

DIN EN IEC 63305

ICS 17.140.50

Einsprüche bis 2022-09-29

Entwurf

**Unterwasserakustik –
Kalibrierung von Schallwellenvektorempfängern im Frequenzbereich
5 Hz bis 10 kHz
(IEC 87/770/CD:2021);
Text Deutsch und Englisch**

Underwater Acoustics –
Calibration of acoustic wave vector receivers in the frequency range 5 Hz to 10 kHz
(IEC 87/770/CD:2021);
Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-07-29 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, Merianstraße 28, 63069 Offenbach 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 114 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 87/770/CD:2021-05 „Underwater Acoustics – Calibration of acoustic wave vector receivers in the frequency range 5 Hz to 10 kHz“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

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

Das internationale Dokument wurde vom IEC/TC 87 „Ultrasonics“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC . Das Dokument wurde den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

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. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium DKE/GUK 821.3 „Medizinische Ultraschallgeräte“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

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.

Inhalt

	Seite
Einleitung.....	7
1 Anwendungsbereich.....	9
2 Normative Verweisungen.....	9
3 Begriffe.....	9
4 Liste der Formelzeichen (Symbole).....	14
5 Empfindlichkeitsbeziehungen eines Vektorempfängerkanals.....	16
5.1 Empfindlichkeitsbeziehungen im Schallfeld der ebenen Welle.....	16
5.2 Umrechnung der Empfindlichkeit vom Schallfeld der sphärischen zu dem der ebenen Welle.....	17
6 Allgemeine Verfahren für die Kalibrierung.....	17
6.1 Allgemeine Kalibrieranforderungen.....	17
6.1.1 Arten der Kalibrierung.....	17
6.1.2 Anforderungen an das akustische Feld.....	17
6.2 Akustische Anforderungen an Stehwellenrohre.....	18
6.2.1 Anforderungen an das Schallfeld der stehenden Welle [5].....	18
6.2.2 Anforderungen an die Eintauchtiefe von Wandlern.....	19
6.3 Akustische Anforderungen an Wanderwellenrohre.....	20
6.3.1 Anforderungen an die Signalart.....	20
6.3.2 Anforderungen an das Wanderwellenrohr.....	20
6.4 Anforderungen an die Ausrüstung.....	21
6.4.1 Kalibriereinrichtung.....	21
6.4.2 Messgeräte.....	21
6.5 Positionierung und Ausrichtung.....	24
6.5.1 Koordinatensystem.....	24
6.5.2 Bezugsrichtung.....	24
6.5.3 Befestigung und Halterung der Wandler.....	24
6.5.4 Ausrichtung.....	25
6.6 Darstellung des Frequenzgangs.....	25
6.7 Frequenzbeschränkungen.....	25
6.7.1 Obere Frequenzgrenze.....	25
6.7.2 Untere Frequenzgrenze.....	26
6.8 Überprüfungen auf akustische Interferenz.....	26
7 Elektrische Messungen.....	27
7.1 Signalart.....	27
7.2 Elektrische Erdung.....	27
7.3 Messung der Ausgangsspannung des Wandlers.....	27
7.3.1 Allgemeines.....	27
7.3.2 Signalanalyse.....	28
7.3.3 Elektrische Belastung durch das Messgerät.....	28

7.3.4	Elektrische Belastung durch Verlängerungskabel.....	28
7.3.5	Elektrisches Rauschen.....	28
7.3.6	Übersprechen.....	29
7.3.7	Eingebaute Vorverstärker.....	29
7.4	Messung des Ansteuerstroms des Senders.....	29
7.4.1	Messgeräte.....	29
7.4.2	Signalanalyse.....	29
8	Vorbereitung der Messung.....	30
8.1	Vorbereitung der Wandler.....	30
8.1.1	Eintauchen.....	30
8.1.2	Benetzung.....	30
8.2	Umgebungsbedingungen (Temperatur und Tiefe).....	30
9	Freifeld-Kalibrierung.....	31
9.1	Freifeld-Reziprozitätskalibrierung.....	31
9.1.1	Allgemeines.....	31
9.1.2	Prinzip.....	31
9.1.3	Messung.....	33
9.1.4	Messunsicherheit.....	33
9.2	Kalibrierung mit optischer Interferometrie.....	33
9.2.1	Allgemeines.....	33
9.2.2	Prinzip.....	33
9.2.3	Messung.....	34
9.2.4	Messunsicherheit.....	35
9.3	Vergleichskalibrierung mit Referenzhydrophon.....	35
9.3.1	Allgemeines.....	35
9.3.2	Prinzip.....	35
9.3.3	Messung.....	36
9.3.4	Messunsicherheit.....	36
10	Kalibrierung mit Stehwellenrohr.....	36
10.1	Kalibrierung mit Referenzakzelerometer.....	36
10.1.1	Allgemeines.....	36
10.1.2	Prinzip.....	36
10.1.3	Messung.....	38
10.1.4	Messunsicherheit.....	38
10.2	Vergleichskalibrierung mit Referenzhydrophon.....	38
10.2.1	Allgemeines.....	38
10.2.2	Prinzip.....	38
10.2.3	Messung.....	39
10.2.4	Messunsicherheit.....	39
10.3	Kalibrierung mit horizontalem Stehwellenrohr.....	40

10.3.1	Allgemeines.....	40
10.3.2	Prinzip.....	40
10.3.3	Messung.....	41
10.3.4	Messunsicherheit.....	42
10.4	Kalibrierung mit optischer Interferometrie.....	42
10.4.1	Allgemeines.....	42
10.4.2	Prinzip.....	42
10.4.3	Messung.....	43
10.4.4	Messunsicherheit.....	44
11	Kalibrierung mit Wanderwellenrohr.....	44
11.1	Allgemeines.....	44
11.2	Prinzip.....	44
11.2.1	Allgemeines.....	44
11.2.2	Aufbau des Feldes einer unidirektionalen, ebenen fortschreitenden Welle.....	45
11.2.3	Empfindlichkeitsberechnungen.....	47
11.3	Messunsicherheit.....	48
12	Ergebnisbericht.....	48
12.1	Empfindlichkeit.....	48
12.2	Übertragungsmaß.....	48
12.3	Erwägungen zur Umwelt bei der Kalibrierung.....	49
12.4	Kalibrierunsicherheiten.....	49
12.5	Zusätzliche Metadaten.....	49
13	Intervalle für die Rekalibrierung.....	49
Anhang A (informativ) Richtungsempfindlichkeit eines Vektorempfängers.....		50
A.1	Allgemeines Prinzip.....	50
A.2	Realisierungsarten der Messung.....	50
A.3	Koordinatensystem.....	50
A.4	Anforderungen an das akustische Feld.....	50
A.5	Positionierung und Ausrichtung.....	50
A.6	Signalart.....	50
A.7	Messung der Richtungsempfindlichkeit von Vektorempfängern.....	50
A.8	Berechnung des Richtmaßes.....	51
A.9	Messunsicherheit.....	51
Anhang B (informativ) Kalibrierung mit optischer Interferometrie in Luft.....		52
B.1	Allgemeines.....	52
B.2	Prinzip.....	52
B.3	Durchführung.....	52
B.4	Diskussion.....	53
Anhang C (informativ) Beurteilung der Unsicherheit der Kalibrierung von Vektorempfängern.....		54
C.1	Allgemeines.....	54

C.2	Typ-A-Bewertung der Messunsicherheit.....	54
C.3	Typ-B-Bewertung der Messunsicherheit.....	54
C.4	Angegebene Messunsicherheit.....	54
C.5	Allgemein übliche Quellen der Messunsicherheit.....	55
	Literaturhinweise.....	58
Bilder		
Bild 1	– Ideales Richtungsempfindlichkeitsmuster eines Vektorempfängerkanals.....	8
Bild 2	– Der Aufbau der Kalibrierkammer.....	19
Bild 3	– Mitschwingender Vektorempfänger, aufgehängt an einem Montagering.....	24
Bild 4	– Messkonzept zur Freifeld-Reziprozitätskalibrierung von Vektorempfängern.....	31
Bild 5	– Schematische Darstellung der Freifeld-Kalibrierung für Vektorempfänger mit optischer Interferometrie.....	34
Bild 6	– Schematische Darstellung der Freifeld-Vergleichskalibrierung für Vektorempfänger mit Referenzhydrophon.....	35
Bild 7	– Schematische Darstellung der Kalibrierung im vertikalen Stehwellenrohr mit Referenzakzelerometer.....	37
Bild 8	– Schematische Darstellung der Kalibrierung im vertikalen Stehwellenrohr mit Referenzhydrophon..	39
Bild 9	– Schematische Darstellung des Kalibrierprinzips und Kalibrierung im Stehwellenrohr.....	40
Bild 9	– Schematische Darstellung der Kalibrierung für Vektorempfänger mit optischer Interferometrie im Stehwellenrohr.....	43
Bild 10	– Schematische Darstellung der Kalibrierung für Vektorempfänger in einem Wanderwellenrohr.....	44
Bild B.1	– Schematische Darstellung der Kalibrierung mit optischer Interferometrie in Luft für Vektorempfänger.....	52

Einleitung

Vektorempfänger für akustische Wellen werden gewöhnlich auf der Grundlage zweier Prinzipien ausgelegt und konstruiert. Eins ist das Prinzip der Schalldruckdifferenz (**Gradient**). Wird er für Messungen verwendet, so ist der Sensor starr an einer Halterung im Wasser befestigt. Ein anderes ist das Prinzip des Mitschwingens (**Trägheit**). Wird er für Messungen verwendet, so wird er an einer Halterung in das Wasser gehängt und flexibel gestützt, wodurch der **Vektorempfänger** in gleicher Richtung mit der Bewegung der **Schallteilchen** im Feld der Schallwelle mitschwingt.

Im Gegensatz zu traditionellen piezoelektrischen **Hydrophonen**, die empfindlich für den Schalldruck sind, messen **Vektorempfänger** die Bewegung von **Schallteilchen** (Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Auslenkung) oder den **Schalldruckgradienten**, die starke Richtungsinformationen in ihrem Arbeitsfrequenzbereich aufweisen. Die **Vektorempfänger**, die entweder die **Schallteilchenbewegung** oder den **Schalldruckgradienten** messen, werden in dieser Norm behandelt.

Daher ist die Ausgangsspannung eines zu kalibrierenden **Vektorempfängers** proportional zur **Schallteilchenbewegung** oder zum **Schalldruckgradienten** am Bezugsmittelpunkt des **Vektorempfängers**. Außerdem ist die Richtwirkung des **Vektorempfängerkanals** im wesentlichen unabhängig von der akustischen Frequenz, mit einer in Bild 1 dargestellten Richtungsempfindlichkeit ähnlich der Form der arabischen Ziffer „8“ und einem Verhältnis der Ausgangsspannung des Empfängerkanals bei dem Winkel θ zur größten Ausgangsspannung in axialer Richtung, das immer gleich $\cos\theta$ ist. [1]

