

DIN EN 62127-2

ICS 11.040.60; 17.140.50

Ersatz für
DIN EN 62127-2:2013-11
Siehe Anwendungsbeginn

**Ultraschall –
Hydrophone –
Teil 2: Kalibrierung für Ultraschallfelder bis zu 40 MHz
(IEC 62127-2:2007 + Cor.:2008 + A1:2013 + A2:2017);
Deutsche Fassung EN 62127-2:2007 + A1:2013 + A2:2017**

Ultrasonics –
Hydrophones –
Part 2: Calibration for ultrasonic fields up to 40 MHz
(IEC 62127-2:2007 + Cor.:2008 + A1:2013 + A2:2017);
German version EN 62127-2:2007 + A1:2013 + A2:2017

Ultrasons –
Hydrophones –
Partie 2: Etalonnage des champs ultrasoniques jusqu'à 40 Mhz
(IEC 62127-2:2007 + Cor.:2008 + A1:2013 + A2:2017);
Version allemande EN 62127-2:2007 + A1:2013 + A2:2017

Gesamtumfang 101 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für die von CENELEC am 2007-09-01 angenommene Europäische Norm und die am 2013-03-15 angenommene Änderung A1 und die am 2017-04-26 angenommene Änderung A2 als DIN-Norm ist 2018-02-01.

Für DIN EN 62127-2:2013-11 besteht eine Übergangsfrist bis 2020-04-26.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 62127-2/A2:2016-04.

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

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

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

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

C1 Die Änderungen von IEC 62127-2 Cor. 1:2008 sind eingearbeitet und am linken Rand mit einer senkrechten Linie und „C1“ gekennzeichnet.

Die Änderungen von A1 sind eingearbeitet und am linken Rand mit einer senkrechten Linie gekennzeichnet.

A2 Die Änderungen von A2 sind eingearbeitet und am linken Rand mit einer senkrechten Linie und A2 gekennzeichnet.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 62127-2:2013-11 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Im gesamten Dokument ist „Nicht-Linearitäten“ durch „Nichtlinearitäten“ zu ersetzen. Diese Ersetzung ist nur auf den englischen Text anzuwenden.
- b) Unterabschnitt 9.4 „Freifeld-Reziprozitätskalibrierung“ und Anhang K „Zwei-Wandler-Reziprozitätskalibrierung“ wurden angepasst.
- c) Die Deutsche Fassung wurde in den Abschnitten 2 und 3 an die aktuellen Standardtexte angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN EN 61101: 1994-12

DIN EN 61102: 1994-12

DIN EN 62092: 2002-11

DIN EN 62127-2: 2008-06, 2013-11

DIN EN 62127-2 Berichtigung 1: 2009-03

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit europäischen und internationalen Dokumenten

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.

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ist nachstehend wiedergegeben.

Tabelle NA.1

Europäisches Dokument	Internationales Dokument	Deutsches Dokument	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60050-801	^a	–
–	IEC 60050-802	^a	–
EN 60565	IEC 60565	DIN EN 60565	–
EN 61161	IEC 61161	DIN EN 61161	–
EN 61689	IEC 61689	DIN EN 61689	VDE 0754-3
EN 61828	IEC 61828	DIN EN 61828	–
EN 62127-1:2007 + A1:2013	IEC 62127-1:2007 + Cor. 2008 + A1:2013	DIN EN 62127-1:2013-11	–
EN 62127-3	IEC 62127-3	DIN EN 62127-3	–
–	IEC/TS 62781	–	–
^a „Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Deutsche Ausgabe“, Online-Zugang: http://www.dke.de/dke-iev .			

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60565, *Wasserschall – Hydrophone – Kalibrierung im Frequenzbereich von 0,01 Hz bis 1 MHz*

DIN EN 61161, *Ultraschall – Leistungsmessung – Schallfeldkraft-Waagen und Anforderungen an ihre Funktionseigenschaften*

DIN EN 61689 (VDE 0754-3), *Ultraschall – Physiotherapiesysteme – Feldspezifikation und Messverfahren im Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 5 MHz*

DIN EN 61828, *Ultraschall – Fokussierende Wandler – Definitionen und Messverfahren für die erzeugten Felder*

DIN EN 62127-2:2018-02

DIN EN 62127-1:2013-11, *Ultraschall – Hydrophone – Teil 1: Messung und Charakterisierung von medizinischen Ultraschallfeldern bis zu 40 MHz*

DIN EN 62127-3, *Ultraschall – Hydrophone – Teil 3: Eigenschaften von Hydrophonen zur Verwendung in Ultraschallfeldern bis zu 40 MHz*

Deutsche Fassung

**Ultraschall –
Hydrophone –
Teil 2: Kalibrierung für Ultraschallfelder bis zu 40 MHz**
(IEC 62127-2:2007 + A1:2013 + A2:2017)

Ultrasonics –
Hydrophones –
Part 2: Calibration for ultrasonic fields up
to 40 MHz
(IEC 62127-2:2007 + A1:2013 + A2:2017)

Ultrasons –
Hydrophones –
Partie 2: Etalonnage des champs
ultrasoniques jusqu'à 40 Mhz
(IEC 62127-2:2007 + A1:2013 + A2:2017)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2007-09-01, die A1 am 2013-03-15 und die A2 am 2017-04-26 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

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

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

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

CENELEC

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

Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2017 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 62127-2:2007 + A1:2013 + A2:2017 D

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 87/353/CDV, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 62127-2, ausgearbeitet von dem IEC TC 87 „Ultrasonics“, wurde dem IEC-CENELEC Parallelen Einstufigen Annahmeverfahren unterworfen und von CENELEC am 2007-09-01 als EN 62127-2 angenommen.

