ist eine kollineare Konfiguration (siehe Bild 2). Alternativ können die Wandler in einer dreieckigen geometrischen Konfiguration (typischerweise in einem gleichseitigen Dreieck) positioniert werden. Bei Anordnungen, bei denen alle Geräte gleichzeitig eingetaucht werden, müssen die Wandler drehbar sein, damit ihre Bezugsrichtungen vor der Messung jeder Übertragungsimpedanz ausgerichtet werden können. Es ist zu beachten, dass bei gleichzeitigem Eintauchen von drei Geräten die Möglichkeit besteht, dass Streuschall an einem Gerät verursacht wird, der während der Messungen mit den beiden anderen Geräten akustische Interferenzen verursacht. In derartigen Fällen wird das nicht verwendete Gerät bei der Messung der elektrischen Übertragungsimpedanzen zwischen den beiden anderen Geräten aus dem Wasser genommen.

8.2 Kalibrierung für die Bestimmung des Betrags des Übertragungskoeffizienten (ohne Phase)

8.2.1 Anforderungen an das akustische Feld

Für alle Messungen müssen die Anforderungen an die akustischen Freifeldbedingungen (5.2), Fernfeldbedingungen (5.3) und stationären Bedingungen (5.4) erfüllt sein.

8.2.2 Trennabstand

Der Abstand zwischen dem Sender und dem Hydrophon muss nach den Anforderungen von 5.6.5 bestimmt und gemessen werden.

Bei der Auswahl des Trennabstandes müssen die Anforderungen der akustischen Freifeldbedingungen (5.2) und der akustischen Fernfeldbedingungen (5.3) erfüllt werden.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, dass jede wiederholte Kalibrierung mit einem anderen Trennabstand durchgeführt wird (8.2.7).

ANMERKUNG 2 Zur Vereinfachung werden die Trennabstände zwischen den Geräten für jede Stufe der in Bild 1 dargestellten Messungen manchmal als identisch gewählt, aber dies ist nicht notwendig.

8.2.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandlers

Vor Beginn der Messungen müssen die Anforderungen an das Eintauchen (7.1) und Befeuchten (7.2) der Wandler erfüllt sein.

Bei jeder Messung der elektrischen Übergangsimpedanz müssen die Anforderungen an die Befestigung (5.6.3) und die Ausrichtung (5.6.4) des Wandlers erfüllt sein.

8.2.4 Signalart

Die Signalart muss nach 6.1 ausgewählt werden.

8.2.5 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz

Für jede in Bild 1 dargestellte Messkonfiguration muss bei jeder akustischen Frequenz die elektrische Übertragungsimpedanz durch Messen der Hydrophonspannung nach 6.3 und des Ansteuerstroms des Senders nach 6.4 bestimmt werden. Spannungen und Ströme müssen in derselben Metrik angegeben werden (z. B. beide als Scheitelwerte oder als Effektivwerte).

ANMERKUNG 1 Für höchste Genauigkeit kann der Ansteuerstrom des Senders mit demselben Messkanal wie die Hydrophonspannung gemessen werden (der Messkanal besteht aus einem Verstärker, einem Filter und einem A/D-Umsetzer). In diesem Fall machen die im Messkanal verwendeten Ausrüstungen keine absolute Kalibrierung erforderlich, weil nur die Verhältnisse elektrischer Größen gefordert sind.

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 Wenn sehr hohe akustische Frequenzen angewendet werden, wird jede elektrische Übertragungsimpedanz für die Dämpfung aufgrund der Schallabsorption des Wassers korrigiert. Weitere Einzelheiten sind in 5.8.1 und Anhang E angegeben.

8.2.6 Berechnung des Empfangs-Übertragungskoeffizienten

Der Betrag des Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizienten M_H des Hydrophones muss bei jeder akustischen Frequenz mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$|M_H| = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}||Z_{TH}|}{|Z_{PT}|}} \quad (11)$$

Der Betrag des Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizienten M_T des reziproken Wandlers muss bei jeder akustischen Frequenz mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$|M_T| = \sqrt{\frac{2d_2d_3}{\rho f d_1} \frac{|Z_{PT}||Z_{TH}|}{|Z_{PH}|}} \quad (12)$$

Wenn der Sender reziprok ist, muss sein Betrag des Freifeldübertragungskoeffizienten aus dem Verhältnis nach Gleichung (12) berechnet werden, wobei der Index PT durch TP und der Abstand d_2 durch d_4 ersetzt werden.

ANMERKUNG 1 Ist der Sender nichtreziprok, dann besitzt sein berechneter Empfangs-Übertragungskoeffizient keine physikalische Bedeutung.

8.2.7 Berechnung der Sende-Übertragungskoeffizienten

Der Betrag des Sende-Stromübertragungskoeffizienten S_{LP} des Senders muss bei jeder akustischen Frequenz mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$|S_{LP}| = \sqrt{\frac{\rho f d_1 d_2}{2 d_3} \frac{|Z_{PH}||Z_{TT}|}{|Z_{TH}|}} \quad (13)$$

Der Sende-Stromübertragungskoeffizient S_{LT} des Wandlers (T) muss berechnet werden mit:

$$|S_{LT}| = \sqrt{\frac{\rho f d_2 d_3}{2 d_1} \frac{|Z_{PT}||Z_{TH}|}{|Z_{PH}|}} \quad (14)$$

Fall gefordert muss der Sende-Spannungsübertragungskoeffizient (S_V) des Senders oder Wandlers berechnet werden mit:

$$S_V = \frac{S_I}{Z_P} \quad (15)$$

Dabei ist Z_P die gemessene elektrische Impedanz des Gerätes (siehe Anhang B).

Wenn das Hydrophon H reziprok ist, dann muss der Betrag seines Sende-Stromübertragungskoeffizienten $|S|_H$ nach Gleichung (14) berechnet werden, dabei wird $|Z|_{PH}$ ersetzt durch $|Z|_{PT}$, $|Z|_{PT}$ wird ersetzt durch $|Z|_{PH}$ und der Abstand d_2 wird ersetzt durch d_4 .

ANMERKUNG Wenn der Wandler nicht als Schallquelle verwendet werden kann, dann hat der Sende-Übertragungskoeffizient keine physikalische Bedeutung. Ein Beispiel ist ein Hydrophon mit eingebautem Vorverstärker, der dessen Verwendung als Sender ausschließt.

8.2.8 Wiederholpräzision

Die Kalibrierung muss mehrere Male wiederholt werden und der Mittelwert der Ergebnisse bei jeder Frequenz muss als Endwert für den Übertragungskoeffizienten verwendet werden. Die wiederholten Kalibrierungen müssen wirklich unabhängig sein, wobei die Wandler zwischen jeder Kalibrierung aus dem Wasser herausgenommen und wieder eingesetzt werden.