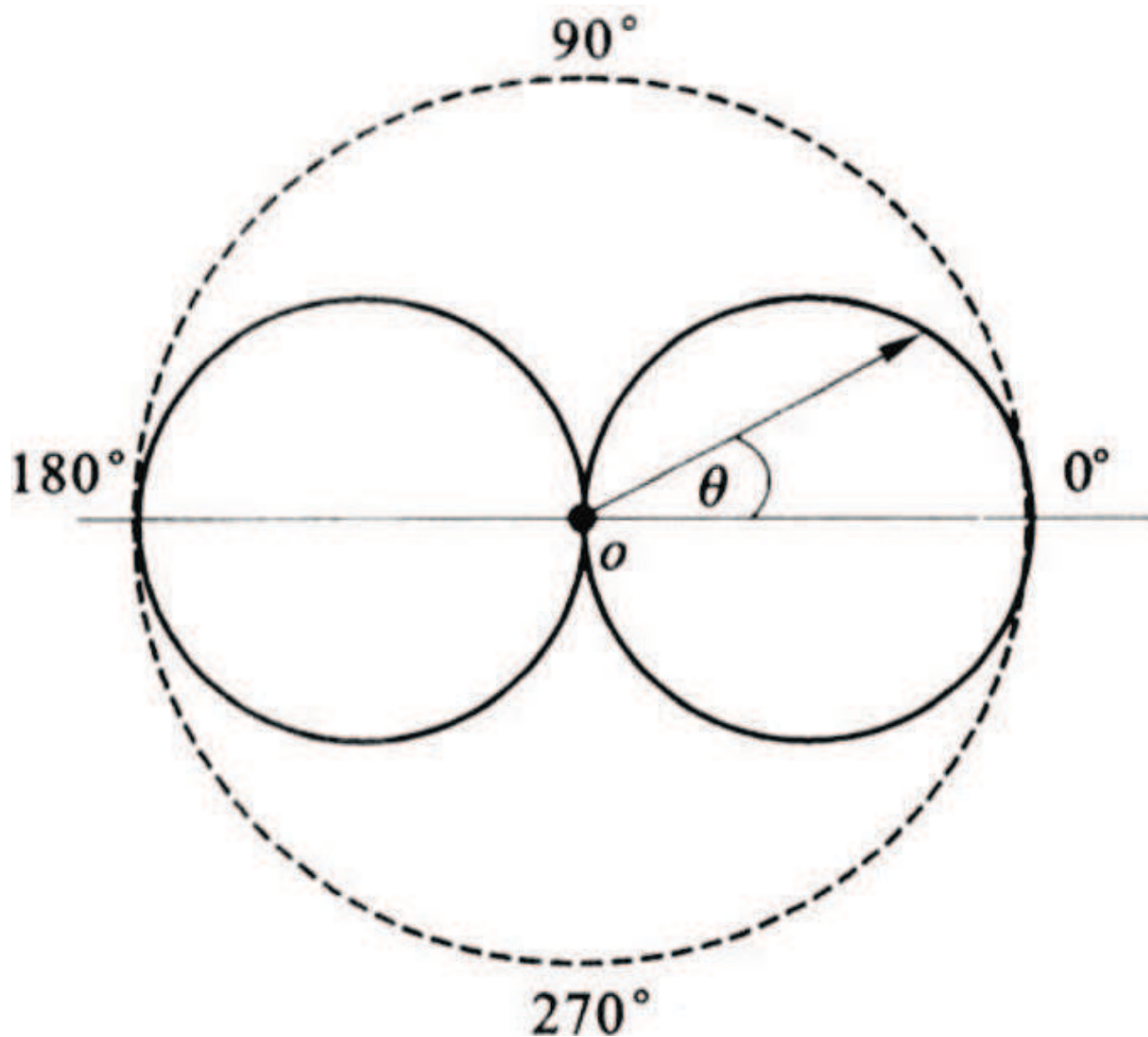


Bild 1 – Ideales Richtungsempfindlichkeitsmuster eines Vektorempfängerkanals

Unterwasserakustik – Kalibrierung von Schallwellenvektorempfängern im Frequenzbereich 5 Hz bis 10 kHz

1 Anwendungsbereich

Diese internationale Norm legt die Verfahren zur Kalibrierung von **Vektorempfängern** für akustische Wellen im Frequenzbereich von 5 Hz bis 10 kHz fest.

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).

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

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

IEC 60565-1:2020, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones, Part 1: Procedures for free-field calibration of hydrophones*

IEC 60565-2:2019, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration of hydrophones, Part 2: Procedures for low frequency pressure calibration*

ISO 266:1997, *Acoustics – Preferred frequencies*

JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*

JCGM 200:2012, *International vocabulary of metrology basic and general concepts and associated terms*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 60050-801, IEC 60500:2017, JCGM 200:2012 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>

3.1

Vektorempfänger für akustische Wellen

Vektorempfänger

empfangender Messumformer, dessen Ausgangsspannung des Empfangskanals proportional ist zur **Schallteilchenbewegung** (Auslenkung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung) oder zum **Schalldruckgradienten** am Ort des Bezugsmittelpunkts des **Vektorempfängers** in Wasser

Anmerkung 1 zum Begriff: Aufgrund verschiedener Konstruktionen darf der **Vektorempfänger** ein eindimensionaler **Vektorempfänger**, ein zweidimensionaler orthogonaler **Vektorempfänger** oder ein dreidimensionaler orthogonaler **Vektorempfänger** sein und über verschiedene Empfangskanäle verfügen. Bei einem dreidimensionalen orthogonalen **Vektorempfänger** werden die Kanäle üblicherweise als x-Kanal, y-Kanal und z-Kanal bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Empfangskanal des **Vektorempfängers** hat eine sehr starke **Richtungsempfindlichkeit** (siehe Bild 1), die unabhängig von der Frequenz ist.

Anmerkung 3 zum Begriff: In Abhängigkeit von den erfassten Vektorgrößen gibt es verschiedene **Vektorempfänger** einschließlich **Trägheits-Vektorempfängern** und **Schalldruckgradienten-Vektorempfängern**.

Anmerkung 4 zum Begriff: Manchmal hat der **Vektorempfänger** einen (skalaren) Schalldruck-Empfangskanal, und die Leerlaufspannung des Schalldruck-Kanals ist proportional zum Schalldruck am Ort des Referenzmittelpunkts des **Vektorempfängers**.

3.2

Vektorempfänger, Trägheits-

Empfangsmessumformer, der die Bewegung von **Schallteilchen** durch Messung der Bewegung eines Nachweis-Massestückes in Reaktion auf die Beschleunigung des Sensorkörpers erfasst (z. B. Akzelerometer, Seismometer)

3.3

Vektorempfänger, Schalldruckgradient

Empfangsmessumformer, der den Gradienten des Schalldrucks mit zwei oder mehr **Hydrophonen** aufnimmt, die durch Abstände voneinander getrennt sind, die klein sind im Verhältnis zur Wellenlänge

3.4

axiales Richtmaß

der größere Wert der **Richtungsempfindlichkeit** eines **Vektorempfängerkanals** auf der Hauptachse abzüglich eines anderen Werts der **Richtungsempfindlichkeit** in der symmetrischen Richtung

Anmerkung 1 zum Begriff: Das **axiale Richtmaß** wird als ein (relativer) Pegel in Dezibel (dB) angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das **axiale Richtmaß** wird manchmal als Asymmetrie oder maximale Heterogenität der **Richtungsempfindlichkeit** auf der Hauptachse eines **Vektorempfängerkanals** bezeichnet.

3.5

Richtungsempfindlichkeit

<eines **Vektorempfängerkanals**> im allgemeinen grafisch dargestellte Beschreibung, **Richtungsempfindlichkeit** eines **Vektorempfängerkanals**, als Funktion der Ausbreitungsrichtung der einfallenden ebenen Schallwelle in einer festgelegten Richtung des Kanals durch den Bezugsmittelpunkt bei einer festgelegten Frequenz

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Muster der **Richtungsempfindlichkeit** wird üblicherweise in Form eines zweidimensionalen Graphen in Polarkoordinaten dargestellt. Die Skale des Graphen darf das Übertragungsmaß oder das Richtmaß sein.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das Muster der **Richtungsempfindlichkeit** des **Vektorempfängerkanals** ist eine Cosinusfunktion, das heißt, das Verhältnis der Ausgangsspannung des **Vektorempfängerkanals** in Richtung des Winkels θ zur größten Ausgangsspannung in axialer Richtung ist gleich $\cos\theta$.

[QUELLE: IEC 60500:2017, modifiziert.]

3.6

Hydrophon

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

[QUELLE: IEC 60565-2:2019, 3.4]

3.7

laterales Richtmaß

der größere Wert der **Richtungsempfindlichkeit** eines **Vektorempfängerkanals** auf der Hauptachse abzüglich des kleineren Werts der **Richtungsempfindlichkeit** auf der lateralen Achse

Anmerkung 1 zum Begriff: Das **laterale Richtmaß** wird als ein (relativer) Pegel in Dezibel (dB) angegeben.

3.8

Materialelement Schallteilchen

kleinstes Element des Mediums, das die mittlere Dichte des Mediums repräsentiert

[QUELLE: ISO 18405:2017, 3.1.1.5] [2]]

3.9

Schallteilchenbeschleunigung

a

Beitrag zur Beschleunigung eines **Materialelements**, verursacht durch Schalleinwirkung

[QUELLE: ISO 18405:2017 3.1.2.11 [2]]

3.10

Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung

$\underline{M}_a$

<eines **Vektorempfängerkanals**> Quotient der Fourier-Transformierten des Ausgangsspannungssignals $\Im(U_{VR}(t))$ eines **Vektorempfängerkanals** und der Fourier-Transformierten des Signals der **Schallteilchenbeschleunigung** $\Im(a(t))$ für die festgelegte Frequenz und die festgelegte Richtung des Einfalls der ebenen Schallwelle am Ort des Referenzmittelpunkts des **Vektorempfängers** im ungestörten Freifeld, wenn der **Vektorempfänger** entfernt wurde

$$\underline{M}_a = \frac{\Im(U_{VR}(t))}{\Im(a(t))} \quad (1)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die **Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung** eines **Vektorempfängerkanals** ist ein komplexwertiger Parameter. Er kann manchmal direkt gemessen werden, und es wird ein Referenzhydrophon als Messnormal verwendet. Damit wird die Schalldruckempfindlichkeit eines **Vektorempfängers**, die den Wert der Empfindlichkeit der **Schallteilchenbeschleunigung** widerspiegelt, bestimmt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung** ist gleich dem Produkt des Betrags der Schalldruckempfindlichkeit $\underline{M}_p$ und von ρ/jk , worin j die Quadratwurzel von -1 ist und k die akustische Wellenzahl ($k = 2\pi f / c$) (siehe Formel (9)).

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung** wird in Einheiten von Voltsekunden je Meter, $V \cdot s^2 \cdot m^{-1}$, ausgedrückt. Der Phasenwinkel der Empfindlichkeit wird in Grad ausgedrückt und stellt die Phasendifferenz zwischen der elektrischen Spannung und der **Schallteilchenbeschleunigung** dar.

3.11

Übertragungsmaß der Schallteilchenbeschleunigung

$L_{M,a}$

das Zwanzigfache des dekadischen Logarithmus des Verhältnisses des Betrags der **Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung** $|\underline{M}_a|$ eines **Vektorempfängerkanals** zu einem Bezugswert der Empfindlichkeit, $M_{a,ref}$, in Dezibel

$$L_{M,a} = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_a|}{M_{a,ref}} \text{ dB} \quad (2)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit des **Übertragungsmaßes der Schallteilchenbeschleunigung** ist Dezibel, dB.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Bezugswert der Empfindlichkeit, $M_{a,ref}$, ist $1 V \cdot s^2 \cdot \mu m^{-1}$.

[QUELLE: ISO 18405:2017, Tabelle 1, modifiziert] [2]]

3.12

Schallteilchenauslenkung

δ

Auslenkung eines **Materialelements**, verursacht durch Schalleinwirkung

[QUELLE: ISO 18405:2017 3.1.2.9 [2]]

3.13

Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung

$\underline{M}_\delta$

<eines **Vektorempfängerkanals**> Quotient der Fourier-Transformierten des Ausgangsspannungssignals

$\Im(U_{VR}(t))$ eines **Vektorempfängerkanals** und der Fourier-Transformierten des Signals der

Schallteilchenauslenkung $\Im(\delta(t))$ für die festgelegte Frequenz und die festgelegte Richtung des Einfalls der ebenen Schallwelle am Ort des Bezugsmittelpunkts des **Vektorempfängers** im ungestörten Freifeld, wenn der **Vektorempfänger** entfernt wurde

$$\underline{M}_\delta = \frac{\Im(U_{VR}(t))}{\Im(\delta(t))} \quad (3)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die **Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung** eines **Vektorempfängerkanals** ist ein komplexwertiger Parameter. Er kann manchmal direkt gemessen werden, und es wird ein Referenzhydrophon als Messnormal verwendet. Damit wird die Schalldruckempfindlichkeit, die den Wert der **Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung** widerspiegelt, bestimmt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung** ist gleich dem Produkt des Betrags der Schalldruckempfindlichkeit $\underline{M}_p$ und $j\omega\rho c$, worin ω die Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$) ist (siehe Formel (9)).

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung** wird in der Einheit Voltsekunden je Meter, Vs m⁻¹, angegeben. Der Phasenwinkel der Empfindlichkeit wird in Grad ausgedrückt und stellt die Phasendifferenz zwischen der elektrischen Spannung und der **Schallteilchenauslenkung** dar.

3.14

Übertragungsmaß der Schallteilchenauslenkung

$L_{M,\delta}$

das Zwanzigfache des dekadischen Logarithmus des Verhältnisses des Betrags der **Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung** $|\underline{M}_\delta|$ eines **Vektorempfängerkanals** zu einem Bezugswert der Empfindlichkeit,

$M_{\delta,\text{ref}}$, in Dezibel

$$L_{M,\delta} = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_\delta|}{M_{\delta,\text{ref}}} \text{ dB} \quad (4)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit des **Übertragungsmaß der Schallteilchenauslenkung** ist Dezibel, dB.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Bezugswert der Empfindlichkeit, $M_{\delta,\text{ref}}$, ist 1 V pm⁻¹.