EN 62127-1, EN 62127-2 und EN 62127-3 werden gleichzeitig veröffentlicht. Zusammengefasst ersetzen diese Europäischen Normen EN 61101:1993, EN 61102:1993 + A1:1994, die EN 61220:1995 und EN 62092:2001.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2008-06-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2010-09-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62127-2:2007 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Vorwort zu A1

Der Text des Dokuments 87/519/FDIS, die zukünftige Änderung 1 für die Ausgabe 1 der IEC 62127-2, erarbeitet vom IEC/TC 87 „Ultrasonics“, wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 62127-2:2007/A1:2013 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2013-12-15
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2016-03-15

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

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62127-2:2007/A1:2013 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Europäisches Vorwort zu A2

Der Text des Dokuments 87/612/CDV, zukünftige IEC 62127-2:2007/A2, erarbeitet vom IEC/TC 87 "Ultrasonics", wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 62127-2:2007/A2:2017 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2018-01-26
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2020-04-26

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62127-2:2007/A2:2017 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Inhalt

	Seite
Vorwort.....	2
Vorwort zu A1	2
Europäisches Vorwort zu A2	3
Einleitung	10
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe	12
4 Liste der Formelzeichen	18
5 Überblick über die Kalibrierverfahren	21
5.1 Prinzipien	21
5.2 Zusammenfassung der Kalibrierverfahren	23
5.3 Angabe der Ergebnisse	24
5.4 Empfohlene Kalibrierperioden	25
6 Generelle Anforderungen an ein Hydrophon-Kalibriersystem.....	26
6.1 Mechanische Positionierung	26
6.1.1 Allgemeines	26
6.1.2 Genauigkeit der axialen Hydrophon-Position	26
6.1.3 Genauigkeit der seitlichen Hydrophon-Position	26
6.2 Temperaturmessung und Temperaturstabilität	26
6.3 Hydrophon-Größe	27
6.4 Messgefäß und Wasserbeschaffenheit	27
6.5 Messung der Ausgangsspannung	28
7 Elektrische Betrachtungen	28
7.1 Signaltyp	28
7.2 Erdung	28
7.3 Messung der Hydrophon-Ausgangsspannung	28
7.3.1 Allgemeines	28
7.3.2 Elektrische Belastung durch das Messinstrument	29
7.3.3 Elektrische Belastung durch Verlängerungskabel	29
7.3.4 Rauschen	29
7.3.5 Übersprechen (HF-Aufnahme) und akustische Interferenz	30
7.3.6 Integrierte Hydrophon-Vorverstärker	30
8 Vorbereitung der Hydrophone	30
8.1 Allgemeines	30
8.2 Benetzung	30
8.3 Hydrophon-Halterung	30
8.4 Einfluss des Kabels	31

	Seite
9 Freifeld-Reziprozitätskalibrierung.....	31
9.1 Allgemeines.....	31
9.2 Zielsetzung.....	31
9.3 Grundprinzipien.....	31
9.3.1 Allgemeines.....	31
9.3.2 Reziprozitätsverfahren mit drei Wandlern.....	31
9.3.3 Selbstreziprozitätskalibrierung.....	31
9.3.4 Zwei-Wandler-Reziprozitätskalibrierung.....	32
9.4 Zwei-Wandler-Reziprozitätsverfahren.....	32
9.4.1 Hilfswandler.....	32
9.4.2 Reflektor.....	32
9.4.3 Messfeld.....	33
9.4.4 Reziprozitätsansatz.....	33
9.4.5 Messverfahren.....	33
10 Freifeld-Kalibrierung durch Flächenabtastung.....	33
10.1 Allgemeines.....	33
10.2 Zielsetzung.....	33
10.3 Grundprinzip.....	34
10.4 Anforderungen.....	35
10.4.1 Hydrophonabtastung.....	35
10.5 Verfahren.....	36
10.5.1 Leistungsmessung.....	36
10.5.2 Wandlerbefestigung.....	36
10.5.3 Messbedingungen.....	36
10.5.4 Messungen.....	37
10.6 Korrekturen und Quellen der Unsicherheit.....	37
11 Freifeld-Kalibrierung durch optische Interferometrie.....	37
11.1 Allgemeines.....	37
11.2 Prinzip.....	37
12 Kalibrierung durch Vergleich mit einem Standard-Hydrophon.....	37
12.1 Allgemeines.....	37
12.2 Zielsetzung.....	37
12.3 Prinzip.....	38
12.4 Anforderungen.....	38
12.4.1 Quellenwandler.....	38
12.4.2 Quellenwandler-Anregungssignal.....	38
12.4.3 Messsystem.....	38
12.5 Verfahren.....	39
12.5.1 Messungen (Typ I): Bestimmung der Richtungsempfindlichkeit eines Hydrophons.....	39

	Seite
12.5.2 Messungen (Typ II): Kalibrierung durch Vergleich mit einem Standard-Hydrophon	40
12.6 Maximale Hydrophon-Größe	40
Anhang A (informativ) Beurteilung der Unsicherheit in der Freifeld-Kalibrierung von Hydrophonen	41
A.1 Allgemeines	41
A.2 Gesamt-Unsicherheit (erweiterte Unsicherheit)	41
A.3 Allgemein übliche Quellen der Unsicherheit	41
Anhang B (informativ) Verhalten von PVDF-Polymersensoren in Ultraschallfeldern hoher Intensität	43
B.1 Allgemeines	43
B.2 Theoretischer Hintergrund	43
B.3 Prüfungen	43
B.4 Ergebnisse	44
B.5 Schlussfolgerungen	45
Anhang C (informativ) Korrekturen bezüglich der elektrischen Last	46
C.1 Allgemeines	46
C.2 Korrekturen mittels komplexer Impedanz	46
C.3 Korrekturen nur mit Kapazitäten	46
Anhang D (informativ) Absolutkalibrierung von Hydrophonen nach dem Verfahren mit Flächenabtastung	47
D.1 Überblick	47
D.2 Methodologie der Hydrophon-Abtastung	47
D.3 Korrekturen und Quellen der Messunsicherheit	48
D.3.1 Gesamtleistung	48
D.3.2 Empfangenes Hydrophon-Signal	48
D.3.3 Integration	48
D.3.4 Richtungsempfindlichkeit	49
D.3.5 Endliche Größe des Hydrophons	49
D.3.6 Rauschen	50
D.3.7 Nichtlineare Ausbreitung	51
D.3.8 Flächenabtastung	51
D.3.9 Intensität proportional zum quadrierten Schalldruck	52
D.4 Begründung für die Kalibrierung von Hydrophonen nach dem Flächenabtastverfahren	52
D.4.1 Allgemeines	52
D.4.2 Beziehung zwischen den wirksamen Radien von Hydrophon und Wandler	52
D.4.4 Ableitung der Gleichung (D.2)	53
D.4.5 Auswirkung der nichtlinearen Ausbreitung, D.3.7	54
Anhang E (informativ) Wassereigenschaften	56
Anhang F (informativ) Die Absolutkalibrierung von Hydrophonen durch optische Interferometrie bis zu 40 MHz	58
F.1 Überblick	58