Die Standardabweichung muss bestimmt und bei der Berechnung der Messunsicherheiten verwendet werden, siehe Anhang F.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, mindestens vier Wiederholungsmessungen durchzuführen.

ANMERKUNG 2 Wenn für einige der wiederholten Kalibrierungen ein unterschiedlicher Trennabstand verwendet wird, ist dies bei der Bewertung einiger Annahmen in dem Verfahren (Freifeldbedingungen, Kugelwellenfeld usw.) hilfreich, weil der Übertragungskoeffizient für Kugelwellen unter Freifeldbedingungen in Abhängigkeit vom Trennabstand unverändert bleibt (allerdings mit Korrekturen aufgrund der Absorption des Wassers bei hohen Frequenzen).

ANMERKUNG 3 Eine mangelhafte Wiederholpräzision weist auf ein Problem bei der Kalibrierung hin. Die Gründe können ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, das Vorhandensein von akustischen Reflexionen, mangelnde Präzision bei Positionierung und Ausrichtung, schlechte zeitliche Stabilität des Leistungsverhaltens der akustischen Wandler oder der Prüfausrüstung sein. Mit Sorgfalt ist es möglich, Standardabweichungen von bis zu 1 % für Hydrophone über ihren Betriebsbereich zu erreichen.

8.2.9 Überprüfungen

8.2.9.1 Überprüfung der Reziprozität

Die Annahme, dass mindestens ein Wandler reziprok ist, muss überprüft werden.

Die Reziprozität eines Paares reziproker Wandler muss durch Vergleich der Beträge der Übertragungsimpedanzen überprüft werden, 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) [3], [4], [40].

Wenn große Abweichungen zwischen $|Z|_{PT}$ und $|Z|_{TP}$ auftreten, dann kann das seine Ursache darin haben, dass ein (oder beide) Wandler zu hart angesteuert werden und nichtlineares Verhalten die Folge ist. In diesem Fall muss die Amplitude des Ansteuersignals für die Wandler verringert und die Überprüfung der Übertragungsimpedanz wiederholt werden. Führt eine derartige Verringerung des Ansteuersignals jedoch zu einem nichtannehmbar geringen Signal-Rausch-Verhältnis, muss die Verwendung alternativer Wandler in Betracht gezogen werden.

Um bei der Reziprozitätskalibrierung die geringste Messunsicherheit zu erreichen, sollten die reziproken Wandler innerhalb ihres normalen Betriebsbands (typischerweise bis zur 0,7-fachen Frequenz zur ersten Resonanzfrequenz bei einem piezoelektrischen Wandler) verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Es ist nicht möglich, zu bestimmen, ob ein Wandler reziprok ist, ohne ihn in Kombination mit einem anderen Wandler zu verwenden. Die oben beschriebene Prüfung liefert einen guten Hinweis darauf, dass ein Paar von Wandlern reziprok ist.

ANMERKUNG 2 Bei guten Wandlern, die innerhalb ihres Betriebsfrequenzbereichs eingesetzt werden, ist es möglich, eine Übereinstimmung zwischen den elektrischen Übertragungsimpedanzen von besser als 3 % zu erreichen.

ANMERKUNG 3 Eine Abweichung von mehr als 10 % 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 nichtreziproke Wandler nur als Sender oder Hydrophon (je nach Zweckmäßigkeit), jedoch nicht als der Wandler T verwendet werden.

ANMERKUNG 4 Die Verwendung eines Wandlers bei Frequenzen außerhalb seines linearen Dynamikbereiches oder Betriebsfrequenzbereichs (z. B. bei Frequenzen, die viel höher als die Resonanzfrequenz sind) kann zu einem nichtreziproken Verhalten und einer Verschlechterung der Genauigkeit der Kalibrierung führen. Die Kalibrierung eines Hydrophons über einen breiten Frequenzbereich kann den Einsatz mehrerer verschiedener reziproker Wandler erfordern, um den gesamten Bereich mit einer ausreichend geringen Messunsicherheit zu erfassen.

ANMERKUNG 5 Wenn die Wandler bei der Überprüfung der Reziprozität in ihrem Aufbau identisch sind, können sie im selben Maße nichtlinear sein und noch reziprok erscheinen. Deshalb wird die Überprüfung der Reziprozität im Idealfall mit Wandlern eines anderen Modells, andern Maßen oder anderem Aufbau durchgeführt.

ANMERKUNG 6 Es kann eine bessere statistische Genauigkeit aus der Kalibrierung erhalten werden, wenn mehr als ein Wandler reziprok ist. Wenn der Sender auch als ein Hydrophon eingesetzt werden kann, dann kann der Übertragungskoeffizient des Hydrophons M_H auf zwei Wegen bestimmt werden: entweder mit $|Z|_{PT}$ oder $|Z|_{TP}$ im Nenner der Gleichung (11). Die Messunsicherheit des Mittelwertes der zwei Werte des Übertragungskoeffizienten kann geringer als die jedes Einzelwerts.

ANMERKUNG 7 Wird die Kalibrierung mit mehr als drei Wandlern durchgeführt und sind zwei oder mehr reziprok, wird die Messunsicherheit verringert, 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.

8.2.9.2 Überprüfung der Kugelwellencharakteristik

Die Abweichung vom angenommen Kugelwellenfeld muss sorgfältig beachtet und der Einfluss jeglicher Abweichung bei der Bewertung der Gesamtunsicherheit berücksichtigt werden.

ANMERKUNG Das Vorhandensein eines sich kugelförmig ausbreitenden Schallfelds kann durch Vergleich der Beträge der elektrischen Übertragungsimpedanzen bei sich änderndem Abstand zwischen Sender und Hydrophon überprüft werden. Siehe Anhang E. 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:

$$|Z_{PH}| d = \text{constant} \quad (16)$$

ANMERKUNG 2 Bei idealen Bedingungen sollte es möglich sein, eine Abweichung von weniger als $\pm 2\%$ zu erreichen. Änderungen von mehr als $\pm 5\%$ können auf weitere Probleme hinweisen (z. B. auf Reflexionen an den Begrenzungen) und sollten näher untersucht werden. In derartigen Fällen sind weitere Untersuchungen zur Ermittlung der Ursache zu führen.

ANMERKUNG 3 Beim Betrieb mit Frequenzen von einigen hundert Kilohertz sind Korrekturen der elektrischen Übertragungsimpedanz erforderlich, um die Absorption von Schall durch Wasser zu berücksichtigen (siehe 5.8.1 und Anhang E).

8.2.9.3 Überprüfung der Linearität

Das gemessene Signal muss auf Verzerrungen während der Kalibrierungen überprüft werden. Wenn irgend ein 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 einer bestimmten Frequenz überprüft werden. Bei einem Pegel beginnend, der 6 dB höher als der Grundrauschpegel ist, bis zum höchsten verwendeten Pegel muss der Betrag der Übertragungsimpedanz innerhalb von $\pm 5\%$ konstant bleiben.