[QUELLE: ISO 18405:2017, Tabelle 1, modifiziert] [2]]

3.15

Schallteilchengeschwindigkeit

u

Beitrag zur Geschwindigkeit eines **Materialelements**, verursacht durch Schalleinwirkung

[QUELLE: ISO 18405:2017, 3.1.2.10, modifiziert] [2]]

3.16

Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit

$\underline{M}_u$

<eines **Vektorempfängerkanals**> Quotient der Fourier-Transformierten der Ausgangsspannungssignal $\Im(U_{VR}(t))$ eines **Vektorempfängerkanals** und der Fourier-Transformierten des Signals der **Schallteilchengeschwindigkeit** $\Im(u(t))$ für die festgelegte Frequenz und die festgelegte Richtung des Einfalls der ebenen Schallwelle am Ort des Referenzmittelpunkts des **Vektorempfängers** im ungestörten Freifeld, wenn der **Vektorempfänger** entfernt wurde

$$\underline{M}_u = \frac{\Im(U_{VR}(t))}{\Im(u(t))} \quad (5)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** eines **Vektorempfängers** ist ein komplexwertiger Parameter. Er kann manchmal direkt gemessen werden, und es wird ein Referenzhydrophon als Messnormal verwendet. Damit wird die Schalldruckempfindlichkeit eines **Vektorempfängers**, die den Wert der **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** widerspiegelt, bestimmt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** ist gleich dem Produkt des Betrags der Schalldruckempfindlichkeit $\underline{M}_p$ und ρc , worin ρ die Dichte des Wassers und c die Schallgeschwindigkeit in Wasser sind (siehe Formel (9)).

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** wird in Einheiten von Voltsekunde je Meter, $V \cdot s \cdot m^{-1}$, angegeben. Der Phasenwinkel der Empfindlichkeit wird in Grad ausgedrückt und stellt die Phasendifferenz zwischen der elektrischen Spannung und der **Schallteilchengeschwindigkeit** dar.

3.17

Übertragungsmaß der Schallteilchengeschwindigkeit

$L_{M,u}$

das Zwanzigfache des dekadischen Logarithmus des Verhältnisses des Betrags der **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** $|\underline{M}_u|$ eines **Vektorempfängerkanals** zu einem Bezugswert der Empfindlichkeit, $M_{u,ref}$, in Dezibel

$$L_{M,u} = 20 \log_{10} \frac{|\underline{M}_u|}{M_{u,ref}} \text{ dB} \quad (6)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit des **Übertragungsmaßes der Schallteilchengeschwindigkeit** ist Dezibel, dB.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Bezugswert der Empfindlichkeit, $M_{u,ref}$, ist $1 V \cdot s \cdot nm^{-1}$.

[QUELLE: ISO 18405:2017, Tabelle 1, modifiziert [2]]

3.18

Schalldruckgradient

∇p

Quotient der Schalldruckdifferenz und einer kleinen Strecke in einer gegebenen Richtung, verursacht durch Schalleinwirkung

3.19

Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten

$\underline{M}_{pg}$

<eines **Vektorempfängerkanals**> Quotient der Fourier-Transformierten des Ausgangsspannungssignals $\Im(U_{VR}(t))$ eines **Vektorempfängerkanals** und der Fourier-Transformierten des Signals des **Schalldruckgradienten** $\nabla p(t)$ für die festgelegte Frequenz und die festgelegte Richtung des Einfalls der ebenen Schallwelle am Ort des Bezugsmittelpunkts des **Vektorempfängers** im ungestörten Freifeld, wenn der **Vektorempfänger** entfernt wurde

$$\underline{M}_{pg} = \frac{\Im(U_{VR}(t))}{\Im(\nabla p(t))} \quad (7)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die **Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten** ist ein komplexwertiger Parameter. Für verschiedene Kanäle des **Vektorempfängers** ist der Druckgradient gleich seiner Komponente in der Richtung des **Vektorempfängerkanals**.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten** wird in Einheiten von Voltmeter je Pascal, V m Pa⁻¹, angegeben.

3.20 Übertragungsmaß des Schalldruckgradienten

$L_{M,pg}$
das Zwanzigfache des dekadischen Logarithmus des Verhältnisses des Betrags der **Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten** $|M_{pg}|$ eines **Vektorempfängerkanals** zu einem Bezugswert der Empfindlichkeit, $M_{pg,ref}$, in Dezibel

$$L_{M,pg} = 20 \log_{10} \frac{|M_{pg}|}{M_{pg,ref}} \text{ dB} \quad (8)$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Einheit des **Übertragungsmaßes des Schalldruckgradienten** ist Dezibel, dB.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Betrag der **Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten** ist gleich dem Produkt des Betrags der Schalldruckempfindlichkeit $\underline{M}_p$ und j/k (siehe Formel (9)).

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Bezugswert der Empfindlichkeit, $M_{pg,ref}$, ist 1 V m Pa⁻¹.

3.21 Wellenleiter

Einrichtung für die geführte Übertragung von Schall innerhalb vorgegebener Begrenzungen

4 Liste der Formelzeichen (Symbole)

a	Schallteilchenbeschleunigung
a_0	Beschleunigung der Senderfläche
A	Amplitude des Schalldrucks der Welle, die in $+\hat{x}$ -Richtung in einem Wanderwellenrohr fortschreitet
B	Amplitude des Schalldrucks der Welle, die in $-\hat{x}$ -Richtung in einem Wanderwellenrohr fortschreitet
c	Schallgeschwindigkeit in Wasser
c_f	Schallgeschwindigkeit im Freifeld
c_t	Schallgeschwindigkeit in einem Stehwellenrohr
D	Innendurchmesser eines Rohrs oder eines Wellenleiters
E	Elastizitätsmodul der Kammer eines Stehwellenrohrs
e_a	Leerlaufspannung des Referenzakzelerometers
E_0	Kompressionsmodul des Wassers
f	akustische Frequenz
h_0	Eintauchtiefe des Hydrophons im Wasser

a	Schallteilchenbeschleunigung
h	Eintauchtiefe des Vektorempfängers im Wasser
I_P	elektrischer Strom durch den Sender
I_T	elektrischer Strom durch den Wandler
j	Quadratwurzel von minus Eins
k	akustische Wellenzahl $k = 2\pi f / c$
K_i	Empfindlichkeitskoeffizient des optischen Interferometers
K	Umrechnungsfaktor vom Schallfeld der sphärischen zu dem der ebenen Welle
l	Länge des Wellenleiters in einem Rohr
$L_{M,a}$	Übertragungsmaß der Schallteilchenbeschleunigung eines Vektorempfängers
$L_{M,pg}$	Übertragungsmaß des Schalldruckgradienten eines Vektorempfängers
L_p	Schalldruckübertragungsmaß eines Hydrophons
$L_{M,u}$	Übertragungsmaß der Schallteilchengeschwindigkeit eines Vektorempfängers
$L_{M,\delta}$	Übertragungsmaß der Schallteilchenauslenkung eines Vektorempfängers
M_a	Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung eines Vektorempfängers
M_p	Schalldruckempfindlichkeit eines Hydrophons
M_{pg}	Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten eines Vektorempfängers
M_u	Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit eines Vektorempfängers
M_δ	Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung eines Vektorempfängers
M_0	Schalldruckempfindlichkeit des Referenz hydrophons
n	Anzahl von Referenz hydrophonen in einem Wanderwellenrohr
p_h	Schalldruck der Tiefe h in dem Stehwellenrohr
p_{pg}	Druckgradient im Schallfeld der ebenen Welle
p_i	Schalldruck , der durch das i^{th} Referenz hydrophon in einem Wanderwellenrohr wahrgenommen wird
∇p	Druckgradient
P_0	Größe des Schalldrucks in einem Wanderwellenrohr
r	Abstand zwischen Sender und Empfänger
R	Größe des Reflexionskoeffizienten der aktiven Impedanz in einem Wanderwellenrohr
s_{ea}	Empfindlichkeit des Referenzakzelerometers
S	Flächeninhalt
$\underline{S}$	Übertragungsmatrix des Wanderwellenrohrs
$\underline{S}_{ij}$	Koeffizient der Übertragungsmatrix des Wanderwellenrohrs
$\underline{S}_{I,P}$	Sendestromübertragungskoeffizient eines Senders
$\underline{S}_{I,T}$	Sendestromübertragungskoeffizient eines reziproken Wandlers
t	Zeit
T	Dicke der Kammer eines Stehwellenrohrs

a	Schallteilchenbeschleunigung
U_i	Leerlaufausgangsspannung, die durch das i^{th} Referenz hydrophon in einem Wanderwellenrohr wahrgenommen wird
U_O	Ausgangsspannung des optischen Interferometers
$U_{P,j}$	Ansteuerspannung, die an den j^{th} akustischen Sender in einem Wanderwellenrohr angelegt wird
U_{VR}	Ausgangsspannung des Vektorempfängerkanals
U_0	Ausgangsspannung eines Hydrophons oder Hydrophon-Paars
u	Schallteilchengeschwindigkeit
x_i	axiale Koordinate des i^{th} Referenz hydrophons in einem Wanderwellenrohr
Z_{PG}	elektrische Übertragungsimpedanz von Sender und Vektorempfänger
Z_{TG}	elektrische Übertragungsimpedanz von Wandler und Vektorempfänger
Z_{PT}	elektrische Übertragungsimpedanz von Sender und Wandler
δ	Schallteilchenauslenkung
ω	Kreisfrequenz
λ	Wellenlänge des Schalls in Wasser
ρ	Dichte eines akustischen Mediums
φ_{PG}	Phasenwinkel der elektrischen Übertragungsimpedanz von Sender und Vektorempfänger
φ_{TG}	Phasenwinkel der elektrischen Übertragungsimpedanz von Wandler und Vektorempfänger
φ_{PT}	Phasenwinkel der elektrischen Übertragungsimpedanz von Sender und Wandler

5 Empfindlichkeitsbeziehungen eines Vektorempfängerkanals

5.1 Empfindlichkeitsbeziehungen im Schallfeld der ebenen Welle

In Abhängigkeit von den erkannten Vektorparametern hat der Empfangskanal des **Vektorempfängers** verschiedene vektorielle Ausdrücke für die Empfindlichkeit wie **Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten**, **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit**, **Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung** und **Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung**.

Können diese Empfindlichkeiten nicht direkt gemessen werden, so kann ein Referenz**hydrophon** als Messnormal verwendet und die (skalare) Schalldruckempfindlichkeit des **Vektorempfängerkanals** bestimmt werden.

Die Beziehung zwischen diesen vektoriellen Empfindlichkeiten und der (skalaren) Schalldruckempfindlichkeit des **Vektorempfängerkanals** ist wie folgt: [3], [4]

$$M_p = -jkM_{pg} = \frac{M_u}{\rho c} = \frac{jkM_a}{\rho} = \frac{M_\delta}{j\omega\rho c} \quad (9)$$

Dabei ist M_p die Schalldruckempfindlichkeit, j die Quadratwurzel von minus Eins, k die akustische Wellenzahl, M_{pg} die **Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten**, M_u die **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit**, ρ die Dichte des Wassers, c die Schallgeschwindigkeit in

Wasser, M_a die **Empfindlichkeit der Schallteilchenbeschleunigung**, M_δ die **Empfindlichkeit der Schallteilchenauslenkung** und ω die Kreisfrequenz.

5.2 Umrechnung der Empfindlichkeit vom Schallfeld der sphärischen zu dem der ebenen Welle

Bei der Kalibrierung des **Vektorempfängers** im akustischen Fernfeld in einem Labor-Wassertank ist das erreichbare Schallfeld gewöhnlich das Schallfeld der sphärischen Welle, nicht das Schallfeld der ebenen Welle. In diesem Fall muss eine Umrechnung oder Korrektur durchgeführt werden, um die Empfindlichkeiten zu erhalten, die im Schallfeld der ebenen Welle definiert sind.

Der Umrechnungsfaktor zwischen der im Schallfeld der sphärischen Welle kalibrierten Empfindlichkeit und dem Schallfeld der ebenen Welle ist wie folgt: [3], [4]

$$K = 1 + \frac{1}{jkr} = 1 - j\frac{\lambda}{2\pi r} \quad (10)$$

Dabei ist j die Quadratwurzel von minus Eins, k die akustische Wellenzahl, r der Abstand zwischen Sender und Empfänger und λ die Wellenlänge des Schalls im Wasser.

Die Empfindlichkeit im Schallfeld der ebenen Welle ist der Quotient der im Schallfeld der sphärischen Welle kalibrierten Empfindlichkeit und des Umrechnungsfaktors.