	Seite
F.2 Derzeitiger Stand	58
F.2.1 „Magnomisches“ Verfahren oder Verfahren auf Grundlage nichtlinearer Ausbreitung.....	58
F.2.2 Optische Interferometrie.....	59
F.2.3 Hochfrequenz-Implementierungen der optischen Interferometrie	59
Anhang G (informativ) Wellenform-Konzepte.....	68
G.1 Überblick	68
G.2 Zeitliche Wellenformkonzepte, Frequenzkonzepte und Hydrophon-Positionierung für Vergleichskalibrierungen von Hydrophonen	68
G.3 Konzepte der zeitlichen Wellenform und der Abdeckung des Frequenzbereichs	69
G.3.1 Anwendung von Schmalband-Tonbursts (Konzept a)	69
G.3.2 Anwendung einer Breitband-Wellenform, die sich durch nichtlineare Ausbreitung aus einem Schmalband-Tonburst ergibt (Konzept b).....	70
G.3.3 Anwendung eines Breitband-Pulses (Konzept c).....	70
G.3.4 Anwendung einer Dauerschall-Frequenzwobbelung mit Zeitverzögerungsspektrometrie (Konzept d).....	70
G.3.5 Dauerschall-Frequenzwobbelung mit TGFA (Konzept e)	71
G.4 Konzepte der Hydrophon-Position	71
G.4.1 Nahfeld-Hydrophon-Position (Konzept A).....	71
G.4.2 Fernfeld-Hydrophon-Position (Konzept B).....	71
G.4.3 Fernfeld-Hydrophon-Position mit speziellem Bezug auf einen langen Ausbreitungspfad zum Erreichen nichtlinearer Verzerrung (Konzept C)	71
G.4.4 Geometrisch-kugelförmige Fokusposition mit fokussierendem Quellenwandler (Konzept D) (Anregung mit Niederspannung oder lineare Anregung)	73
G.4.5 Geometrisch-kugelförmige Fokusposition mit fokussierendem Quellenwandler und Hochspannungsanregung zum Erreichen nichtlinearer Verzerrung (Konzept E).....	73
G.5 Besondere Betrachtungen für Kalibrierungen nahe der Austrittsfläche eines Wandlers.....	73
G.5.1 Allgemeine Anforderung.....	73
G.5.2 Einfluss von Randwellen	73
G.5.3 Potenzieller Einfluss von Kopfwellen	74
G.5.4 Behandlung von Kopfwellen nahe dem Wandler	75
G.5.5 Angaben zu den anwendbaren Paraxialbereichen einer ebenen Welle im Fall einer Nahfeld-Hydrophon-Position unter Berücksichtigung der Randwellen- sowie der Kopfwellenbeiträge	76
Anhang H (informativ) Zeitverzögerungsspektrometrie – Anforderungen und kurzer Überblick zum Verfahren.....	77
H.1 Allgemeines.....	77
H.2 Kalibrierung und Bewertung der Leistungsfähigkeit von Ultraschall-Hydrophonen mittels Zeitverzögerungsspektrometrie.....	77
H.2.1 Gemessene Parameter des Ultraschallfelds.....	77
H.2.2 Ultraschall-Frequenzbereich, über den das Verfahren anwendbar ist.....	77
H.2.3 Ultraschallfeld-Konfiguration, für die das Verfahren anwendbar ist.....	77
H.2.4 Räumliche Auflösung	77
H.2.5 Empfindlichkeit des Verfahrens.....	78

	Seite
H.2.6 Bereich, über den die Empfindlichkeit gemessen wird.....	78
H.2.7 Reproduzierbarkeit	78
H.2.8 Impulsantwort	78
H.2.9 Verfahren für die Durchführung der Messungen.....	78
H.3 Messverfahren (Empfindlichkeitsvergleich).....	78
H.4 Messverfahren (Reziprozitätskalibrierung).....	79
H.5 Beschränkungen.....	79
Anhang I (informativ) Bestimmung des Phasengangs von Hydrophonen.....	80
I.1 Überblick.....	80
I.2 Kohärente Zeitverzögerungsspektrometrie	80
I.2.1 Arbeitsprinzip.....	80
I.2.2 Beispielergebnisse	81
I.2.3 Unsicherheiten.....	82
I.2.4 Beschränkungen.....	82
I.3 Pulskalibrierverfahren mit optischem Mehrschicht-Hydrophon	83
I.3.1 Arbeitsprinzip.....	83
I.3.2 Beispielergebnisse	83
I.3.3 Unsicherheiten.....	84
I.3.4 Beschränkungen.....	84
I.4 Modellierung der nichtlinearen Pulsausbreitung	84
I.4.1 Arbeitsprinzip.....	84
I.4.2 Beschränkungen.....	84
Anhang J (informativ) Betrachtungen bezüglich der maximalen Größe des aktiven Elements eines Hydrophons	85
J.1 Maximalgröße des Hydrophons im Nahfeldfall (Anhang G – Hydrophonposition Konzept A).....	85
J.2 Maximalgröße des Hydrophons im Fernfeldfall (Anhang G – Hydrophonposition Konzept B).....	85
J.3 Maximalgröße des Hydrophons im Fernfeldfall mit speziellem Bezug auf einen langen Ausbreitungspfad zum Erzielen nichtlinearer Verzerrung (Anhang G – Hydrophonposition Konzept C).....	85
Anhang K (informativ) Zwei-Wandler-Reziprozitätskalibrierverfahren.....	87
K.1 Allgemeines	87
K.2 Grundlagen der Reziprozität	87
K.3 Elektrische Größen.....	88
K.4 Beugungskorrektur und Verluste auf Grund von nichtlinearer Schallausbreitung	89
K.5 Ultraschallfeld	89
K.6 Versuchsaufbau.....	90
K.6.1 Allgemeines	90
K.6.2 Drehung des Reflektors.....	90
K.6.3 Translatorischer Reflektor	90
K.6.4 Translatorischer Hilfswandler	91