ANMERKUNG 1 Verzerrungen können sich durch das Vorhandensein höherer Harmonischer im Signal zeigen, die bei der Überprüfung der Spektralpegel offensichtlich werden. Im Idealfall sind die Amplituden aller Harmonischen um mehr als 10 dB geringer als die Amplitude der Grundschwingung.

ANMERKUNG 2 Es ist darauf zu achten, 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.

8.2.9.4 Aufnahme von kalibrierten Bezugswandlern in die Wandler-Dreiergruppe

Wenn ein oder mehr der bei der Kalibrierung verwendeten Wandler Bezugswandler mit einem aus vorherigen Kalibrierungen bekannten Übertragungskoeffizienten sind, liefert eine gute Übereinstimmung bei den Bezugs-

geräten mit den bekannten Werten der Übertragungskoeffizienten ein zusätzliches Vertrauen in die Ergebnisse für den zu prüfenden Wandler.

ANMERKUNG Bei einer Reziprozitätskalibrierung werden für alle drei in der Dreiergruppe verwendeten Wandler absolute Übertragungskoeffizienten ermittelt. Bei der Kalibrierung eines weiteren Wandlers ist es nicht erforderlich, sich auf den Übertragungskoeffizienten eines Wandlers zu stützen. Wenn das Ziel der Kalibrierung jedoch darin besteht, den Übertragungskoeffizienten eines bestimmten Wandlers mit unbekanntem Leistungsverhalten abzuleiten, kann die Verwendung von kalibrierten Bezugswandlern als die anderen Geräte in der Wandler-Dreiergruppe eine zusätzliche Überprüfung der Genauigkeit der Ergebnisse für die zu prüfenden Wandler ermöglichen (Stabilität bei den Bezugswandlern vorausgesetzt).

8.2.10 Messunsicherheit

Bei sorgfältiger Durchführung und in Übereinstimmung mit den vorstehend genannten Verfahren muss die erweiterte Messunsicherheit (95 % Vertrauensniveau) im Bereich von 4 % bis 10 % liegen.

ANMERKUNG 1 Die Bewertung der Messunsicherheit für das Freifeld-Reziprozitätskalibrierverfahren umfasst viele Komponenten (zu Einzelheiten siehe Anhang F) [40]-[43].

8.3 Kalibrierung zur Bestimmung des Phasenwinkels des Hydrophon-Übertragungskoeffizienten

8.3.1 Allgemeine Grundsätze

Für die Bestimmung des Phasenwinkels des Hydrophon-Übertragungskoeffizienten muss die angewendete Messkonfiguration die in Bild 2 dargestellte kollineare Anordnung sein [44]-[46]. Diese Anordnung ist dafür ausgelegt, Phasenfehler aufgrund von Positionierfehlern auf ein Mindestmaß zu senken. In dieser Anordnung werden die drei Wandler P, H und T auf einer Geraden bei Anordnung von H zwischen P und T derart befestigt, dass $d_2 = d_1 + d_3$.

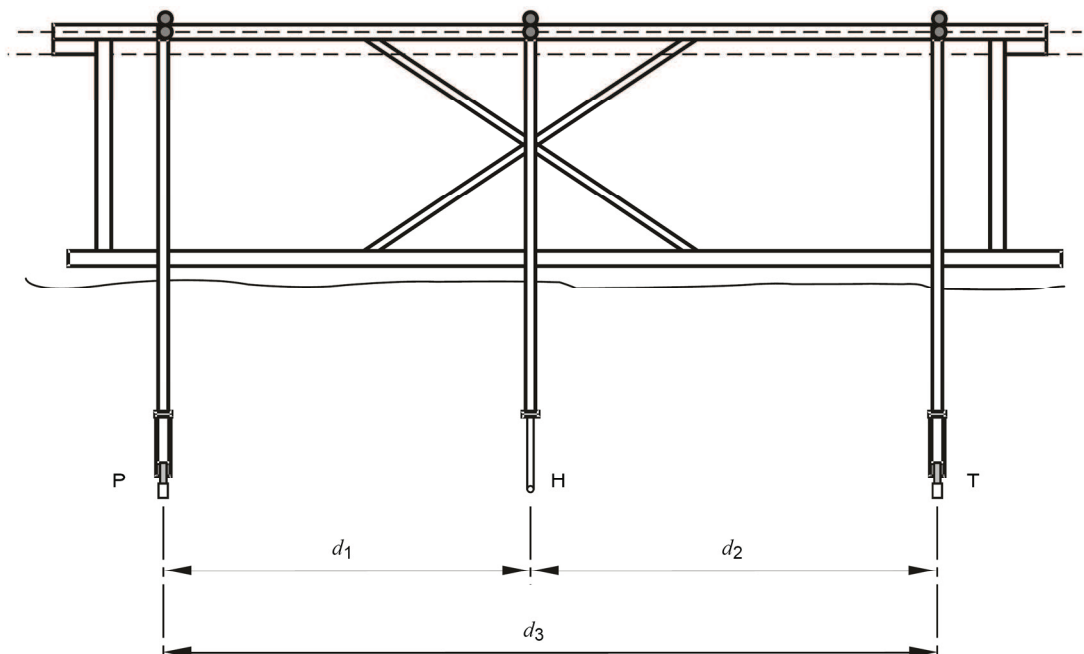


Bild 2 – Messgestell zur Anbringung der drei Wandler in einer Reihe: eines Senders P, eines reziproken Wandlers T und eines zu kalibrierenden Hydrophons H

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 so auszurichten, dass P auf H und T zeigt. Die komplexe elektrische Übertragungsimpedanz Z_{PH} ist aus dem Eingangsstrom in P und der Ausgangsspannung von H zu bestimmen.

Das Hydrophon und dessen Halterung sind aus dem Gestell zu nehmen. Die komplexe elektrische Übertragungsimpedanz Z_{PT} muss aus dem Eingangsstrom in P und der Ausgangsspannung von T bestimmt werden.

Das Hydrophon und seine Halterung sind wieder in das Gestell einzusetzen und um sein Bezugszentrum zu drehen, so dass T nun in Richtung H weist und der Abstand d_3 zwischen den Bezugszentren von H und T beibehalten wird. Die komplexe elektrische Übertragungsimpedanz Z_{TH} ist aus dem Eingangsstrom in T und der Ausgangsspannung von H zu bestimmen.

Der Betrag und der Phasenwinkel des Freifeldübertragungskoeffizienten des Hydrophons sind nach den Anweisungen in 8.3.6 mit den gemessenen elektrischen Übertragungsimpedanzen zu berechnen [44]-[46].

ANMERKUNG 1 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°.

ANMERKUNG 2 Der bestimmte Übertragungskoeffizient ist sowohl für das Hydrophon als auch für seine Aufhängung repräsentativ.