6 Allgemeine Verfahren für die Kalibrierung

6.1 Allgemeine Kalibrieranforderungen

6.1.1 Arten der Kalibrierung

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

- Absolute Kalibrierung, bei der kein akustischer Bezugswandler erforderlich ist

Freifeld-Reziprozitätskalibrierung, Kalibrierung mittels optischer Interferometrie und Stehwellenrohrkalibrierung mittels eines Referenz-Akzelerometers werden hier verwendet. Die Freifeld-Reziprozitätskalibrierung beruht auf dem Prinzip der akustischen Reziprozität, wobei das Verfahren drei elektroakustische Wandler erforderlich macht, von denen mindestens einer ein reziproker Wandler sein muss. Die Kalibrierung mittels optischer Interferometrie und die Stehwellenrohrkalibrierung mittels eines Referenz-Akzelerometers beruhen auf der Messung physikalischer Parameter wie **Schallteilchengeschwindigkeit**, **Schallteilchenbeschleunigung** und **Schallteilchenauslenkung**. Dies sind primäre Kalibrierungen, die hauptsächlich rückverfolgbar auf elektrische Primärnormale sind und mit denen eine hohe Genauigkeit erreicht werden kann.

- Relative Kalibrierung, bei der ein kalibrierter akustischer Bezugswandler verwendet wird

Vergleichskalibrierung mittels Referenz**hydrophon**, horizontale Stehwellenrohrkalibrierung und Wanderwellenrohrkalibrierung werden hier verwendet. Die Kalibrierungen werden durch Vergleich mit einem weiteren akustischen Wandler durchgeführt, der bereits mit in IEC 60565-1:2020 und IEC 60565-2:2019 angegebenen absoluten Verfahren kalibriert worden ist. Die Genauigkeit ist im Vergleich zu einer absoluten Kalibrierung typischerweise beeinträchtigt, was hauptsächlich auf die zusätzliche Unsicherheit durch die akustische Bezugseinrichtung zurückzuführen ist.

6.1.2 Anforderungen an das akustische Feld

Damit Freifeldkalibrierungen gültig sind, müssen folgende allgemeine Anforderungen erfüllt sein:

- akustische Freifeldbedingungen, die einen minimalen Einfluss von Schallreflexionen von den Grenzen des Mediums erfordern (siehe IEC 60565-1:2020, 5.2);

- akustische Fernfeldbedingungen, die einen ausreichenden Trennabstand zwischen Sender und Empfänger erfordern (siehe IEC 60565-1:2020, 5.3);
- akustische stationäre Bedingungen, die ein Abklingen des transienten Verhaltens durch resonante Wandler erfordern (siehe IEC 60565-1:2020, 5.4).

Damit Stehwellenrohrkalibrierungen gültig sind, müssen folgende allgemeine Anforderungen erfüllt sein:

- akustische Bedingungen des Stehwellenschallfelds, die eine vernünftige Auslegung der Kalibrierkammer erfordern, um in dem starrwandigen Rohr eine stehende Schallwelle mit ausreichendem SNR (en: signal-to-noise ratio) zu erzeugen, insbesondere bei niedrigen Frequenzen (siehe 6.2.1);
- Bedingungen der Eintauchtiefe, die erfordern, dass die stehende Welle in der Kalibrierkammer erzeugt wird (siehe 6.2.2).

Damit Wanderwellenrohrkalibrierungen gültig sind, müssen folgende allgemeine Anforderungen erfüllt sein:

- akustische Bedingungen des Signal-Rausch-Verhältnisses, die ein ausreichend großes Signal-Rausch-Verhältnis im **Wellenleiter** des Wanderwellenrohrs erfordern, insbesondere bei niedrigen Frequenzen (siehe 6.3.1);
- akustische Bedingungen des Wanderwellenschallfelds, die eine vernünftige Auslegung des Kalibrierrohrs erfordern, um eine unidirektionale fortschreitende ebene Welle zu erzeugen, und die Wand des Wanderwellenrohrs ist starr im Verhältnis zum akustischen Medium (Wasser) (siehe 6.3.2).

6.2 Akustische Anforderungen an Stehwellenrohre

6.2.1 Anforderungen an das Schallfeld der stehenden Welle [5]

Der Aufbau der Kalibrierkammer eines vertikalen Stehwellenrohrs, das üblicherweise aus Stahl besteht und ein offenes oberes Ende aufweist, ist in Bild 2 dargestellt. Werden stetige Signale eingesetzt, so schwingt ein Sender am Boden der Rohrkammer sinusförmig, und Schallsignale müssen vertikal aufwärts zur Oberfläche erzeugt werden, die dann von der oberen Wasser-Luft-Schnittstelle reflektiert werden und die stehende Welle im Rohr erzeugen.

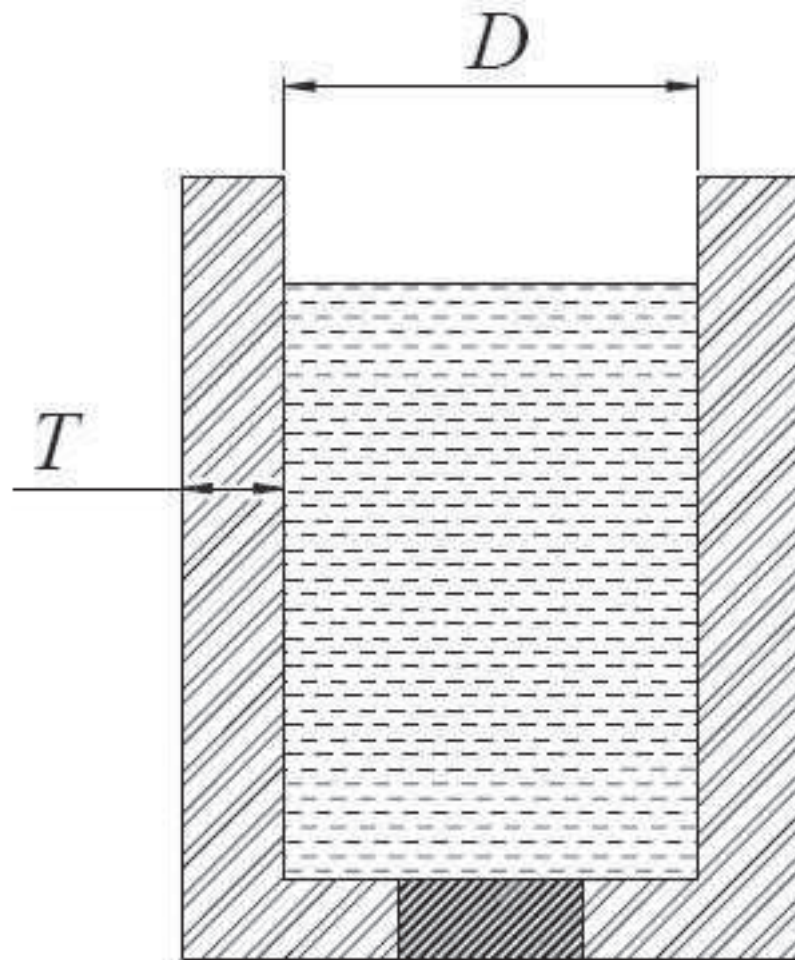


Bild 2 – Der Aufbau der Kalibrierkammer

Der Durchmesser der Kammer muss groß genug sein, dass der Montagering und der **Vektorempfänger** (siehe Bild 3) mit geringerem Einfluss auf das Schallfeld der stehenden Welle in die Kalibrierkammer eingetaucht werden können. Die Wand der Kalibrierkammer ist starr im Verhältnis zu den Medien (Wasser) im Innern der Kammer.

ANMERKUNG 1 Um die stehende Welle zu erzeugen, muss das Verhältnis des Innendurchmessers D und der Dicke T der Kalibrierkammer eines vertikalen Stehwellenrohrs die folgende Anforderung erfüllen:

$$\frac{2T}{D} \geq 0,4$$

ANMERKUNG 2 Bei Stehwellenrohrkalibrierung muss das Schallfeld der stehenden Welle in der Kammer stabil sein mit einer Verteilungsungleichmäßigkeit des Schallfelds von weniger als 0,7 dB.

ANMERKUNG 3 Während der Kalibrierung muss das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) größer sein als 20 dB, und ein elektrodynamischer (oder Schwingspulen-) Wandler, kein piezoelektrischer Wandler, wird als Quellenwandler bei niedrigen Frequenzen empfohlen.

6.2.2 Anforderungen an die Eintauchtiefe von Wandlern

Für die Kalibrierung werden normalerweise ein **Vektorempfänger** (und ein Referenzhydrophon) in einem Stehwellenrohr bis zu einer Tiefe h , die mit einer Messunsicherheit von weniger als 2 % gemessen werden muss, in das Wasser eingetaucht, wobei der Quellenwandler im Innern der Kalibrierkammer sinusförmig schwingt.

Vom **Vektorempfängerkanal** wird ein zu kalibrierendes Ausgangsspannungssignal erzeugt, das der Sinusfunktionsausdruck des Produkts der akustischen Wellenzahl k und der Eintauchtiefe h ist. Wenn $kh = 0.5(n + 1)\pi$ ($n=0,2,4,\dots$), ist die Ausgangsspannung des Empfängerkanals gleich Null.

Wird ein Referenz**hydrophon** verwendet, so ist seine Leerlaufspannung der Cosinusfunktionsausdruck des Produkts der akustischen Wellenzahl k und der Eintauchtiefe h . Wenn $kh = n\pi$ ($n=0,1,2,\dots$), ist die Leerlaufausgangsspannung des Referenz**hydrophons** ebenfalls gleich Null.

Um diese Nullen im Schallfeld zu vermeiden, muss die Tiefe h des in das vertikale Stehwellenrohr eingetauchten **Vektorempfängers** oder Referenz**hydrophons** weit entfernt von den Nullpositionen gewählt werden.

ANMERKUNG 1 Die akustische Wellenzahl k wird bestimmt durch die akustische Frequenz f und die Schallgeschwindigkeit c_t des Wassers im Stehwellenrohr. Wenn der Höchstwert des Schalldrucks bei der Eintauchtiefe von $h_{\max}$ gefunden werden kann, ist der Schalldruck an der Wasser-Luft-Fläche gleich Null, und $h_{\max}$ ist an der Position eines Viertels der Wellenlänge der Schallwelle. Dann kann die Schallgeschwindigkeit berechnet werden durch:

$$c_t = 4h_{\max}f$$

ANMERKUNG 2 Bei niedrigen Frequenzen ist die Wellenlänge der Schallwelle so groß, dass die Schallgeschwindigkeit in der Kalibrierkammer schwer zu messen ist, da ihre Länge begrenzt ist. Üblicherweise muss die Schallgeschwindigkeit bei einer verhältnismäßig hohen Frequenz gemessen und auf den gesamten interessierenden Frequenzbereich angewendet werden. Der Fehler der Schallgeschwindigkeit muss in der Messunsicherheit berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 3 Die Schallgeschwindigkeit in der Kalibrierkammer kann ebenfalls durch folgende Formel berechnet werden:

$$c_t = \frac{c_f}{\sqrt{1 + \frac{2E_0}{E} \cdot \frac{D}{2T}}}$$

Dabei ist c_f die Schallgeschwindigkeit des Mediums im Freifeld, E der Elastizitätsmodul der Kammer, E_0 der Kompressionsmodul des Mediums, T die Dicke der Kammer.

6.3 Akustische Anforderungen an Wanderwellenrohre

6.3.1 Anforderungen an die Signalart

Signale, die während des Aufbaus des ebenen fortschreitenden Wellenfeldes und während der Kalibrierung des **Vektorempfängers** verwendet werden, müssen stetig und zeitharmonisch sein.

Das Signal-Rausch-Verhältnis von stetigen, zeitharmonischen Signalen, die für die Kalibrierung von **Vektorempfängern** verwendet werden, muss mindestens 20 dB betragen.

ANMERKUNG Das Wanderwellenrohr sollte Verfahren zur Minimierung der Übertragung von Bodenschwingungen in den **Wellenleiter** aufweisen.

6.3.2 Anforderungen an das Wanderwellenrohr

Das Wanderwellenrohr muss unidirektionale, ebene fortschreitende Schallwellen im Innern eines flüssigkeitsgefüllten **Wellenleiters** erzeugen. Der Durchmesser des **Wellenleiters** muss ausreichend klein sein, dass radiale und azimutale Normalschwingungen nicht unterstützt werden. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn $kD/2 < 1$, wobei D der Durchmesser des **Wellenleiters** und k die akustische Wellenzahl sind. Das Wanderwellenrohr muss mit Wänden konstruiert sein, die starr im Verhältnis zum akustischen Medium sind.

ANMERKUNG 1 Das Wanderwellenrohr darf vertikal, horizontal oder in jedem anderen Winkel angeordnet sein, der praktisch für das Labor ist. Ein internes Schienensystem oder ein anderes Verfahren zur Installation von auf der Längsachse des **Wellenleiters** zu kalibrierenden **Vektorempfängern** sollte vorhanden sein.

ANMERKUNG 2 Das Wanderwellenrohr darf ein Verfahren zur Steuerung der Temperatur und/oder des hydrostatischen Drucks des akustischen Mediums im Innern des **Wellenleiters** bereitstellen. Außerdem sollte ein Verfahren zur Evakuierung der Luft aus dem **Wellenleiter** vorhanden sein.