Literaturhinweise	92
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	97

Bilder

Bild F.1 – Messaufbau für das interferometrische Folienverfahren.....	61
Bild F.2 – Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende, M_C , eines koplanaren Membran-Hydrophons.....	62
Bild F.3 – Hydrophon-Wellenform, erzeugt von einem am Fokus eines 5-MHz-Wandlers (Brennweite 51 mm) angeordneten koplanaren 9- μ m-Membran-Hydrophon.....	64
Bild F.4 – Erzeugte Interferometer-(Verschiebungs-)Wellenform, wobei die Folie im Fokus eines 5-MHz-Wandlers (Brennweite 51 mm) angeordnet ist.....	64
Bild F.5 – Frequenzspektrum der Verschiebungswellenform (untere Kurve) und der abgeleiteten Verschiebungswellenform (obere Kurve).....	65
Bild F.6 – Empfindlichkeit eines bilaminaren 9- μ m-Membran-Hydrophons mit aktivem 0,2-mm-Element, bestimmt in 5-MHz-Intervallen über den Frequenzbereich von 5 MHz bis 60 MHz.....	65
Bild G.1 – Koordinaten des Feldpunkts P im Nahfeld eines ebenen runden Quellenwandlers mit dem Radius a_t	74
Bild I.1 – Phase der Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende für zwei Membran-Hydrophone.....	82
Bild I.2 – Phase der Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende für ein Nadel-Hydrophon von 0,2 mm Durchmesser	83
Bild K.1 – Versuchsaufbau mit drehbarem Reflektor	90
Bild K.2 – Versuchsaufbau mit translatorischem Reflektor	91
Bild K.3 – Versuchsaufbau mit translatorischem Hilfswandler	91

Tabellen

Tabelle 1 – Liste typischer Unsicherheitswerte, die mit den in dieser Norm angegebenen Kalibrierverfahren für den hierin berücksichtigten Frequenzbereich erhalten werden	23
Tabelle E.1 – Schallgeschwindigkeit c und spezifische Schallimpedanz, ρc , als Funktion der Temperatur für die Ausbreitung in Wasser	56
Tabelle G.1 – Liste der in diesem Anhang beschriebenen Konzepte für die zeitliche Wellenform und Hydrophon-Position(ierung)	68
Tabelle I.1 – Beispiele für die Unsicherheiten (mit einem Erweiterungsfaktor von $k = 2$) bei einer HDTs-Phasenkalibrierung eines Nadel-Hydrophons mit einem Durchmesser von 0,2 mm, angegeben auf einem Vertrauensniveau von 95 %	82

Einleitung

Die räumliche und zeitliche Verteilung des Schalldrucks in einem Ultraschallfeld in einem flüssigen Medium wird gewöhnlich mit Miniatur-Ultraschall-**Hydrophonen** bestimmt. Diese Geräte sind keine Instrumente für absolute Messungen und erfordern eine Kalibrierung. Der Zweck der vorliegenden Internationalen Norm besteht in der Beschreibung derjenigen Kalibrierverfahren, die bei der Bestimmung der Empfindlichkeit eines **Hydrophons** im Ultraschall über 20 kHz bis zu einer Frequenz von 40 MHz anzuwenden sind. Die Hauptanwendung von **Hydrophonen** liegt in diesem Zusammenhang in der Messung von Ultraschallfeldern, die von medizinisch-diagnostischen Geräten in Wasser ausgesendet werden. Die Kenntnis des **Hydrophon**-Verhaltens über dieses breite Frequenzband ist erforderlich, um die akustischen Parameter des angewendeten Schallfelds zuverlässig charakterisieren zu können. Insbesondere der Frequenzbereich oberhalb 15 MHz ist zum vollständigen Charakterisieren dieser Geräte von Bedeutung, was in erster Linie auf dem erhöhten Auftreten von Hochfrequenz-Komponenten im Ultraschallsignal beruht, die durch nichtlineare Ausbreitung verursacht werden. Außerdem nimmt die Anzahl der medizinischen Ultraschallsysteme, die Frequenzen oberhalb 15 MHz nutzen, zu, was insbesondere auf intraoperative Sonden zutrifft. In den letzten Jahren hat sich herausgestellt, dass die **Hydrophonempfindlichkeit** unterhalb 0,5 MHz zum zuverlässigen Bestimmen des negativen Spitzenschalldrucks (Spitzenwert des Schallunterdrucks) ebenfalls erforderlich ist.

Während der Begriff „**Hydrophon**“ in weiterem Sinn angewendet werden kann, wird er hier als Bezeichnung für ein piezoelektrisches Miniatur-**Hydrophon** verstanden. Es ist dieser Messgerätetyp, der heutzutage in verschiedenen Bereichen der medizinischen Ultraschallanwendung und insbesondere zum quantitativen Charakterisieren der Feldstruktur von medizinischen Diagnostikgeräten verwendet wird. Im Hinblick auf andere Typen von Schalldrucksensoren, wie diejenigen, die auf Faseroptik beruhen, gelten einige der Vorgaben in dieser Internationalen Norm für diese Typen ebenfalls und andere nicht. Wenn diese anderen Typen von **Hydrophonen** in der Zukunft für die Feldmessungspraxis an Bedeutung gewinnen, werden deren Eigenschaften in einer überarbeiteten Fassung dieser Internationalen Norm oder in einer getrennten Norm zu behandeln sein.

ANMERKUNG Die vorliegende Internationale Norm berücksichtigt den Ultraschall-Frequenzbereich von 20 kHz bis zu einer oberen Frequenz von 40 MHz. Die Normen, die die **Hydrophon**-Eigenschaften (IEC 62127-3) und die **Hydrophon**-Anwendung (IEC 62127-1) behandeln, werden als Teil eines auf die Neustrukturierung und weitestgehende Zusammenfassung aller bestehenden **Hydrophon**-Normen abzielenden Pflegeaktivitätsprogramms parallel erstellt. Dies wird letztendlich zu vereinheitlichten Normen führen, die das gesamte Feld der praktischen **Hydrophon**-Anwendung abdecken.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der Norm IEC 62127 legt Folgendes fest:

- absolute Kalibrierverfahren für **Hydrophone**;
- relative (Vergleichs-)Kalibrierverfahren für **Hydrophone**.