ANMERKUNG 3 Die Kalibrierung sollte mit derselben Aufhängung durchgeführt werden, mit der das Hydrophon bei Feldmessungen angebracht wird.

8.3.2 Vorbereitung der Wandler

Vor Beginn der Messungen müssen die Anforderungen an das Eintauchen (7.1) und Befeuchten (7.2) der Wandler erfüllt sein.

8.3.3 Anforderungen an das akustische Feld

Für alle Messungen müssen die Anforderungen an die akustischen Freifeldbedingungen (5.2), Fernfeldbedingungen (5.3) und stationären Bedingungen (5.4) erfüllt sein.

8.3.4 Signalart

Die Signalart muss 6.1 entsprechen.

8.3.5 Befestigung und Ausrichtung des Wandlers

Der Abstand zwischen dem Sender und dem Hydrophon muss nach den Anforderungen von 5.6.5 bestimmt und gemessen werden.

Bei der Auswahl des Trennabstandes müssen die Anforderungen der akustischen Freifeldbedingungen (5.2) und der akustischen Fernfeldbedingungen (5.3) erfüllt werden.

8.3.6 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz

Für jede in Bild 1 dargestellte Messkonfiguration muss bei jeder akustischen Frequenz die komplexe elektrische Übertragungsimpedanz durch Messen der Hydrophonspannung nach 6.3 und des Ansteuerstroms des Senders nach 6.4 bestimmt werden.

Jede komplexe elektrische Übertragungsimpedanz (z. B. Z_{PH}) muss gemessen (siehe 3.2) und berechnet werden aus:

$$Z_{PH} = \frac{\Re(U_H(t))}{\Re(I_P(t))} \quad (17)$$

ANMERKUNG 1 Für höchste Genauigkeit kann der Ansteuerstrom des Senders durch denselben Messkanal wie die Hydrophonspannung gemessen werden (der Messkanal kann aus einem Verstärker, Filter und A/D-Umsetzer bestehen). In diesem Fall machen die im Messkanal verwendeten Ausrüstungen keine absolute Kalibrierung erforderlich, weil nur die Verhältnisse elektrischer Größen gefordert sind.

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 Wenn sehr hohe akustische Frequenzen angewendet werden, kann jede elektrische Übertragungsimpedanz für die Dämpfung aufgrund der Schallabsorption des Wassers korrigiert werden. Weitere Einzelheiten sind in 5.8.1 und Anhang E angegeben.

8.3.7 Berechnung des Phasenwinkels des Übertragungskoeffizienten

Der komplexe Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizienten M_H des Hydrophones muss bei jeder akustischen Frequenz mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\underline{M}_H = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{j\rho f d_2} \frac{Z_{PH}Z_{TH}}{Z_{PT}}} \quad (18)$$

Der Betrag des Übertragungskoeffizienten $|\underline{M}_H|$ kann berechnet werden aus:

$$|\underline{M}_H| = \sqrt{\frac{2d_1d_3}{\rho f d_2} \frac{|Z_{PH}||Z_{TH}|}{|Z_{PT}|}} \quad (19)$$

Der Phasenwinkel des Übertragungskoeffizienten θ_H kann berechnet werden aus:

$$\theta_H = \frac{1}{2} \left(\Delta\theta_{PH} + \Delta\theta_{TH} - \Delta\theta_{PT} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (20)$$

Dabei ist θ_{PH} der Phasenwinkel von Z_{PH} usw. [45]

ANMERKUNG 1 Da die Abstände und die Schallgeschwindigkeit in Gleichung (18) 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. Ein besonderes Messgestell, mit dem die Positionierfehler auf ein Mindestmaß gesenkt werden können, ist in Bild 2 dargestellt.

8.3.8 Wiederholpräzision

Die Kalibrierung muss mehrere Male wiederholt werden und der Mittelwert der Ergebnisse bei jeder Frequenz muss als Endwert für den Übertragungskoeffizienten verwendet werden. Die wiederholten Kalibrierungen müssen wirklich unabhängig sein, wobei die Wandler zwischen jeder Kalibrierung aus dem Wasser herausgenommen und wieder eingesetzt werden.

Die Standardabweichung muss bestimmt und bei der Berechnung der Messunsicherheiten verwendet werden, siehe Anhang F.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, mindestens vier Wiederholungsmessungen durchzuführen.

ANMERKUNG 2 Wenn für einige der wiederholten Kalibrierungen ein unterschiedlicher Trennabstand verwendet wird, ist dies bei der Bewertung einiger Annahmen in dem Verfahren (Freifeldbedingungen, Kugelwellenfeld usw.) hilfreich, da der Übertragungskoeffizient in Abhängigkeit vom Trennabstand unverändert bleibt (allerdings mit Korrekturen aufgrund der Absorption des Wassers bei hohen Frequenzen).

ANMERKUNG 3 Eine mangelhafte Wiederholpräzision weist auf ein Problem bei der Kalibrierung hin. Die Gründe können ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, das Vorhandensein von akustischen Reflexionen, mangelnde Präzision bei Positionierung und Ausrichtung, schlechte zeitliche Stabilität des Leistungsverhaltens der akustischen Wandler oder der Prüfausrüstung sein. Mit Sorgfalt ist es möglich, Standardabweichungen von bis zu 1 % für Hydrophone über ihren Betriebsbereich zu erreichen.

8.3.9 Überprüfungen

Die Überprüfungen des reziproken Verhaltens müssen nach 8.2.8.1 durchgeführt werden.

Die Überprüfungen des Kugelwellenfeldes müssen nach 8.2.8.2 durchgeführt werden.

Die Überprüfungen der Linearität des Wandlers müssen nach 8.2.8.3 durchgeführt werden.

In die Wandler-Dreiergruppe müssen, falls möglich, Wandler mit bekanntem Übertragungskoeffizienten nach 8.2.8.4 aufgenommen werden.

8.3.10 Messunsicherheit

Unter guten Bedingungen mit präziser Positionierung ist es möglich, eine erweiterte Gesamtmessunsicherheit von weniger als 5° für Frequenzen bis 50 kHz, ansteigend auf 10° für Frequenzen bis 100 kHz und weiter ansteigend auf 20° für Frequenzen bis 300 kHz zu erhalten [44]-[46].

ANMERKUNG 1 In die Bewertung der Messunsicherheit gehen viele Komponenten ein (siehe Anhang F).

ANMERKUNG 2 Zur Diskussion über Möglichkeiten zur Verringerung der Unsicherheit der Phasenmessung, die durch Ungenauigkeiten im Abstand zwischen den akustischen Zentren des Hydrophons und des Senders verursacht wird, sowie zur Bestimmung der Verschiebung des akustischen Zentrums hinsichtlich des Bezugszentrums siehe Literaturhinweis [46].