ANMERKUNG 3 Das akustische Medium in einem Wanderwellenrohr darf Zusätze enthalten, um das Gefrieren des Mediums bei niedriger Temperatur zu verhindern. Zu dieser Zeit sollten die Schallgeschwindigkeit und die Dichte des Mediums gemessen werden.

6.4 Anforderungen an die Ausrüstung

6.4.1 Kalibriereinrichtung

Die verwendete Kalibriereinrichtung muss geeignet sein, die in 6.1, 2 beschriebenen akustischen Anforderungen über den beabsichtigten Frequenzbereich und für die zu prüfenden Arten von **Vektorempfängern** zu erfüllen.

Die Freifeld-Kalibriereinrichtung muss es ermöglichen, mindestens zwei Wandler gleichzeitig mit einem bekannten Trennabstand reproduzierbar zu positionieren und zur Kalibrierung entsprechend den Anforderungen in 6.1.2 auszurichten.

ANMERKUNG 1 Die häufigste Art der Freifeld-Kalibrierung basiert auf einem wassergefüllten Prüftank aus Beton, Stahl oder Holz (wodurch der Tank aufgrund der reflektierenden Begrenzung nachhallend ist) mit einem oder ohne einen reflexionsfreien Werkstoff. 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 des Prüftanks den zu kalibrierenden Frequenzbereich ein, wenn nicht anspruchsvolle Signalverarbeitungstechniken verwendet werden.

Die Stehwellenrohr-Einrichtung muss es ermöglichen, einen **Vektorempfänger** und/oder ein **Hydrophon** in das vertikale Stehwellenrohr in Übereinstimmung mit den Anforderungen in 6.2.2 bei bekannter Tiefe einzutauchen und für die Kalibrierung zu befestigen.

ANMERKUNG 2 Die Stehwellenrohr-Kalibriereinrichtung hat zwei Bauarten: vertikales Stehwellenrohr und horizontales Stehwellenrohr, und ist üblicherweise aus nichtrostendem Stahl gefertigt. Das vertikale Stehwellenrohr ist ein zylindrisches Rohr mit offenem oberem Ende und einem Sender am Boden des Rohrs zur Erzeugung des vertikalen Stehwellenschallfelds. Das horizontale Stehwellenrohr ist ein zylindrisches Rohr mit einer Öffnung zur Installation der Wandler und zwei Sendern an beiden Enden des Rohrs zur Bildung des horizontalen Stehwellenschallfelds.

6.4.2 Messgeräte

Die folgende Messausrüstung ist erforderlich, um eine Kalibrierung des **Vektorempfängers** durchzuführen. Sie muss eine Leistungsfähigkeit haben, die den beabsichtigten akustischen Frequenzbereich für die Kalibrierungen umfasst (das ist ein Maximum von 5 Hz bis 10 kHz, darf aber je nach Anwendung ein schmalerer Bereich sein).

6.4.2.1 Signalquelle

Diese muss verwendet werden, um das elektrische Signal bereitzustellen, das 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 torgesteuerten Impulspaketen einer einzelnen Frequenz.

6.4.2.2 Leistungsverstärker

Dieser muss erforderlich sein, um den als Sender verwendeten Wandler mit ausreichender elektrischer Leistung anzusteuern, damit am **Vektorempfänger** Signalschalldrücke 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 **Vektorempfängern** ausreichend, aber für speziellere Anwendungen kann manchmal ein höheres Leistungsvermögen erforderlich sein.

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

6.4.2.3 Strommessgerät

Das Strommessgerät muss erforderlich sein, wenn der elektrische Ansteuerungsstrom durch den Sender gemessen wird (zum Beispiel während einer Freifeld-Reziprozitätskalibrierung). Dieses muss vorzugsweise aus einem kalibrierten Stromwandler bestehen, der eine dem elektrischen Strom proportionale Ausgangsspannung liefert (dabei wird die Spannung anschließend vom Digitalisierer gemeinsam mit der Ausgangsspannung des **Vektorempfängers** oder der Leerlaufspannung des **Hydrophons** gemessen).

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

6.4.2.4 Vorverstärker

Dieser muss erforderlich sein, um die elektrische Ausgangsspannung vom **Vektorempfänger** oder **Hydrophon** zu verstärken, und hat im Idealfall eine elektrische Eingangsimpedanz, die mindestens um den Faktor 100 größer ist als die Impedanz des **Hydrophons** (da die elektrische Impedanz eines piezoelektrischen **Hydrophons** überwiegend kapazitiv ist, muss die Eingangskapazität des Vorverstärkers ausreichend klein sein).

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

ANMERKUNG 2 Gewöhnlich hat der **Vektorempfänger** eingebaute integrierte Vorverstärker, wenn dies auch auf das **Hydrophon** zutrifft, wird kein getrennter Vorverstärker mehr benötigt.

6.4.2.5 Filter

Das Filter muss erforderlich sein, um die vom **Vektorempfänger** oder **Hydrophon** abgegebene elektrische Spannung nach der Verstärkung durch den Vorverstärker zu filtern.

ANMERKUNG 1 Das Filter kann als Hochpass, Tiefpass oder Bandpass ausgelegt sein, mit verschiedenen Steilheiten der Außerband-Dämpfung wie 12 dB/Okt, 24 dB/Okt und 48 dB/Okt, gewöhnlich wird ein Bandpassfilter verwendet.

ANMERKUNG 2 Wenn das Analogfilter nicht verfügbar ist, kann stattdessen ein Digitalfilter verwendet werden.

6.4.2.6 Digitalisierer

Der eingesetzte Digitalisierer muss ein Analog-Digital-Wandler (en: analog-to-digital converter, ADC) oder ein digitalisierendes Oszilloskop sein, der bzw. das eine digitale Wellenform als Aufzeichnung der elektrischen Signale während der Kalibrierung erfasst (z. B. Ausgangsspannung des **Vektorempfängerkanals**, 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. Der Digitalisierer muss extern ausgelöst werden können (üblicherweise durch die Signalquelle oder einen Computer). Bei der Durchführung absoluter elektrischer Messungen muss der Digitalisierer über den gesamten Betriebsbereich kalibriert werden.

6.4.2.7 Optisches Interferometer

Das optische Interferometer muss erforderlich sein, um die Bewegung des Pellikels bei der Freifeldkalibrierung und der Wasseroberfläche bei der Stehwellenrohrkalibrierung zu messen. Im Kalibrierfrequenzbereich muss das optische Interferometer einen stabilen Frequenzgang der Empfindlichkeit aufweisen. Der Dynamikbereich des optischen Interferometers muss 100 dB oder größer sein, um akkurate Messungen der **Schallteilchengeschwindigkeit** zu erreichen.

ANMERKUNG Die Ausgangsspannung des optischen Interferometers darf über mehrere Skalen für die Bewegungsmessung für verschiedene Fälle verfügen, um eine gute Wellenform für Anzeige und Erfassung zu erhalten.

6.4.2.8 Rechnersteuerung

Die Kalibrierung sollte mittels eines Rechners gesteuert werden, auf dem eine geeignete Erfassungssoftware läuft, die den Digitalisierer und die Signalerfassung steuert (und die auch die Auslösung 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 Amplituden der aufgezeichneten Signale. Einige dieser Funktionen dürfen jedoch bereits mit der integrierten Verarbeitung ausgeführt werden, die in den digitalisierenden Oszilloskopen zur Verfügung steht.

ANMERKUNG 2 Obwohl einige der oben genannten Messaufgaben manuell ausgeführt werden können (beispielsweise mit einem analogen Oszilloskop), wird diese Vorgehensweise nicht empfohlen.

6.4.2.9 Sender

Während der Kalibrierungen ist zur Verwendung als Sender und **Vektorempfänger** eine Anzahl von Wandlern erforderlich. Beispielsweise erfordert die Drei-Wandler-Freifeld-Reziprozitätskalibrierung mindestens zwei Wandler zusätzlich zu dem zu prüfenden Gerät (siehe 9.1) sowie die Vergleichskalibrierung mit einem kalibrierten Referenz**hydrophon** und einem Sender zum Erzeugen eines geeigneten akustischen Freifelds (siehe 9.3).

Bei niedrigen Frequenzen erfordert die Kalibrierung mit einem Referenzakzelerometer in einem vertikalen Stehwellenrohr mindestens einen Wandler am Boden des Rohrs zusätzlich zu dem zu prüfenden Gerät (siehe 10.1), sowie die Vergleichskalibrierung mit einem kalibrierten Referenz**hydrophon** und einem Sender zum Erzeugen eines geeigneten Feldes von Schallwellen (siehe 10.2).

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

6.4.2.10 Referenzhydrophon

Hydrophon, das stabil ist und kalibriert durch absolute Kalibrierverfahren mit geringen Messunsicherheiten wie das Freifeld-Reziprozitätsverfahren, das Verfahren mit schwingender Säule und das Akustikkoppler-Verfahren usw. Es kann für die Kalibrierung der **Vektorempfänger** durch relative Kalibrierung verwendet werden.

6.4.2.11 Referenzakzelerometer

Akzelerometer, das stabil ist und durch absolute Kalibrierverfahren mit geringen Messunsicherheiten kalibriert. Es kann für die Messung der Beschleunigung an der Oberfläche des Senders am Boden der Kammer des Rohrs verwendet werden.

6.5 Positionierung und Ausrichtung

6.5.1 Koordinatensystem

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

6.5.2 Bezugsrichtung

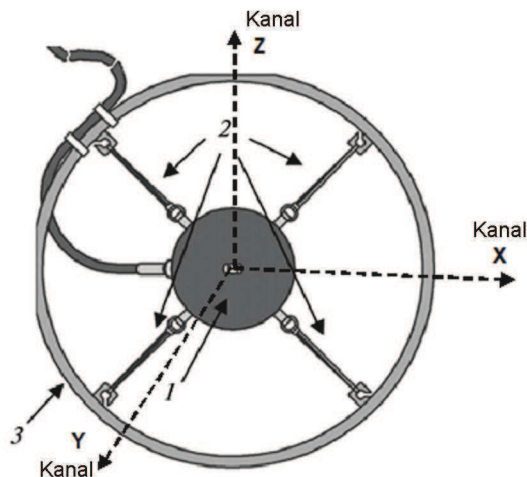
Vor der Kalibrierung muss für jeden Wandler eine Bezugsrichtung festgelegt werden. Die Bezugsrichtung muss so ausgewählt werden, dass sie mit der Hauptachse des Wandlers [wie in IEC 60500:2017 definiert] übereinstimmt, sofern es keinen gegenteiligen Grund gibt.

ANMERKUNG Ein **Vektorempfänger** darf eine, zwei oder drei Bezugsrichtungen haben, abhängig von seinen verschiedenen Maßen.

6.5.3 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. Das gleiche gilt für die Halterung des **Schalldruckgradienten-Empfängers**.

Bei einem **Vektorempfänger**, der mit dem **Schallteilchen** im Feld der Schallwelle mitschwingt, muss der Sensor mithilfe von elastischem Material (wie Gummi) an einer Kalibrierhalterung (wie einem Montagering) aufgehängt sein (siehe Bild 3), und die Kalibrierhalterung muss fest an einer Halterung angebracht sein. [6-7]



1 – dreidimensionaler **Vektorempfänger**, 2 – Gummi, 3 – Montagering

Bild 3 – Mitschwingender Vektorempfänger, aufgehängt an einem Montagering

ANMERKUNG 1 Die Größe des für die Aufhängung verwendeten Montagerings des **Vektorempfängers** muss groß genug sein, um den Einfluss auf die Schwingung des **Vektorempfängers** zu minimieren. Der Montagering muss jedoch in der Eintauchtiefe angeordnet werden, deren Größe eine Begrenzung für den auf hohe Frequenzen erweiterten akustischen Frequenzbereich darstellt.

ANMERKUNG 2 Andere Mittel zur Aufhängung des **Trägheits-Vektorempfängers** können ebenfalls verwendet werden. Die Resonanzfrequenz des Aufhängungssystems (einschließlich Montagering, elastischem Material und **Vektorempfänger**) muss weit vom interessierenden Frequenzbereich entfernt liegen.

Die stützende Halterung für Wandler muss so ausgewählt werden, dass sie einen minimalen Einfluss auf die gemessene Empfindlichkeit hat, soweit sie der vorstehenden Anforderung an die genaue Positionierung der Wandler entspricht.

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

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Halterung die gemessene Empfindlichkeit beeinflusst, muss der Wandler in derselben Halterung kalibriert werden, die für Messungen mit dem Gerät am Einsatzort 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 Halterung ist es ratsam, keine luftgefüllten Halterungen oder Stangen zu verwenden. Nach Möglichkeit wird die Anwendung von frei schwimmenden Unterlagen wie Hohlstangen empfohlen, die aus Kohlenstofffasern oder Kunststoffen gebaut sind. Dabei ist jedoch zu beachten, dass für jede Halterung zur präzisen Positionierung und Ausrichtung eine bestimmte Steifigkeit erforderlich ist.