Für die einzelnen relativen und absoluten Kalibrierverfahren in dem von dieser Norm berücksichtigten Frequenzbereich werden Empfehlungen und Verweise auf anerkannte Literaturbeiträge gegeben.

Diese Norm gilt für:

- **Hydrophone**, die für in Wasser durchgeführte Messungen im Ultraschall-Frequenzbereich bis 40 MHz verwendet werden;

ANMERKUNG 1 Obwohl sich einige physiotherapeutische (medizinische) Anwendungen von medizinischem Ultraschall in Entwicklung befinden, bei denen im Frequenzbereich von 40 kHz bis 100 kHz gearbeitet wird, bleibt der primäre Frequenzbereich der diagnostischen Bildgebung oberhalb von 2 MHz. In letzter Zeit wurde selbst für den letztgenannten Fall festgestellt, dass die Hydrophonempfindlichkeit bei beträchtlich kleineren Frequenzen die Messungen der akustischen Schlüsselparameter beeinflussen kann [1].

- **Hydrophone**, die runde piezoelektrische Sensorelemente nutzen und zum Messen der von Ultraschallgeräten erzeugten gepulsten und Dauerschall-Ultraschallfeldern ausgelegt sind;

ANMERKUNG 2 Einige Hydrophone können nicht-kreisförmige aktive Elemente haben, die auf geringen Abweichungen von der kreisförmigen Struktur beruhen, die wiederum durch die Elektrodenstruktur verursacht werden, oder umgekehrt, die aktiven Elemente können sogar quadratisch sein. Die Abschnitte innerhalb dieses Dokuments bleiben gültig, auch wenn in diesen Fällen der Richtungsempfindlichkeit und den wirksamen Radien des aktiven Elements auf Grund der verschiedenen Rotationsachsen besondere Aufmerksamkeit gelten sollte.

- **Hydrophone** mit oder ohne **Hydrophon-Vorverstärker**.

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 electro-acoustics*

IEC 60565, *Underwater acoustics – Hydrophones – Calibration in the frequency range 0,01 Hz to 1 MHz*

IEC 61161, *Ultrasonic – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements*

A2 IEC 61689, *Ultrasonics – Physiotherapy systems – Field specifications and methods of measurement in the frequency range 0,5 MHz to 5 MHz*

IEC 61828, *Ultrasonics – Focusing transducers – Definitions and measurement methods for the transmitted fields*

IEC 62127-1:2007, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz*

Amendment 1:2013

IEC 62127-3, *Ultrasonics – Hydrophones – Part 3: Properties of hydrophones for ultrasonic fields up to 40 MHz*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 62127-1 und die folgenden Begriffe.

3.1

akustisches Zentrum

der Punkt auf oder nahe einem Wandler, von dem die vom Schallwandler ausgesendeten und von entfernten Punkten beobachtbaren kugelförmig divergenten Schallwellen auszugehen scheinen

3.2

Bündelachse

Gerade, die durch die **Bündelmittelpunkte** von zwei Ebenen verläuft, die senkrecht zu der Geraden stehen, die den **Punkt des maximalen Pulsintegrals des quadrierten Schalldrucks** mit dem Mittelpunkt der **äußeren Wandlerapertur** verbindet

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Lage der ersten Ebene entspricht der Lage derjenigen Ebene, die das maximale **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** enthält, oder, alternativ, einer Ebene, die eine einzelne, in der fokalen Fraunhofer-Zone liegende Hauptkeule enthält. Die Lage der zweiten Ebene befindet sich so weit wie praktisch möglich von der ersten Ebene entfernt und verläuft parallel zur ersten Ebene mit den gleichen orthogonalen Abtastlinien (x - und y -Achse), wie für die erste Ebene verwendet.

Anmerkung 2 zum Begriff: In einer Vielzahl von Situationen wird der Begriff **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** in der oben stehenden Definition überall durch eine im linearen Zusammenhang stehende Größe ersetzt, zum Beispiel:

- a) Im Falle eines Dauerschallsignals wird der Begriff **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** ersetzt durch **Mittelwert des Schalldruckquadrats** gemäß IEC 61689.
- b) In Fällen, bei denen die Signalsynchronisation mit dem Abtastfeld nicht möglich ist, kann der Begriff **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** ersetzt werden durch **zeitlicher Mittelwert der Intensität**.

Anmerkung 3 zum Begriff: Siehe IEC 62127-1, Bild 1.

Anmerkung 4 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-1.

3.3

Bündelmittelpunkt

Punkt, in dem sich zwei durch die **Bündelbreitenmittelpunkte** zweier orthogonaler Ebenen, xz und yz , gehende Linien schneiden

Anmerkung zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 61828:2001.

3.4

Bündelbreite

w_6 , w_{12} , w_{20}

größter Abstand zwischen zwei Punkten auf einer festgelegten Achse senkrecht zur **Bündelachse**, an denen das **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** seinen Höchstwert auf der **Bündelachse** um einen festgelegten Betrag unterschreitet

Anmerkung 1 zum Begriff: In einer Vielzahl von Situationen wird der Begriff **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** in der oben stehenden Definition überall durch eine im linearen Zusammenhang stehende Größe ersetzt, zum Beispiel:

- a) Im Falle eines Dauerschallsignals wird der Begriff **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** ersetzt durch **Mittelwert des Schalldruckquadrats** nach IEC 61689.
- b) In Fällen, bei denen die Signalsynchronisation mit dem Abtastfeld nicht möglich ist, kann der Begriff **Pulsintegral des quadrierten Schalldrucks** ersetzt werden durch **zeitlicher Mittelwert der Intensität**.

Anmerkung 2 zum Begriff: Häufig angewendete **Bündelbreiten** sind bei – 6 dB, –12 dB und – 20 dB unterhalb des Höchstwertes festgelegt. Die Dezibel-Berechnung bedeutet die Verwendung des 10-Fachen vom Logarithmus der Verhältnisse der Integrale.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die **Bündelbreite** wird in Meter (m) ausgedrückt.

Anmerkung 4 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-1.