9 Freifeld-Kalibrierung durch Vergleich mit einem akustischen Bezugsgerät

9.1 Kurzbeschreibung

9.1.1 Allgemeines

Die Kalibrierung von Hydrophonen oder Sendern unter Freifeld-Bedingungen kann mit einem akustischen Bezugswandler durchgeführt werden, der zuvor einer absoluten Kalibrierung unterzogen wurde. Eine derartige Kalibrierung macht die Verwendung eines kalibrierten Hydrophons oder eines kalibrierten Senders erforderlich [3]-[6].

ANMERKUNG Kalibrierung mit einem Vergleichsverfahren weist gewöhnlich eine höhere Messunsicherheit auf als ein Primärverfahren (wie das Verfahren auf der Grundlage der Freifeldreziprozität), da die Messunsicherheit in der Kalibrierung des Bezugsgeräts zwangsläufig eine große Komponente vom Typ B der Messunsicherheit bewirkt. Weitere Anleitungen bezüglich der Beurteilung von Messunsicherheiten sind in Anhang F angegeben.

9.2 Arten des Vergleichskalibrierverfahrens

9.2.1 Hydrophonkalibrierung mit einem kalibrierten Bezugshydrophon

Das von einem Hilfssender in Wasser erzeugte Schallfeld wird an einem Punkt im akustischen Fernfeld mit einem kalibrierten Bezugshydrophon gemessen. Das Bezugshydrophon wird anschließend durch das zu prüfende Hydrophon ersetzt. Das Verhältnis der Leerlaufspannungen der beiden Hydrophone entspricht dem Verhältnis ihrer Freifeldübertragungskoeffizienten, so dass der Freifeldübertragungskoeffizient des zu prüfenden Hydrophons bestimmt werden kann. Der Hilfssender braucht nicht kalibriert zu sein und braucht nur für die Dauer der Kalibrierung stabil zu sein.

9.2.2 Hydrophonkalibrierung mit einem kalibrierten Bezugssender

Das von einem kalibrierten Bezugssender im Wasser erzeugte Schallfeld wird mit dem zu prüfenden Hydrophon an einer Stelle im akustischen Fernfeld gemessen. Der Freifeldübertragungskoeffizient dieses Hydrophons wird aus der Messung der Leerlaufspannung des Hydrophons, dem Sender-Hydrophon-Trennabstand, dem Sende-Übertragungskoeffizienten des kalibrierten Senders und dem an den Sender angelegten elektrischen Anregungssignal bestimmt. Für den kalibrierten Sender kann entweder der Sende-Stromübertragungskoeffizient oder der Sende-Spannungsübertragungskoeffizient verwendet werden, was die Messung des elektrischen Anregungsstroms bzw. der elektrischen Anregungsspannung erfordert.

9.2.3 Senderkalibrierung mit einem kalibrierten Bezugshydrophon

Das vom zu prüfenden Sender im Wasser erzeugte Schallfeld wird mit einem kalibrierten Bezugshydrophon an einer Stelle im akustischen Fernfeld gemessen. Der Freifeld-Sendeübertragungskoeffizient dieses Senders wird aus der Messung der Leerlaufspannung des Hydrophons, dem Sender-Hydrophon-Trennabstand, dem Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizienten des kalibrierten Bezugshydrophones und dem an den Sender angelegten elektrischen Anregungssignal bestimmt. Für den Sender kann entweder der Sende-Stromübertragungskoeffizient oder der Sende-Spannungsübertragungskoeffizient verwendet werden, was die Messung des elektrischen Anregungsstroms bzw. der elektrischen Anregungsspannung erfordert.

9.3 Hydrophonkalibrierung durch Vergleich mit einem Bezugshydrophon

9.3.1 Anforderungen an das akustische Feld

Für alle Messungen müssen die Anforderungen an die akustischen Freifeldbedingungen (5.2), Fernfeldbedingungen (5.3) und stationären Bedingungen (5.4) erfüllt sein.

9.3.2 Trennabstand

Der Abstand zwischen dem Hilfssender und dem Hydrophon muss nach den Anforderungen von 5.6.5 bestimmt und gemessen werden.

Bei der Auswahl des Trennabstandes müssen die Anforderungen der akustischen Freifeldbedingungen (5.2) und der akustischen Fernfeldbedingungen (5.3) erfüllt werden.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, dass jede wiederholte Kalibrierung mit einem anderen Trennabstand durchgeführt wird.

ANMERKUNG 2 Ein Abstand, der kleiner als der für Freifeldbedingungen geforderte Abstand ist, kann akzeptabel sein, wenn das zu prüfende Hydrophon mit einem kalibrierten Hydrophon an derselben Stelle im Schallfeld verglichen wird. Dies ist möglich, wenn die beiden Hydrophone dem gleichen Schalldruck ausgesetzt werden und kein Hydrophon auf Schalldruckgradienten reagiert. Um dies zu erreichen, werden die zwei Hydrophone hinsichtlich Aufbau und Größe im Wesentlichen identisch (oder sehr ähnlich) sein oder beide sollten kleinere Maße haben als die Schallwellenlänge [4].

9.3.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandlers

Vor Beginn der Messungen müssen die Anforderungen an das Eintauchen (7.1) und Befeuchten (7.2) der Wandler erfüllt sein.

Bei jeder Messung der elektrischen Übergangsimpedanz müssen die Anforderungen an die Befestigung (5.6.3) und die Ausrichtung (5.6.4) des Wandlers erfüllt sein.

9.3.4 Signalart

Die Signalart muss nach 6.1 ausgewählt werden.

9.3.5 Messung der elektrischen Spannung

Sowohl für das zu prüfende Hydrophon als auch für das Bezugshydrophon muss die Hydrophonspannung nach 6.3 gemessen werden. Beide Spannungen müssen in derselben Metrik angegeben werden (z. B. beide als Scheitelwerte oder beide als Effektivwerte der Spannung).

Während der Messungen muss zur Überprüfung der Stabilität des Quellenwandlers zwischen den Messläufen der Anregungsstrom des Senders nach 6.4 gemessen werden.

ANMERKUNG 1 Für höchste Genauigkeit können die Hydrophonspannungen durch denselben Messkanal gemessen werden (der Messkanal besteht aus einem Verstärker, einem Filter und einem A/D-Umsetzer). In diesem Fall machen die im Messkanal verwendeten Ausrüstungen keine absolute Kalibrierung erforderlich, weil nur die Verhältnisse elektrischer Größen gefordert sind.

ANMERKUNG 2 Erforderlichenfalls kann ein kalibriertes Dämpfungsglied verwendet werden, um die Spannungen anzugleichen. Dies minimiert Fehler infolge Nichtlinearität im Messkanal.