ANMERKUNG 2 Es sollte darauf geachtet werden, dass der Körperschall, der von der Halterung und dem Gestell aufgenommen und an die Wandler weitergeleitet werden könnte, so gering wie möglich ist.

6.5.4 Ausrichtung

Vor jeder akustischen Messung während der Kalibrierung im Freifeld muss das jeweilige Wandlerpaar (zum Beispiel ein Sender und ein **Vektorempfänger**) in der gleichen Wassertiefe positioniert und so ausgerichtet sein, dass die Bezugsrichtungen der Wandler ausgerichtet sind.

Während der Stehwellenrohrkalibrierung ist die Bezugsrichtung entlang der axialen Richtung der Kalibrierkammer. Um den symmetrischen **Vektorempfänger** zu kalibrieren, muss seine Bezugsrichtung vertikal zum Sender am Boden der Kalibrierkammer ausgerichtet sein.

ANMERKUNG 1 Diese Ausrichtung darf entweder mechanisch mit speziellen Befestigungsstangen oder Aufstellung oder mit einem automatisierten Positionierungssystem (zum Beispiel mit Schrittmotoren und Steuerungen) erfolgen. Es ist zu beachten, dass die Längen der Befestigungsstangen zum Bezugsmittelpunkt des **Vektorempfängers** oder **Hydrophons** 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 **Richtungsempfindlichkeit** gewählt, in dem sich das Ansprechvermögen 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 den Bezugsmittelpunkt des Wandlers verläuft, mit einem in das Gestell oder Positionierungssystem eingebauten Drehtisch.

6.6 Darstellung des Frequenzgangs

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

6.7 Frequenzbeschränkungen

6.7.1 Obere Frequenzgrenze

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

- Bei der Freifeldkalibrierung ist die hauptsächliche Einschränkung bei hohen Frequenzen die Arbeitsfrequenz eines **Vektorempfängers**, derzeit liegt die höchste akustische Frequenz eines idealen **Vektorempfängers** bei etwa 10 kHz. Diese wird jedoch im Fall einer nicht-idealen Auslegung durch die Resonanz der äußeren Hülle verringert.
- Bei der Stehwellenrohrkalibrierung ist die hauptsächliche Einschränkung bei hohen Frequenzen der Durchmesser der Kammer des Rohrs, der kleiner sein muss als ein Viertel der Wellenlänge der höchsten akustischen Frequenz. Zusätzlich muss die Größe des Montagerings klein genug sein, um den Einfluss auf das Feld der Schallwelle auf ein Mindestmaß zu verringern.
- Bei der Wanderwellenrohrkalibrierung wird die hauptsächliche Einschränkung bei hohen Frequenzen durch den Durchmesser des **Wellenleiters** bestimmt, der ausreichend kleiner sein muss als die akustische Wellenlänge.

ANMERKUNG Das Verfahren darf nicht bei Frequenzen oberhalb des oberen Frequenzgrenzwerts angewendet werden, der durch die radialen oder azimuthalen akustischen Moden auferlegt wird, die auftreten können, wenn der Durchmesser des **Wellenleiters** nicht klein ist im Verhältnis zu einer akustischen Wellenlänge. Radiale und azimuthale akustische Moden verursachen akustische Druckgradienten in der Ebene, die normal zur **Wellenleiterachse** liegt, so dass der Ausgangspegel des **Vektorempfängers** und des Referenz**hydrophons** von ihren radialen und azimuthalen Positionen im **Wellenleiter** abhängt.

6.7.2 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.

- Bei der Freifeldkalibrierung sind die hauptsächlichen Beschränkungen bei niedrigen Frequenzen der Gütefaktor des Senders und die echofreie Zeit des Prüftanks, insbesondere die echofreie Zeit. Für die meisten Prüftankeinrichtungen mit einem Mindestmaß von 5 Metern oder mehr liegt die praktische untere Frequenzgrenze für die Kalibrierung von **Hydrophonen** bei etwa 1 kHz (siehe IEC 60565-1:2020, Anhang E). Der vom Sender erzeugte Signalpegel der Schallwelle könnte außerdem mit abnehmender Frequenz verringert sein, so dass der Rauschabstand schließlich kleiner als 6 dB ist und dadurch die niedrigste Frequenz für Kalibrierungen begrenzt.

ANMERKUNG 1 Bei Dauerschallsignalen in reflexionsarmen Tanks kann die Wirksamkeit der reflexionsarmen Auskleidung bei niedrigeren Frequenzen möglicherweise abnehmen und schränkt damit die Fähigkeit zum Erreichen von Freifeldbedingungen ein.

ANMERKUNG 2 Die untere Frequenzgrenze für die Freifeldkalibrierung in nachhallenden Tanks kann durch die Anwendung moderner Signalverarbeitungstechniken erweitert werden. [8-11]

- Bei der Stehwellenrohrkalibrierung ist die hauptsächliche Einschränkung bei niedrigen Frequenzen der geringe Rauschabstand, weshalb der Sender am Boden der Rohrkammer keine Signale übertragen kann, die groß genug sind, um einen Rauschabstand von 20 dB zu erreichen.
- Bei der Wanderwellenrohrkalibrierung wird die hauptsächliche Einschränkung bei niedrigen Frequenzen durch den von den Referenz**hydrophonen** abgetasteten Abstand und das Signal-Rausch-Verhältnis im Innern des **Wellenleiters** bestimmt.

ANMERKUNG 3 Das Verfahren kann bei Frequenzen unterhalb der unteren Frequenzgrenze nicht verwendet werden, die entweder durch den Verlust der Übertragungsempfindlichkeit des akustischen Senders und die gleich große Verringerung des Signal-Rausch-Verhältnisses im Innern des **Wellenleiters** diktiert wird, oder der Phasengradient entlang der durch das Referenz**hydrophon** aufgespannten Länge kann aufgrund von Unsicherheiten in den axialen Verschiebungen x_i oder Phasengängen der Referenz**hydrophone** nicht aufgelöst werden.

6.8 Überprüfungen auf akustische Interferenz

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

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

ANMERKUNG 1 Weitere Einzelheiten zum Einfluss von Reflexionen sind in IEC 60565-1:2020, Anhang E angegeben.

ANMERKUNG 2 Werden in einer grafischen Darstellung der elektrischen Übertragungsimpedanz (oder der Empfindlichkeit) über der Frequenz glatte periodische Welligkeiten beobachtet, so weist dies darauf hin, dass es wahrscheinlich akustische Reflexionen gibt, die zu positiven und negativen Überlagerungseffekten führen. Ist der Frequenzabstand zwischen aufeinanderfolgenden Spitzen in der abgetragenen Kurve Δf , und c ist die Schallgeschwindigkeit im Medium, so kann die Wegdifferenz Δd zwischen dem direkten und dem reflektierten Signal, die am empfangenden Wandler eintreffen, berechnet werden durch $\Delta d = c / \Delta f$

ANMERKUNG 3 Die Schwingungen, die von einem reflektierten akustischen Signal mit einer Wegdifferenz verursacht werden, können durch fortgeschrittene Signalverarbeitungstechniken wie das CMWA-Verfahren oder das FDFP-Verfahren beseitigt werden.

7 Elektrische Messungen

7.1 Signalart

Das vorgegebene elektrische Signal für die Kalibrierung ist entweder ein Dauerschallsignal (sinusförmig) oder ein tonfrequentes Schwingungsimpulssignal (torgesteuerte Sinuswelle).

Unabhängig von der gewählten Signalart gelten weiterhin die Anforderungen von 6.1.2. Es ist zu beachten, dass die Anforderungen für das Erreichen eines akustischen Freifelds je nach verwendeter Signalart unterschiedlich sind.

ANMERKUNG Andere Signalarten sind möglich, wie 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 durch Fourier-Transformation, so hängt die Frequenzauflösung von der Länge der Signalaufzeichnung ab.

7.2 Elektrische Erdung

Zur Vermeidung von Erdschleifen müssen die elektrischen Anschlüsse der Wandler vor dem Kontakt mit Wasser geschützt werden. Freiliegende Metallteile eines **Vektorempfängers** oder **Hydrophons** müssen die einzige Erdverbindung für die Kabelschirmung des Wandlers und den Vorverstärker des Wandlers darstellen. Jeglicher sonstiger Erdkontakt muss ausgeschlossen sein.

7.3 Messung der Ausgangsspannung des Wandlers

7.3.1 Allgemeines

Die Ausgangsspannung von **Hydrophon** und **Vektorempfänger** muss am Ende des Kabels gemessen werden. Die ausgewählten elektrischen Anschlüsse müssen festgelegt sein (siehe IEC 60500:2017).

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen muss die Wellenform der **Hydrophon-** und **Vektorempfängerspannung** 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 digitalisierenden Oszilloskop oder einem rechnergestützten Analog-Digital-Umsetzer vorgenommen werden.

Wird ein Verstärker, ein Dämpfungsglied oder ein Filter in Kombination mit dem Spannungsmessgerät oder Digitalisierer verwendet, 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 (zum Beispiel beide als Scheitelspannungen oder beide als Spannungseffektivwerte).

7.3.2 Signalanalyse

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen muss die Signalamplitude (und falls erforderlich die Signalphase) aus der zeitgefensterten Spannungswellenform des **Vektorempfängerkanals** oder **Hydrophons** bestimmt werden; wobei das Zeitfenster auf dem stationären Teil des echofreien Signals positioniert ist. Der Beginn des Zeitfensters muss auf der Wellenform nach dem Abklingen aller Anlauftransienten des Senders positioniert werden, 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). (Siehe IEC 60565-1:2020, Anhang E.)

7.3.3 Elektrische Belastung durch das Messgerät

Bei den Messungen müssen das **Hydrophon** oder der **Vektorempfänger** ohne eingebauten Vorverstärker so an ein Messgerät mit einer hohen elektrischen Eingangsimpedanz (Vorverstärker, Spannungsmessgerät, Oszilloskop oder Digitalisierer) angeschlossen werden, dass die elektrische Eingangsimpedanz viel größer als die elektrische Impedanz des **Vektorempfängers** ist (im Idealfall mehr als das 100-fache).

Bei der Messung des Phasenwinkels der Ausgangsspannung des empfangenden Wandlers muss die elektrische Eingangsimpedanz des Messgeräts im Idealfall mehr als 1 000-fach größer als die elektrische Impedanz des empfangenden Wandlers sein.

Ist die elektrische Impedanz des empfangenden Wandlers hoch, so muss die elektrische Belastung des empfangenden Wandlers 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. (Siehe IEC 60565-1:2020, Anhang C.)

7.3.4 Elektrische Belastung durch Verlängerungskabel

Wenn ein Verlängerungskabel von einiger Länge am **Hydrophon** angeschlossen ist, belastet dieses Kabel das **Hydrophon** elektrisch, und es muss eine Korrektur vorgenommen werden, um die Leerlaufspannung des **Hydrophons** am Kabelende zu erhalten. (Siehe IEC 60565-1:2020, Anhang C.)

7.3.5 Elektrisches Rauschen

Das Signal-Rausch-Verhältnis muss ausreichend sein, damit die Messungen ohne wesentlichen Genauigkeitsverlust durchgeführt werden könnten. Die gemessenen Werte des Schalls sollten mindestens 6 dB größer als der Rauschdruck bei äquivalenter Bandbreite sein (siehe IEC 60500:2017).

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

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

ANMERKUNG 2 Bei Anwesenheit von elektrischem Rauschen kann der Rauschabstand verbessert werden, indem sich wiederholende Signale kohärent gemittelt werden. Bei weißem Rauschen verbessert die Mittelung der Signale (N -fach) das Signal-Rausch-Verhältnis um den Faktor $\sqrt{N}$ (die Wurzel von N).

7.3.6 Übersprechen

Bei kohärenter Interferenz aus elektrischem Übersprechen führen Signalmittelung und Schmalbandfilterung im allgemeinen nicht zu einer Verbesserung der Genauigkeit. In derartigen Fällen müssen deshalb Anstrengungen unternommen werden, um die Ursache des Problems zu ermitteln und Vorkehrungen zu treffen, um die Auswirkungen durch geeignete elektrische Erdung, zum Beispiel der Kabel für die Senderansteuerung, auf ein Mindestmaß zu verringern.

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 Schwingungsimpulssignals größer als die akustische Laufzeit ist. Wenn sich das Übersprechen nicht durch eine geeignete Erdung beseitigen lässt, muss die Länge der Schwingungsimpulssignale soweit verringert werden, dass es nicht zu einer zeitlichen Überschneidung mit dem akustischen Signal kommt.