3.5

Bündelbreitenmittelpunkt

linearer Mittelwert der Lage der Mittelpunkte der **Bündelbreiten** in einer Ebene

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Mittelwert wird aus 20 Niveaus für die **Bündelbreite** bestimmt, die Intervallen im Bereich von – 0,1 dB bis – 26 dB entsprechen (siehe IEC 61828, B.2).

Anmerkung 2 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 61828:2001.

3.6

Bündelmittelpunkt

Punkt in einer Ebene im **Fernfeld**, üblicherweise senkrecht zur **Bündelachse**, an dem der räumliche und zeitliche Spitzenwert des Schalldrucks auftritt

3.7

diametrale Bündelabtastung

Reihe von Messungen der **Hydrophon**-Ausgangsspannung, die während der Bewegung des **Hydrophons** entlang einer Geraden, die durch einen Punkt auf der **Bündelachse** und in einer Richtung senkrecht zur **Bündelachse** verläuft, durchgeführt wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die **diametrale Bündelabtastung** kann sich über verschiedene Abstände auf jeder Seite der **Bündelachse** erstrecken.

Anmerkung 2 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-1.

3.8

Richtungsempfindlichkeit

im Allgemeinen grafisch dargestellte Beschreibung der Empfindlichkeit eines **Hydrophons** als Funktion der Ausbreitungsrichtung der einfallenden ebenen Schallwelle in einer festgelegten Ebene durch den **Bezugsmittelpunkt** und bei einer festgelegten Frequenz

Anmerkung zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 60565.^{N1)}

3.9

wirksamer Radius eines nicht fokussierenden Ultraschallwandlers

a_t

Radius eines idealen Kolbenmembran-**Ultraschallwandlers**, der eine vorausgesagte axiale Schalldruckverteilung hat, die der beobachteten axialen Schalldruckverteilung über einen axialen Abstand bis mindestens über den letzten axialen Höchstwert hinaus annähernd gleich ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Der **wirksame Radius eines nicht fokussierenden Ultraschallwandlers** wird in Meter (m) ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-1.

^{N1)} Nationale Fußnote: Die Definition wurde gegenüber IEC 60565 leicht modifiziert.

3.10

wirksamer Hydrophonradius

a_h, a_{h3}, a_{h6}

Radius eines Empfangs-**Hydrophons** mit starrer Piezoscheibe, das eine vorhergesagte Funktion der Richtungsempfindlichkeit mit einem Öffnungswinkel gleich dem beobachteten Öffnungswinkel hat

Anmerkung 1 zum Begriff: Der Öffnungswinkel wird bei einem festgelegten Pegel unterhalb des Spitzenwertes der **Richtungsempfindlichkeits**-Funktion bestimmt. Für die festgelegten Pegel von 3 dB und 6 dB werden die Radien als a_{h3} bzw. a_{h6} bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der wirksame Hydrophonradius wird in Meter (m) angegeben.

Anmerkung 3 zum Begriff: Der Radius ist üblicherweise eine Funktion der Frequenz. Für repräsentative experimentelle Daten siehe [2].

Anmerkung 4 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.11

elektrische Lastimpedanz

Z_L

komplexe elektrische Eingangsimpedanz (bestehend aus einem realen und einem imaginären Teil), an die der Ausgang des **Hydrophons** oder der **Hydrophoneinheit** angeschlossen ist oder angeschlossen werden soll

Anmerkung 1 zum Begriff: Die elektrische Lastimpedanz wird in Ohm (Ω) ausgedrückt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.12

Empfindlichkeit bei Last am Kabelende

Empfindlichkeit eines Hydrophons (oder einer Hydrophoneinheit) bei Last am Kabelende

$M_L(f)$

Verhältnis des Augenblickswertes der Spannung am Ende eines integrierten Kabels oder Ausgangssteckers eines **Hydrophons** oder einer **Hydrophoneinheit** bei Anschluss an eine festgelegte **elektrische Lastimpedanz** zum Augenblickswert des Schalldrucks im ungestörten **Freifeld** einer ebenen Welle am Ort des **Bezugsmittelpunkts** des **Hydrophons**, wenn das **Hydrophon** entfernt worden wäre

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Empfindlichkeit bei Last am Kabelende wird in Volt je Pascal (V/Pa) angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.13

Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende

Empfindlichkeit eines Hydrophons bei Leerlauf am Kabelende

$M_C(f)$

Verhältnis des Augenblickswertes der elektrischen Leerlaufspannung am Ende eines integrierten Kabels oder Ausgangssteckers eines **Hydrophons** zum Augenblickswert des Schalldrucks im ungestörten **Freifeld** einer ebenen Welle am Ort des **Bezugsmittelpunkts** des **Hydrophons**, wenn das **Hydrophon** entfernt worden wäre

Anmerkung 1 zum Begriff: Die **Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende** wird in Volt je Pascal (V/Pa) angegeben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.14

äußere Wandlerapertur

Teil der Oberfläche des **Ultraschallwandlers** oder der **Ultraschall-Wandlerelementgruppe**, der Ultraschall in das Ausbreitungsmedium aussendet

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Fläche ist entweder direkt im Kontakt mit dem Patienten oder mit Wasser oder einem Ausbreitungsmedium am Patienten (siehe IEC 62127-1, Bild 1).

Anmerkung 2 zum Begriff: Definition übernommen aus IEC 61828:2001.

3.15

Fernfeld

Bereich des Feldes, in dem $z > z_T$ entlang der **Bündelachse** ausgerichtet ist, für ebene, nicht fokussierende Ultraschallwandler

Anmerkung 1 zum Begriff: Im **Fernfeld** scheint der Schalldruck von einem Punkt auf oder in der Nähe der emittierenden Oberfläche sphärisch divergierend auszugehen. Daher ist der durch die Schallquelle erzeugte Druck ungefähr umgekehrt proportional zur Entfernung von der Schallquelle.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Begriff „**Fernfeld**“ wird in dieser Internationalen Norm nur in Zusammenhang mit nicht fokussierenden Ultraschallwandlern verwendet. Bei fokussierenden Wandlern werden die verschiedenen Teile des erzeugten Feldes anders bezeichnet (siehe IEC 61828).