9.3.6 Freifeld-Übertragungskoeffizient

Der Betrag des Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizienten des zu prüfenden Hydrophons $|M_H|$ muss aus dem Verhältnis der Leerlaufspannungen des zu prüfenden Hydrophons U_H und des Bezugshydrophons U_R und dem Übertragungskoeffizienten des kalibrierten Bezugshydrophons $|M_R|$ nach der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$|M_H| = \frac{U_H}{U_R} |M_R| \quad (21)$$

9.3.7 Wiederholpräzision

Die Kalibrierung muss mehrere Male wiederholt werden und der Mittelwert der Ergebnisse bei jeder Frequenz muss als Endwert für den Übertragungskoeffizienten verwendet werden. Die wiederholten Kalibrierungen müssen wirklich unabhängig sein, wobei die Wandler zwischen jeder Kalibrierung aus dem Wasser herausgenommen und wieder eingesetzt werden.

Die Standardabweichung muss bestimmt und bei der Berechnung der Messunsicherheiten verwendet werden, siehe Anhang F.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, mindestens vier Wiederholungsmessungen durchzuführen. Wenn zwei verschiedene Bezugshydrophone verwendet werden, wird empfohlen, dass jedes für zwei der Wiederholungen verwendet wird.

ANMERKUNG 2 Wenn für einige der wiederholten Kalibrierungen ein anderer Trennabstand verwendet wird, ist dies bei der Bewertung einiger Annahmen in dem Verfahren (Freifeldbedingungen, Kugelwellenfeld usw.) hilfreich, weil der Übertragungskoeffizient für Kugelwellen unter Freifeldbedingungen in Abhängigkeit vom Trennabstand unverändert bleibt (allerdings mit Korrekturen aufgrund der Absorption des Wassers bei hohen Frequenzen).

ANMERKUNG 3 Eine mangelhafte Wiederholpräzision weist auf ein Problem bei der Kalibrierung hin. Die Gründe können ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, das Vorhandensein von akustischen Reflexionen, mangelnde Präzision bei Positionierung und Ausrichtung, schlechte zeitliche Stabilität des Leistungsverhaltens der akustischen Wandler oder der Prüfausrüstung sein. Mit Sorgfalt ist es möglich, Standardabweichungen von bis zu 1 % für Hydrophone über ihren Betriebsbereich zu erreichen.

9.3.8 Überprüfungen

Die gemessenen Signale müssen auf Verzerrungen während der Kalibrierungen überprüft werden. Wenn es eine deutliche Verzerrung gibt, muss der Anregungspegel des Senders verringert werden.

Die Verwendung von zwei verschiedenen Bezugshydrophonen für die wiederholten Messläufe mindert das Risiko einer zeitlichen Instabilität des Übertragungskoeffizienten des Bezugshydrophons seit seiner letzten primären Kalibrierung.

ANMERKUNG 1 Um die Möglichkeit zu verringern, dass sich der Übertragungskoeffizient des Bezugshydrophones seit seiner letzten absoluten Kalibrierung verändert hat, wird empfohlen, zwei verschiedene Bezugshydrophone für verschiedene wiederholte Kalibrierungen zu verwenden. Die berechneten Übertragungskoeffizienten sind bei Verwendung eines der beiden Bezugshydrophone gleich. Der Grad, in wie weit die Ergebnisse nicht übereinstimmen, gibt einen Hinweis auf die Stabilität der beiden Bezugshydrophone (es ist höchst unwahrscheinlich, dass beide Hydrophone ihren Übertragungskoeffizienten um den gleichen Betrag ändern würden).

ANMERKUNG 2 Es ist darauf zu achten, dass die Signalpegel während der eigentlichen Kalibrierung innerhalb des Linearitätsbereichs gehalten werden. Verzerrungen können sich durch das Vorhandensein höherer Harmonischer im Signal zeigen, die bei der Überprüfung der Spektralpegel offensichtlich werden. Im Idealfall sind die Amplituden aller Harmonischen um mehr als 10 dB geringer als die Amplitude der Grundschiwingung.

ANMERKUNG 3 Wird das kalibrierte Bezugshydrophon unter wesentlich anderen Umgebungsbedingungen als bei der primären Kalibrierung eingesetzt, kann dies zu einer Änderung des Übertragungskoeffizienten führen und die Kalibrierunsicherheit erhöhen. Zu den maßgeblichen Umgebungsbedingungen gehören die Eintauchtiefe und die Wassertemperatur.

9.3.9 Messunsicherheit

Die Gesamtmessunsicherheit für die Kalibrierung muss bestimmt und zusammen mit dem Wert für den Übertragungskoeffizienten angegeben werden. Durch sorgfältiges Arbeiten und Verwendung der Hydrophone innerhalb ihres Hauptbetriebsbereichs kann eine Gesamtmessunsicherheit (95%-Vertrauensniveau) im Bereich von 7 % bis 15 % erreicht werden.

ANMERKUNG Hydrophonkalibrierung mit einem Vergleichsverfahren weist gewöhnlich eine höhere Messunsicherheit auf als ein Primärverfahren (wie das Verfahren auf der Grundlage der Freifeldreziprozität), weil die Messunsicherheit in der Kalibrierung des Bezugshydrophons zwangsläufig eine große Komponente vom Typ B der Messunsicherheit bewirkt [43]. Weitere Anleitungen bezüglich der Beurteilung von Messunsicherheiten sind in Anhang F angegeben.

9.4 Hydrophonkalibrierung mit einem kalibrierten Sender

9.4.1 Anforderungen an das akustische Feld

Für alle Messungen müssen die Anforderungen an die akustischen Freifeldbedingungen (5.2), Fernfeldbedingungen (5.3) und stationären Bedingungen (5.4) erfüllt sein.

9.4.2 Trennabstand

Der Abstand zwischen dem Sender und dem Hydrophon muss nach den Anforderungen von 5.6.5 bestimmt und gemessen werden.

Bei der Auswahl des Trennabstandes müssen die Anforderungen der akustischen Freifeldbedingungen (5.2) und der akustischen Fernfeldbedingungen (5.3) erfüllt werden.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, dass jede wiederholte Kalibrierung mit einem anderen Trennabstand durchgeführt wird.

ANMERKUNG 2 Der Sender kann selbst in einem bestimmten Abstand oder innerhalb eines gegebenen Abstandsbereichs kalibriert worden sein. Wenn ja, wird empfohlen, diese Trennabstände auch für diese Kalibrierung zu verwenden.

9.4.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandlers

Vor Beginn der Messungen müssen die Anforderungen an das Eintauchen (7.1) und Befeuchten (7.2) der Wandler erfüllt sein.

Bei jeder Messung der elektrischen Übergangsimpedanz müssen die Anforderungen an die Befestigung (5.6.3) und die Ausrichtung (5.6.4) des Wandlers erfüllt sein.

9.4.4 Signalart

Die Signalart muss nach 6.1 ausgewählt werden.

ANMERKUNG Wenn der Sender mit einer speziellen Signalart kalibriert wurde, ist es ratsam, dieselbe Signalart zu verwenden, wenn dieser Sender als kalibrierte Schallquelle dient.