7.3.7 Eingebaute Vorverstärker

Gewöhnlich besitzt ein **Vektorempfänger** einen eingebauten Vorverstärker, und die Empfindlichkeit des **Vektorempfängers** muss als Empfindlichkeit am Kabelende ausgedrückt werden (einschließlich des Betriebsverhaltens des Vorverstärkers als Teil des Geräts). Dies gilt ebenfalls für ein **Hydrophon** mit eingebautem Vorverstärker.

7.4 Messung des Ansteuerstroms des Senders

7.4.1 Messgeräte

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

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen 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 digitalisierenden Oszilloskop oder einem rechnergestützten Analog-Digital-Umsetzer gemessen werden.

Wenn ein Verstärker, ein Dämpfungsglied oder ein 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 des Spannungsverhältnisses 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.

7.4.2 Signalanalyse

Bei tonfrequenten Schwingungsimpulssignalen muss die Signalamplitude (und falls erforderlich die Signalphase) aus der zeitgefensterten Spannungswellenform des Stromwandlers bestimmt werden, wobei das Zeitfenster auf dem stationären Teil des echofreien Signals positioniert ist. Der Beginn und das Ende des Zeitfensters müssen auf der Wellenform an den gleichen Stellen positioniert werden, wie sie für die Spannung des empfangenden Wandlers ausgewählt wurden (siehe 7.3.2).

8 Vorbereitung der Messung

8.1 Vorbereitung der Wandler

8.1.1 Eintauchen

Die Wandler müssen vor der Kalibrierung für eine kurze Zeit eingetaucht werden, die ausreicht, um einen Temperaturangleich mit dem Wasser zu ermöglichen.

Ist die Lufttemperatur, bei der die Wandler gelagert und vorbereitet werden, nahezu gleich der Wassertemperatur (wie es bei einem Innenraum-Prüftank der Fall wäre), so kann die Eintauchdauer auf wenige Minuten verkürzt werden. In Fällen, in denen die Wassertemperatur deutlich unter der Lufttemperatur im Laboratorium liegt (wie es bei einer Freiwasseranlage unter Winterbedingungen der Fall sein kann), wird jedoch eine Eintauchdauer von mindestens 30 Minuten empfohlen.

8.1.2 Benetzung

Ein Mittel zur Benetzung wie ein mildes Reinigungsmittel, das die Oberflächenspannung des Wassers verringert und die Adhäsion von Blasen zur Oberfläche behindert, muss vor dem Eintauchen in das Wasser auf der gesamten Oberfläche der Wandler angewendet werden, um die Wirkung von Gasblasen oder eingeschlossener, an ihrer Oberfläche haftender Luft zu verringern. Wenn der Wandler in Wasser eingetaucht und dann schnell wieder herausgenommen wird, dürfen keine trockenen Flecken auf ihm sichtbar sein.

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

8.2 Umgebungsbedingungen (Temperatur und Tiefe)

Wird die Empfindlichkeit eines **Vektorempfängers** für bestimmte Bedingungen der Wassertemperatur und der Eintauchtiefe gefordert, so muss der **Vektorempfänger** entweder:

- 1) unter denselben Bedingungen von Temperatur und Druck kalibriert werden, bei denen er am Einsatzort eingesetzt wird; oder
- 2) es sind Korrekturen an seinen Werten der Empfindlichkeit 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 Die Empfindlichkeit einiger **Vektorempfänger** kann sich mit der Umgebungstemperatur und mit der Eintauchtiefe (aufgrund des erhöhten hydrostatischen Drucks) verändern. Die Fähigkeit zur Durchführung von Kalibrierungen in einem Wertebereich von Temperatur und Tiefe ist relativ selten und macht spezielle Einrichtungen erforderlich.

ANMERKUNG 2 Die Umgebungsbedingungen, die in einem Innenraum-Prüftank vorliegen, können wahrscheinlich nicht die Bedingungen im Ozean (zum Beispiel 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, sollte die bei der Kalibrierung im Tank erhaltene Empfindlichkeit korrigiert werden (mit einer geeigneten hinzugefügten Unsicherheitskomponente, die die Unsicherheit in der Korrektur wiedergibt).

ANMERKUNG 3 Bei Messungen in Freiwasseranlagen sind die Umgebungsbedingungen (Wassertemperatur oder -tiefe) möglicherweise nicht die gleichen wie bei der vorgesehenen Endanwendung. Wenn eine Schätzung des Betriebsverhaltens unter den Bedingungen gefordert wird, die bei der vorgesehenen Endanwendung herrschen, sollte die bei der Kalibrierung in der Freiwasseranlage erhaltene Empfindlichkeit korrigiert werden (mit einer geeigneten hinzugefügten Unsicherheitskomponente, die die Unsicherheit in der Korrektur wiedergibt).

9 Freifeld-Kalibrierung

9.1 Freifeld-Reziprozitätskalibrierung

9.1.1 Allgemeines

Dieses Verfahren beschreibt ein absolutes Verfahren zur Freifeld-Reziprozitätskalibrierung für **Vektorempfänger** für akustische Wellen. Beruhend auf dem Prinzip der akustischen Reziprozität, müssen drei elektroakustische Wandler verwendet werden, von denen mindestens einer ein reziproker Wandler sein muss. Das Verfahren kann im Labor-Wassertank im Frequenzbereich von 250 Hz bis 10 kHz verwendet werden. Es ist ein primäres Verfahren für die Kalibrierung des **Übertragungsmaßes des Schalldruckgradienten** des Empfangskanals von **Vektorempfängern**. [6], [12-16]

ANMERKUNG Normalerweise müssen, um das Freifeld-Übertragungsmaß für Frequenzen unter einem oder zwei Kilohertz im Labor-Wassertank zu erreichen, fortgeschrittene Signalverarbeitungstechniken angewendet werden.

9.1.2 Prinzip

Für die Freifeld-Reziprozitätskalibrierung werden drei Wandler verwendet. Der Einfachheit halber können die Wandler bezeichnet werden als P (Sender), G (**Vektorempfänger**) und T (reziproker Wandler), und die Wandler müssen in drei Messkonfigurationen gepaart werden, wie in IEC 60565-1:2020, Bild 1 dargestellt.

Bild 4 zeigt das Messkonzept zur Freifeld-Reziprozitätskalibrierung von **Vektorempfängern**. Für jede Messkonfiguration muss das Wandlerpaar im Wasser positioniert werden, getrennt durch einen bekannten Abstand und mit zueinander ausgerichteten Achsen.

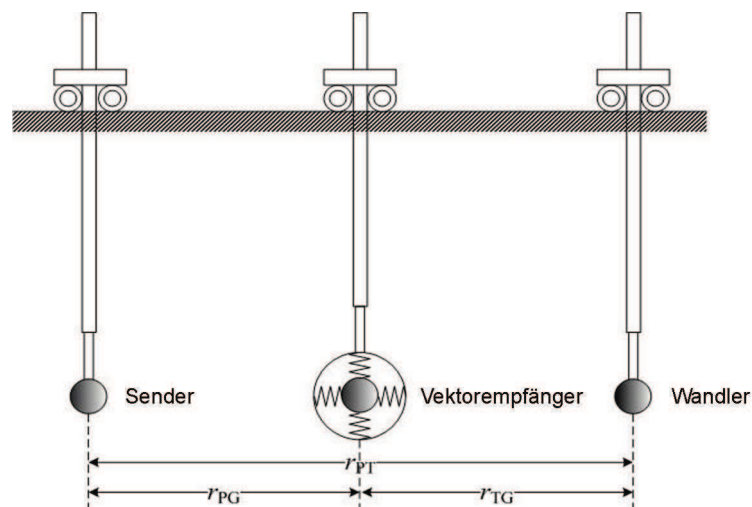


Bild 4 – Messkonzept zur Freifeld-Reziprozitätskalibrierung von Vektorempfängern

Für alle Konfigurationen müssen die Anforderungen für akustische Freifeldbedingungen, Fernfeldbedingungen und stationäre Bedingungen erfüllt sein. Die elektrische Übertragungsimpedanz jedes Wandlerpaars muss bei der gewünschten Anzahl von über den gesamten interessierenden Frequenzbereich verteilten Frequenzen bestimmt werden.

Angenommen, es fließt ein Signalstrom $I_P(t)$ durch einen Sender P mit einem Sende-Stromübertragungskoeffizienten $S_{I,P}$. In einem Abstand r_{PG} von seinem Bezugsmittelpunkt und in der Bezugsrichtung, die in der Definition von $S_{I,P}$ festgelegt ist, gibt der **Vektorempfänger** eine Signalspannung $U_{PG}(t)$ ab, und die elektrische Übertragungsimpedanz dieses Wandlerpaars im sphärischen Feld von Schallwellen ist gegeben durch:

$$\underline{Z}_{PG} = \frac{\Im(U_{PG}(t))}{\Im(I_P(t))} = \frac{-jk\underline{K}(r_{PG})\underline{S}_{I,P}\underline{M}_{pg}}{r_{PG}} e^{jk(r_{PG}-r_0)} \quad (11)$$

Dabei ist j die Quadratwurzel von minus Eins, k die akustische Wellenzahl, $\underline{K}$ der Umrechnungsfaktor zwischen dem Schallfeld der sphärischen Welle und dem Schallfeld der ebenen Welle, $\underline{M}_{pg}$ die **Empfindlichkeit des Schalldruckgradienten des Vektorempfängers**, r_0 gleich 1 Meter.

Dann wird der **Vektorempfänger** G in einem anderen Schallfeld angeordnet, das durch den reziproken Wandler T erzeugt wird, der Bezugsmittelpunkt des **Vektorempfängers** G befindet sich in einem Abstand r_{TG} vom Bezugsmittelpunkt des Wandlers T. Ein Signalstrom $I_T(t)$ fließt durch den Wandler T mit einem Sende-Stromübertragungskoeffizienten $\underline{S}_{I,T}$, der **Vektorempfänger** gibt eine Signalspannung $U_{TG}(t)$ ab, und die elektrische Übertragungsimpedanz dieses Wandlerpaars im Schallfeld der sphärischen Welle ist gegeben durch:

$$\underline{Z}_{TG} = \frac{\Im(U_{TG}(t))}{\Im(I_T(t))} = \frac{-jk\underline{K}(r_{TG})\underline{S}_{I,T}\underline{M}_{pg}}{r_{TG}} e^{jk(r_{TG}-r_0)} \quad (12)$$

Schließlich wird der reziproke Wandler T in dem Schallfeld angeordnet, das durch den Sender P erzeugt wird, der Bezugsmittelpunkt des reziproken Wandlers T befindet sich in einem Abstand r_{PT} vom Bezugsmittelpunkt des Senders P. Ein Strom $I_P(t)$ fließt durch den Sender P mit einem Sende-Stromübertragungskoeffizienten $\underline{S}_{I,P}$, der **Vektorempfänger** gibt eine Signalspannung $U_{PT}(t)$ ab, und die elektrische Übertragungsimpedanz dieses Wandlerpaars im Schallfeld der sphärischen Welle ist gegeben durch:

$$\underline{Z}_{PT} = \frac{\Im(U_{PT}(t))}{\Im(I_P(t))} = \frac{\underline{S}_{I,P}\underline{M}_T}{r_{PT}} e^{jk(r_{PT}-r_0)} \quad (13)$$

Bei einem reziproken Wandler ist der Quotient aus der Freifeld-Empfindlichkeit und dem Sende-Stromübertragungskoeffizienten gleich dem Reziprozitätsparameter für Kugelwellen $2r_0/\rho f$ bei einem Bezugsabstand von $r_0 = 1$ m:

$$\frac{\underline{M}_T}{\underline{S}_{I,T}} = \frac{2}{j\rho f} e^{jkr_0} \quad (14)$$

Bei jeder akustischen Frequenz kann allein der Betrag der Empfindlichkeit des Druckgradienten im Freifeld $\underline{M}_{pg}$ des **Vektorempfängers** aus Formel (11) bis Formel (14) wie folgt bestimmt werden:

$$|\underline{M}_{pg}| = \sqrt{\frac{2}{\rho f} \frac{|\underline{Z}_{TG}| |\underline{Z}_{PG}| r_{PG} r_{TG}}{|\underline{Z}_{PT}| r_{PT}}} \sqrt{\frac{r_{PG} r_{TG}}{\sqrt{k^2 r_{TG}^2 + 1} \sqrt{k^2 r_{PG}^2 + 1}}} \quad (15)$$

Die Phase der Empfindlichkeit des Druckgradienten im Freifeld allein $\underline{M}_{pg}$ ist wie folgt:

$$\arg(\underline{M}_{pg}) = \frac{1}{2} [\phi_{TG} + \phi_{PG} - \phi_{PT} + k(r_{TG} + r_{PG} - r_{PT}) - \frac{\pi}{2} - \arctan(kr_{PG}) - \arctan(kr_{TG})] \quad (16)$$

Dabei ist ϕ_{PG} der Winkel der elektrischen Übertragungsimpedanz $\underline{Z}_{PG}$, ϕ_{TG} der Winkel der elektrischen Übertragungsimpedanz $\underline{Z}_{TG}$ und ϕ_{PT} der Winkel der elektrischen Übertragungsimpedanz $\underline{Z}_{PT}$.