ANMERKUNG 3 Wenn die Form der Wandlerapertur verschiedene **Übergangsabstände** erzeugt, wird der am weitesten vom Wandler entfernte verwendet.

[QUELLE: IEC 62127-1:2007/Änderung 1:2013, Begriff 3.28]

3.16

Freifeld

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

ANMERKUNG Definition übernommen aus IEC 60565:2006, 3.13.

3.17

Hydrophon

Wandler, der als Reaktion auf in Wasser übertragene Schallsignale elektrische Signale erzeugt

ANMERKUNG Definition übernommen aus IEC 60050-801, 801-32-26.

3.18

Hydrophoneinheit

Kombination aus Hydrophon und Hydrophon-Vorverstärker

ANMERKUNG Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.19

Hydrophonachse

nominelle Symmetrieachse des aktiven **Hydrophonelements**

ANMERKUNG 1 Sofern vom Hersteller nicht anderweitig (explizit und quantitativ) angegeben, wird sie für die Zwecke dieser Norm als diejenige Achse verstanden, die sich aus der offensichtlichen geometrischen Symmetrieachse des **Hydrophons** ergibt.

ANMERKUNG 2 Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.20

geometrischer Hydrophonradius **geometrischer Radius eines aktiven Hydrophonelements**

a_g

Radius, der durch die Maße des aktiven **Hydrophonelements** definiert ist

ANMERKUNG 1 Der geometrische Hydrophonradius wird in Meter (m) ausgedrückt.

ANMERKUNG 2 Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.21

Hydrophon-Vorverstärker

aktives elektronisches Gerät, das an ein bestimmtes **Hydrophon** angeschlossen ist bzw. angeschlossen werden soll und die Ausgangsimpedanz des **Hydrophons** verringert

ANMERKUNG 1 Ein **Hydrophon-Vorverstärker** erfordert eine Versorgungsspannung (oder Versorgungsspannungen).

ANMERKUNG 2 Der **Hydrophon-Vorverstärker** kann einen Vorwärts-Spannungsübertragungsfaktor von weniger als eins haben, d. h., er muss nicht unbedingt ein Spannungsverstärker im engeren Sinn sein.

ANMERKUNG 3 Definition übernommen aus IEC 62127-3.

3.22

Augenblickswert des Schalldrucks

$p(t)$

in einem bestimmten Punkt im Schallfeld der Unterschied zwischen dem Druck, der zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhanden ist, und dem Umgebungsdruck (siehe auch IEC 60050-801, 801-21-19)

ANMERKUNG 1 Der **Augenblickswert des Schalldrucks** wird in Pascal (Pa) angegeben.

ANMERKUNG 2 Definition übernommen aus IEC 62127-1.

3.23

Augenblickswert der Intensität

$I(t)$

Schallenergie, die je Zeiteinheit in der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle je Flächeneinheit senkrecht zu dieser Richtung zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Punkt eines Schallfelds übertragen wird

ANMERKUNG 1 Der **Augenblickswert der Intensität** ist das Produkt des **Augenblickswerts des Schalldrucks** und der Teilchengeschwindigkeit. Es ist schwierig, die Intensität im Frequenzbereich des Ultraschalls zu messen. Für die in dieser Internationalen Norm angeführten Messzwecke und unter Bedingungen mit ausreichendem Abstand von der **äußeren Wandlerapertur** (mindestens der Durchmesser eines Wandlers oder ein entsprechendes Wandlermaß im Falle eines nicht-kreisförmigen Wandlers) kann der **Augenblickswert der Intensität** durch den **Augenblickswert der abgeleiteten Intensität** angenähert werden.

ANMERKUNG 2 Der **Augenblickswert der Intensität** wird in Watt je Quadratmeter (W/m^2) angegeben.

3.24

Bezugsmittelpunkt

Punkt auf oder nahe einem **Hydrophon**, für den seine akustische Empfangsempfindlichkeit definiert ist

ANMERKUNG Sofern vom Hersteller nicht anderweitig (explizit und quantitativ) angegeben, wird er für die Zwecke dieser Norm als derjenige Punkt verstanden, der sich aus dem geometrischen Mittelpunkt der Frontfläche des aktiven **Hydrophonelements** ergibt. (Siehe IEC 60565:2006, 3.25.)

3.25

Unsicherheit

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

ANMERKUNG Siehe ISO *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [3], 2.2.3.

3.26

Augenblickswert der abgeleiteten Intensität

Quotient aus dem Quadrat des Augenblickswerts des Schalldrucks und der Schallkennimpedanz des Mediums zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Punkt in einem akustischen Feld

$$I(t) = \frac{p(t)^2}{\rho \cdot c} \quad (1)$$

Dabei ist

$p(t)$ der Augenblickswert des Schalldrucks;

ρ die Dichte des Mediums;

c die Schallgeschwindigkeit im Medium.

ANMERKUNG 1 Für die in dieser Internationalen Norm angeführten Messzwecke ist der **Augenblickswert der abgeleiteten Intensität** eine Annäherung an den **Augenblickswert der Intensität**.

ANMERKUNG 2 Für Messungen sehr nah am Wandler sollte eine erhöhte Unsicherheit berücksichtigt werden.

ANMERKUNG 3 Der **Augenblickswert der abgeleiteten Intensität** wird in Watt je Quadratmeter (W/m^2) ausgedrückt.

[QUELLE: IEC 62127-1:2007/ Änderung 1:2013, Begriff 3.78]

3.27

effektive Wellenlänge

λ

longitudinale Schallgeschwindigkeit im Ausbreitungsmedium dividiert durch die **akustische Mittenfrequenz**

ANMERKUNG 1 Die **effektive Wellenlänge** wird in Meter (m) angegeben.

[QUELLE: IEC 61828:2001, Begriff 4.2.24]

3.28

Längsebene

Ebene, die durch die **Bündelachse** und eine festgelegte orthogonale Achse bestimmt wird

ANMERKUNG 1 Siehe IEC 62127-1, Bild 1.