9.4.5 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz

Bei jeder akustischen Frequenz muss die elektrische Übertragungsimpedanz durch Messen der Hydrophonspannung nach 6.3 und des Anregungsstroms des Senders nach 6.4 bestimmt werden. Spannungen und Ströme müssen in derselben Metrik angegeben werden (z. B. beide als Scheitelwerte oder beide als Effektivwerte).

ANMERKUNG 1 Für höchste Genauigkeit kann der Anregungsstrom des Senders durch denselben Messkanal wie die Hydrophonspannung gemessen werden (der Messkanal besteht aus einem Verstärker, einem Filter und einem A/D-Umsetzer). In diesem Fall machen die im Messkanal verwendeten Ausrüstungen keine absolute Kalibrierung erforderlich, weil nur die Verhältnisse elektrischer Größen gefordert sind.

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 Wenn sehr hohe akustische Frequenzen angewendet werden, kann jede elektrische Übertragungsimpedanz für die Dämpfung aufgrund der Schallabsorption des Wassers korrigiert werden. Weitere Einzelheiten sind in 5.8.1 und Anhang E angegeben.

9.4.6 Berechnung der Empfangs-Übertragungskoeffizienten

Mit den Messwerten von d , U_{PH} , I_P , und bei bekanntem Sende-Stromübertragungskoeffizienten $S_{I,P}$ des kalibrierten Senders, muss der Betrag des Freifeld-Empfangsübertragungskoeffizienten $|M_H|$ des Hydrophones mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$|M_H| = \frac{d U_{PH}}{|S_{I,P}| I_P} = \frac{d |Z_{PH}|}{|S_{I,P}|} \quad (22)$$

9.4.7 Wiederholpräzision

Die Kalibrierung muss mehrere Male wiederholt werden und der Mittelwert der Ergebnisse bei jeder Frequenz muss als Endwert für den Übertragungskoeffizienten verwendet werden. Die wiederholten Kalibrierungen müssen wirklich unabhängig sein, wobei die Wandler zwischen jeder Kalibrierung aus dem Wasser herausgenommen und wieder eingesetzt werden.

Die Standardabweichung muss bestimmt und bei der Berechnung der Messunsicherheiten verwendet werden, siehe Anhang F.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, mindestens vier Wiederholungsmessungen durchzuführen.

ANMERKUNG 2 Wenn für einige der wiederholten Kalibrierungen ein unterschiedlicher Trennabstand verwendet wird, ist dies bei der Bewertung einiger Annahmen in dem Verfahren (Freifeldbedingungen, Kugelwellenfeld usw.) hilfreich, weil der Übertragungskoeffizient für Kugelwellen unter Freifeldbedingungen in Abhängigkeit vom Trennabstand unverändert bleibt (allerdings mit Korrekturen aufgrund der Absorption des Wassers bei hohen Frequenzen).

ANMERKUNG 3 Eine mangelhafte Wiederholpräzision weist auf ein Problem bei der Kalibrierung hin. Die Gründe können ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis, das Vorhandensein von akustischen Reflexionen, mangelnde Präzision bei Positionierung und Ausrichtung, schlechte zeitliche Stabilität des Leistungsverhaltens der akustischen Wandler oder der Prüfausrüstung sein. Mit Sorgfalt ist es möglich, Standardabweichungen von bis zu 1 % für Hydrophone über ihren Betriebsbereich zu erreichen.

9.4.8 Überprüfungen

Die gemessenen Signale müssen auf Verzerrungen während der Kalibrierungen überprüft werden. Wenn es eine deutliche Verzerrung gibt, muss der Anregungspegel des Senders verringert werden.

Soweit möglich, muss der kalibrierte Sender in der Weise und unter den Bedingungen eingesetzt werden, wie es für seine primäre Kalibrierung erforderlich ist.

Die Verwendung eines kalibrierten Bezugshydrophons zur Überprüfung des Betriebsverhaltens des Senders mindert das Risiko einer zeitlichen Instabilität des Übertragungskoeffizienten des Senders seit seiner letzten primären Kalibrierung.

ANMERKUNG 1 Es ist darauf zu achten, dass die Signalpegel während der eigentlichen Kalibrierung innerhalb des Linearitätsbereichs gehalten werden. Verzerrungen können sich durch das Vorhandensein höherer Harmonischer im Signal zeigen, die bei der Überprüfung der Spektralpegel offensichtlich werden. Im Idealfall sind die Amplituden aller Harmonischen um mehr als 10 dB geringer als die Amplitude der Grundschiwingung.

ANMERKUNG 2 Der kalibrierte Bezugssender wird im Idealfall unter Betriebsbedingungen eingesetzt, die denen seiner primären Kalibrierung entsprechen. Diese Bedingungen umfassen eine ähnliche angelegte Anregungsspannung und einen ähnlichen Trennabstand und eine ähnliche Befestigungskonfiguration.

ANMERKUNG 3 Wird der kalibrierte Bezugssender unter wesentlich anderen Umgebungsbedingungen als bei seiner primären Kalibrierung eingesetzt, kann dies zu einer Änderung des Übertragungskoeffizienten führen und die Kalibrierunsicherheit erhöhen. Zu den maßgeblichen Umgebungsbedingungen gehören die Eintauchtiefe und die Wassertemperatur.

ANMERKUNG 4 Zur Überprüfung der Stabilität des Übertragungskoeffizienten des Senders (seit seiner letzten primären Kalibrierung) kann ein kalibriertes Hydrophon verwendet werden, um das vom Sender erzeugte Schallfeld zu messen.

9.4.9 Messunsicherheit

Die Gesamtmessunsicherheit für die Kalibrierung muss bestimmt und zusammen mit dem Wert für den Übertragungskoeffizienten angegeben werden. Durch sorgfältiges Arbeiten und Verwendung von Hydrophonen innerhalb ihres Hauptbetriebsbereichs muss kann eine Gesamtmessunsicherheit (95%-Vertrauensniveau) im Bereich von 10 % bis 20 % erreicht werden.

ANMERKUNG Die Hydrophonkalibrierung mit einem Standardsender weist gewöhnlich eine höhere Messunsicherheit auf als ein Primärverfahren (wie das Verfahren auf der Grundlage der Freifeldreziprozität), da die Messunsicherheit in der Kalibrierung des Bezugshydrophons zwangsläufig eine große Komponente der Messunsicherheit bewirkt. Die Stabilität des Senders und das mögliche Fehlen von Freifeldbedingungen kann auch zur Gesamtmessunsicherheit beitragen. Weitere Anleitungen bezüglich der Beurteilung von Messunsicherheiten sind in Anhang F angegeben.

9.5 Senderkalibrierung mit einem kalibrierten Hydrophon

9.5.1 Anforderungen an das akustische Feld

Für alle Messungen müssen die Anforderungen an die akustischen Freifeldbedingungen (5.2), Fernfeldbedingungen (5.3) und stationären Bedingungen (5.4) erfüllt sein.