ANMERKUNG Der Messfehler der Abstände hat einen großen Einfluss auf die Kalibrierung der Phase der Empfindlichkeit. Wenn die Wandler ausgerichtet werden können, wie in Bild 4 gezeigt, haben die Abstände zwischen den Wandlern eine Beziehung von $r_{PG} + r_{TG} = r_{PT}$, der Messfehler der Phase muss verringert sein, und Formel (16) kann wie

folgt vereinfacht werden:

$$\arg(M_{pg}) = \frac{1}{2} [\phi_{TG} + \phi_{PG} - \phi_{PT} - \frac{\pi}{2} - \arctan(kr_{PG}) - \arctan(kr_{TG})]$$

Das **Übertragungsmaß des Schalldruckgradienten** kann aus Formel (8) errechnet werden. Wird eine andere Empfindlichkeit benötigt, so kann sie aus Formel (9) errechnet werden, und ihr Übertragungsmaß kann in Übereinstimmung mit der Definition errechnet werden.

9.1.3 Messung

Es ist empfehlenswert, den Sender, den **Vektorempfänger** und den reziproken Wandler wie in Bild 4 im Wasser auszurichten. Das Verfahren zur Ausrichtung der Wandler und das Verfahren für die Aufhängung des **Vektorempfängers** werden in 6.4.3 beschrieben.

Der Sender, der **Vektorempfänger** und der reziproke Wandler werden in der Mitte des Wassertanks eingetaucht, wodurch das Freifeld mit geringem Rauschen erhalten und die reflektierende Schallwelle von der Begrenzung und der Wasseroberfläche vermieden werden müssen.

Die Übertragungsimpedanz des Wandlerpaars muss gemessen und die Empfindlichkeit des **Vektorempfängers** muss berechnet werden wie in 9.1.2 beschrieben.

ANMERKUNG Der Empfangskanal des **Vektorempfängers** weist eine starke Richtwirkung auf. Während der Kalibrierung muss der zu kalibrierende **Vektorempfänger** auf die Hauptachse des Senders ausgerichtet werden.

9.1.4 Messunsicherheit

Die Gesamtmessunsicherheit für die Kalibrierung muss bestimmt und zusammen mit dem Wert für die Empfindlichkeit angegeben werden. Die erweiterte Gesamtunsicherheit (Vertrauensniveau 95 %) der Kalibrierung kann bei vorsichtigem Vorgehen kleiner als 0,7 dB sein.

9.2 Kalibrierung mit optischer Interferometrie

9.2.1 Allgemeines

Dieses Verfahren beschreibt ein absolutes Verfahren zur Kalibrierung im Freifeld für **Vektorempfänger**, beruhend auf optischer Interferometrie. Das optische Interferometer wird zur Messung der **Schallteilchengeschwindigkeit** am Bezugsmittelpunkt des zu kalibrierenden **Vektorempfänger**kanals verwendet. Das Verfahren kann im Frequenzbereich von 2 kHz bis 10 kHz verwendet werden, abhängig von der Größe des Prüftanks. Es ist ein absolutes Verfahren für die **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** des Empfangskanals von **Vektorempfängern**. [17-18]

9.2.2 Prinzip

Bild 5 zeigt eine schematische Darstellung der Freifeld-Kalibrierung für **Vektorempfänger** mittels optischer Interferometrie. Ein Sender, der durch tonfrequente Schwingungsimpulssignale angeregt wird, wird in das Wasser verbracht, was ein Dauerschallfeld im Prüftank erzeugt. Ein optisch reflektives und akustisch durchlässiges schwebendes Pellikel wird im Fernfeld des Senders angeordnet. Die Geschwindigkeit des Pellikels wird mit einem optischen Interferometer gemessen. Der in einem Montagering aufgehängte **Vektorempfänger** ersetzt dann das Pellikel.

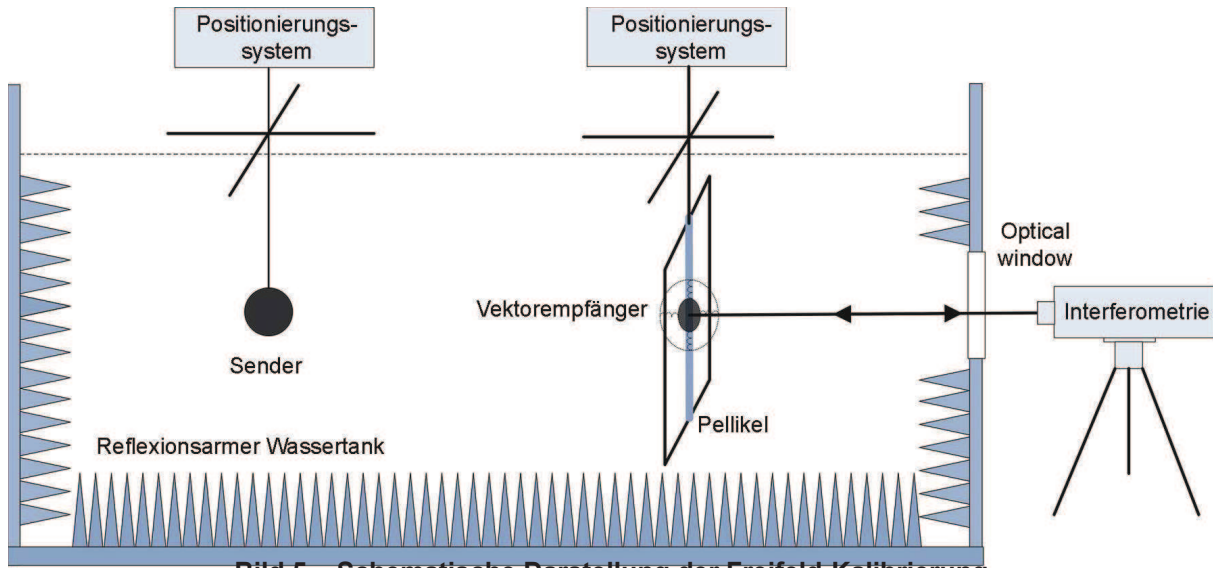


Bild 5 – Schematische Darstellung der Freifeld-Kalibrierung für Vektorempfänger mit optischer Interferometrie

Dann wird die Ausgangsspannung des zu kalibrierenden **Vektorempfängerkanals** gemessen, und die **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** des **Vektorempfängerkanals** kann mit Formel (5) berechnet werden.

Im Freifeld wird die **Schallteilchengeschwindigkeit** u am Bezugsmittelpunkt des zu kalibrierenden akustischen Wellenvektorkanals wie folgt ausgedrückt:

$$\underline{u} = \frac{K_i \cdot \Im(U_O(t))}{n^*} \quad (17)$$

Dabei ist K_i der Empfindlichkeitskoeffizient des optischen Interferometers, $U_O(t)$ das Ausgangsspannungssignal des optischen Interferometers und n^* die effektive Brechzahl, die den akustisch-optischen Effekt im Schallfeld wiedergibt.

Das Ausgangsspannungssignal des **Vektorempfängerkanals** $U_{VR}(t)$ wird gemessen. Nach Formel (5) ist die **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** des zu kalibrierenden **Vektorempfängerkanals** wie folgt:

$$\underline{M}_u = \frac{\Im(U_{VR}(t)) \cdot n^*}{K_i \cdot \Im(U_O(t))} \quad (18)$$

Das **Übertragungsmaß der Schallteilchengeschwindigkeit** kann mit Formel (6) errechnet werden. Wird eine andere Empfindlichkeit benötigt, so kann sie aus Formel (9) errechnet werden, und ihr Übertragungsmaß kann in Übereinstimmung mit der Definition errechnet werden.

9.2.3 Messung

Der Laserstrahl vom optischen Interferometer durchdringt das Medium, fällt am Pellikel ein und wird zurück zum optischen Interferometer reflektiert. Die Dicke des Pellikels muss sehr viel kleiner sein als die Wellenlänge der Schallwelle, und die durch das optische Interferometer gemessene Geschwindigkeit kann gleich der **Schallteilchengeschwindigkeit** in Wasser sein.

Der **Vektorempfänger** wird im Montagerring aufgehängt, wie in 6.4.3 beschrieben, und in den Prüftank verbracht, wobei sein Bezugsmittelpunkt mit dem Messpunkt des Pellikels übereinstimmt.

Die Ausgangsspannungen des optischen Interferometers und des zu kalibrierenden **Vektorempfängerkanals** müssen gemessen und die **Empfindlichkeit der Schallteilchengeschwindigkeit** des **Vektorempfängerkanals** muss wie in 9.2.2 beschrieben berechnet werden.

ANMERKUNG 1 Um den Einfluss der Reflexionsschallwelle zu vermeiden, die von der Oberfläche und der Begrenzung des Prüftanks mit begrenzter Größe kommt, sollten die Wandler und das Pellikel im mittleren Bereich des Prüftanks eingesetzt werden.

ANMERKUNG 2 Um die Freifeld-Kalibrierung bei niedrigen Frequenzen im Prüftank zu realisieren, müssen fortgeschrittene Signalverarbeitungstechniken angewendet werden.

9.2.4 Messunsicherheit

Die Gesamtmessunsicherheit für die Freifeld-Kalibrierung mit optischer Interferometrie muss bestimmt und zusammen mit dem Wert für die Empfindlichkeit angegeben werden. Die Gesamtunsicherheit der Empfindlichkeit (Vertrauensniveau 95 %) der Kalibrierung kann bei vorsichtigem Vorgehen kleiner als 0,7 dB sein.

9.3 Vergleichskalibrierung mit Referenzhydrophon

9.3.1 Allgemeines

Dieses Verfahren beschreibt eine Vergleichskalibrierung mit Referenz**hydrophon** unter Freifeldbedingungen für **Vektorempfänger**. Die Kalibrierung eines **Vektorempfängerkanals** mit Vergleichsverfahren erfordert ein kalibriertes Referenz**hydrophon** und einen Hilfssender. Das Verfahren kann im Labor-Wassertank im Frequenzbereich von 250 Hz bis 10 kHz verwendet werden. Es ist ein relatives Verfahren für die Kalibrierung der Schalldruckempfindlichkeit des Empfangskanals von **Vektorempfängern**. [19-20]

9.3.2 Prinzip

Bild 6 zeigt eine schematische Darstellung der Freifeld-Vergleichskalibrierung für **Vektorempfänger** mit Referenz**hydrophon**. Der durch tonfrequente Schwingungsimpulssignale angeregte Sender P wird ins Wasser verbracht, was ein Dauerschallfeld im Tank erzeugt. Ein **Vektorempfänger** G und ein Referenz**hydrophon** R im Fernfeld des Senders P werden in derselben Tiefe mit dem Sender P eingesetzt, und die drei Wandler werden auf einer Linie unter Wasser ausgerichtet.

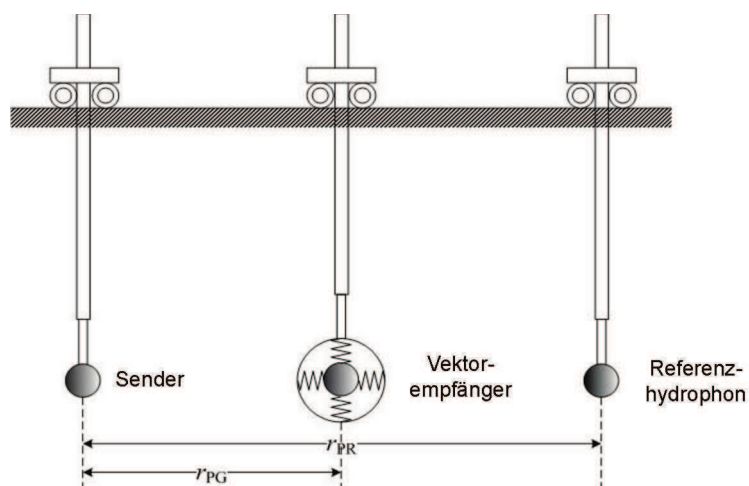


Bild 6 – Schematische Darstellung der Freifeld-Vergleichskalibrierung für Vektorempfänger mit Referenzhydrophon

Das Ausgangsspannungssignal $U_{VR}(t)$ des zu kalibrierenden **Vektorempfängerkanals** und das Leerlaufspannungssignal $U_0(t)$ des Referenz**hydrophons** werden nun gemessen, und die