9.5.2 Trennabstand

Der Abstand zwischen dem Sender und dem Hydrophon muss nach den Anforderungen von 5.6.5 bestimmt und gemessen werden.

Bei der Auswahl des Trennabstandes müssen die Anforderungen der akustischen Freifeldbedingungen (5.2) und der akustischen Fernfeldbedingungen (5.3) erfüllt werden.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, dass jede wiederholte Kalibrierung mit einem anderen Trennabstand durchgeführt wird.

9.5.3 Vorbereitung, Befestigung und Ausrichtung des Wandler

Vor Beginn der Messungen müssen die Anforderungen an das Eintauchen (7.1) und Befeuchten (7.2) der Wandler erfüllt sein.

Bei jeder Messung der elektrischen Übergangsimpedanz müssen die Anforderungen an die Befestigung (5.6.3) und die Ausrichtung (5.6.4) des Wandler erfüllt sein.

9.5.4 Signalart

Die Signalart muss nach 6.1 ausgewählt werden.

9.5.5 Messung der elektrischen Übertragungsimpedanz

Bei jeder akustischen Frequenz muss die elektrische Übertragungsimpedanz durch Messen der Hydrophonspannung nach 6.3 und des Anregungsstroms des Senders nach 6.4 bestimmt werden. Spannungen und Ströme müssen in derselben Metrik angegeben werden (z. B. beide als Scheitelwerte oder beide als Effektivwerte).

ANMERKUNG 1 Für höchste Genauigkeit kann der Anregungsstrom des Senders durch denselben Messkanal wie die Hydrophonspannung gemessen werden (der Messkanal besteht aus einem Verstärker, einem Filter und einem A/D-Umsetzer). In diesem Fall machen die im Messkanal verwendeten Ausrüstungen keine absolute Kalibrierung erforderlich, weil nur die Verhältnisse elektrischer Größen gefordert sind.

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 Wenn sehr hohe akustische Frequenzen angewendet werden, kann jede elektrische Übertragungsimpedanz für die Dämpfung aufgrund der Schallabsorption des Wassers korrigiert werden. Weitere Einzelheiten sind in 5.8.1 und Anhang E angegeben.

9.5.6 Berechnung des Sende-Übertragungskoeffizienten

Mit den Messwerten von d , U_{PH} , I_P , und bei bekanntem Freifeld-Übertragungskoeffizienten $|M_H|$ des Hydrophons, muss der Betrag des Sende-Stromübertragungskoeffizienten $|S_{I,P}|$ des Senders mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$|S_{I,P}| = \frac{d U_{PH}}{|M_H| I_P} = \frac{d |Z_{PH}|}{|M_H|} \quad (23)$$

Für die Kalibrierung des Senders in Bezug auf die gemessene elektrische Anregungsspannung, V_P , wird der Betrag des Sende-Spannungsübertragungskoeffizienten $|S_{V,P}|$ berechnet mit:

$$|S_{V,P}| = \frac{d U_{PH}}{|M_H| V_P} \quad (24)$$

9.5.7 Überprüfungen

Die gemessenen Signale müssen auf Verzerrungen während der Kalibrierungen überprüft werden. Wenn es eine deutliche Verzerrung gibt, muss der Anregungspegel des Senders verringert werden.

Soweit möglich, muss der Sender in der Weise und unter den Bedingungen kalibriert werden, dass er für den vorgesehenen Einsatz im Feld erforderlich ist.

Die Verwendung von zwei verschiedenen Bezugshydrophonen für die wiederholten Messläufe mindert das Risiko einer zeitlichen Instabilität des Übertragungskoeffizienten des Bezugshydrophons seit seiner letzten primären Kalibrierung.

ANMERKUNG 1 Es ist darauf zu achten, dass die Signalpegel während der eigentlichen Kalibrierung innerhalb des Linearitätsbereichs gehalten werden. Verzerrungen können sich durch das Vorhandensein höherer Harmonischer im Signal zeigen, die bei der Überprüfung der Spektralpegel offensichtlich werden. Im Idealfall sollten alle Amplituden aller Harmonischen um mehr als 10 dB geringer als die Amplitude der Grundschiwingung sein.

ANMERKUNG 2 Der zu prüfende Sender wird im Idealfall mit einer ähnlichen angelegten Anregungsspannung, einem ähnlichen Trennabstand und ähnlicher Befestigungskonfiguration kalibriert, wie sie für den vorgesehenen Einsatz im Feld erforderlich sind.

ANMERKUNG 3 Wird das kalibrierte Bezugshydrophon unter wesentlich anderen Umgebungsbedingungen als bei seiner primären Kalibrierung eingesetzt, kann dies zu einer Änderung des Übertragungskoeffizienten führen und die Kalibrierunsicherheit erhöhen. Zu den maßgeblichen Umgebungsbedingungen gehören Eintauchtiefe, Wassertemperatur und Befestigungskonfiguration.

ANMERKUNG 4 Um die Möglichkeit zu verringern, dass sich der Übertragungskoeffizient des Bezugshydrophons seit seiner letzten absoluten Kalibrierung verändert hat, wird empfohlen, zwei verschiedene Bezugshydrophone für verschiedene wiederholte Kalibrierungen zu verwenden. Die berechneten Sende-Übertragungskoeffizienten werden bei Verwendung eines der beiden Bezugshydrophone gleich sein. Der Grad, in wie weit die Ergebnisse nicht übereinstimmen, gibt einen Hinweis auf die Stabilität der beiden Bezugshydrophone (es ist höchst unwahrscheinlich, dass beide Hydrophone ihren Übertragungskoeffizienten um den gleichen Betrag ändern würden).

9.5.8 Messunsicherheit

Die Gesamtmessunsicherheit für die Kalibrierung muss bestimmt und zusammen mit dem Wert für den Übertragungskoeffizienten angegeben werden. Durch sorgfältiges Arbeiten und Verwendung von Wandlern innerhalb ihres Hauptbetriebsbereichs kann eine Gesamtmessunsicherheit (95%-Vertrauensniveau) im Bereich von 10 % bis 20 % erreicht werden.

ANMERKUNG Die Kalibrierung eines Senders weist gewöhnlich eine höhere Messunsicherheit auf als ein Primärverfahren (wie das Verfahren auf der Grundlage der Freifeldreziprozität), da die Messunsicherheit in der Kalibrierung des Bezugshydrophons zwangsläufig eine große Komponente der Messunsicherheit bewirkt. Das mögliche Fehlen von Freifeldbedingungen kann auch in einem stärkeren Maße zur Gesamtmessunsicherheit beitragen als bei der Hydrophonkalibrierung. Weitere Anleitungen bezüglich der Beurteilung von Messunsicherheiten sind in Anhang F angegeben.