[QUELLE: IEC 62127-1:2007, Begriff 3.35]

3.29

Quellenaperturbene

Messebene, die der **äußeren Wandlerapertur** so nahe wie möglich ist und senkrecht zur **Bündelachse** steht

[QUELLE: IEC 61828:2006, Begriff 4.2.67]

3.30

Quellenaperturbreite

L_{SA}

in einer festgelegten **Längsebene** die größte **–20-dB-Bündelbreite** entlang der Schnittlinie zwischen der bezeichneten **Längsebene** und der **Quellenaperturbene**

ANMERKUNG 1 Siehe IEC 61828:2001, Bild 2.

ANMERKUNG 2 Die **Quellenaperturbreite** wird in Meter (m) angegeben.

[QUELLE: IEC 61828, Begriff 4.2.68]

3.31

Wandleraperturbreite

L_{TA}

volle Breite der Wandlerapertur entlang einer festgelegten Achse orthogonal zur Bündelachse des ungesteuerten Bündels in der Mitte des Wandlers

ANMERKUNG 1 Siehe IEC 62127-1, Bild 4.

ANMERKUNG 2 Die Wandleraperturbreite wird in Meter (m) angegeben.

[QUELLE: IEC 62127-1:2007/Änderung 1:2013, Begriff 3.87]

3.32

Übergangsabstand

z_T

für eine gegebene **Längsebene** auf der Grundlage der Wandlerkonstruktion (wenn bekannt) definiert oder durch Messung bestimmt:

- anhand der Konstruktion: die äquivalente Fläche der **Ultraschallaperturbreite** dividiert durch π multipliziert mit der **effektiven Wellenlänge**, λ ;
- für Messungen die äquivalente Fläche der **Quellenaperturbreite**, dividiert durch π multipliziert mit der **effektiven Wellenlänge**.

ANMERKUNG 1 Wird Verfahren a) verwendend, ein nichtapodisierter **Ultraschallwandler** mit Kreis-Symmetrie um die **Bündelachse**, ist die äquivalente Fläche πa^2 , wobei a der Radius ist. Daher ist der **Übergangsabstand** $z_T = a^2/\lambda$. Für das erste Beispiel eines quadratischen **Ultraschallwandlers** ist die äquivalente Fläche $(L_{TA})^2$, wobei L_{TA} die **Wandleraperturbreite** in der **Längsebene** ist. Daher ist der **Übergangsabstand** für beide orthogonalen **Längsebenen**, die beide Seiten oder die **Wandleraperturbreite** enthalten, $z_T = (L_{TA})^2/(\pi\lambda)$. Für das zweite Beispiel, für einen rechteckigen **Ultraschallwandler** mit **Wandleraperturbreiten** L_{TA1} und L_{TA2} , ist die äquivalente Fläche für die erste lineare Wandleraperturbreite zu Berechnungszwecken der **Übergangsabstand** der entsprechenden **Längsebene** $(L_{TA1})^2$, wobei L_{TA1} die **Wandleraperturbreite** in dieser **Längsebene** ist. Daher ist der **Übergangsabstand** für diese Ebene $z_{T1} = (L_{TA1})^2/(\pi\lambda)$. Für die orthogonale **Längsebene**, die die andere **Wandleraperturbreite** L_{TA2} enthält, ist die äquivalente Fläche für die andere zur Berechnung des Übergangsabstandes für die zugehörige **Längsebene** gleich $(L_{TA2})^2$, wobei L_{TA2} die **Wandleraperturbreite** in dieser **Längsebene** ist. Daher ist der **Übergangsabstand** für diese Ebene $z_{T2} = (L_{TA2})^2/(\pi\lambda)$.

ANMERKUNG 2 Wird Verfahren b) für Messungen in einer Längsebene verwendet, wird die **Quellenaperturbreite**, L_{SA} , in derselben Ebene verwendet in $z_T = (L_{SA})^2/(\pi\lambda)$.

ANMERKUNG 3 Der **Übergangsabstand** wird in Meter (m) angegeben.

[QUELLE IEC 61828:2001, Begriff 4.2.75, geändert: Es besteht ein bedeutender Unterschied in Gestaltung und Inhalt des Begriffs.]

4 Liste der Formelzeichen

a_h	wirksamer Hydrophonradius (a_{h3} , a_{h6} mit speziellem Bezug auf eine 3-dB- bzw. 6-dB-Definition)
a_g	geometrischer Hydrophonradius
$a_{\max}$	Höchstwert des wirksamen Radius für eine angegebene Hydrophonanwendung

	a_P	seitlicher Abstand von der Bündelachse ($a_{P_{maxE}}$, $a_{P_{maxH}}$: Höchstwerte, die sich auf die Vermeidung von Randwellen- bzw. Kopfwellenstörung beziehen)
	a_t	wirksamer Radius eines nicht fokussierenden Ultraschallwandlers
	A_g	geometrische Fläche eines Quellenwandlers
	B/A	Fox-Wallace-Nichtlinearitätsparameter
	c	Schallgeschwindigkeit in einem Medium (gewöhnlich Wasser)
	C_H	Kapazität eines Hydrophons am Kabelende einschließlich jeglichen integralen Kabels und Steckers
	$D(\theta)$	normierte Funktion der Richtungsempfindlichkeit
A2	d_1	Abstand zwischen dem Hilfswandler und dem Reflektor, gemessen entlang der Symmetrieachse
	d_h	Abstand zwischen dem Hilfswandler und dem aktiven Element des Hydrophons, gemessen entlang der Symmetrieachse
	d_m	Abstand zwischen dem Hilfswandler und dem letzten Minimum der Schalldruckamplitude entlang der Symmetrieachse des Hilfswandlers
	e	Basis des natürlichen Logarithmus
	f	Frequenz
	f_t	fundamentale Anregungsfrequenz eines Signals, das zum Erzeugen nichtlinearer Verzerrung verwendet wird
	f_u	oberer Frequenzgrenzwert des für ein Hydrophon angegebenen Frequenzbands
	I_p	Größe des Augenblickswerts der Intensität bei vorausgesetzter Proportionalität zum quadrierten Schalldruck
A2	I_{sc}	Strom, der über eine den Wandler ersetzenden Kurzschlussbrücke gemessen wird
	$I(x,y,z,t)$	Vektor des Augenblickswerts der Intensität am Punkt (x,y,z) zum Zeitpunkt t
	$I(x,y,z,t)$	Komponente des Augenblickswerts der Intensität in Ausbreitungsrichtung am Punkt (x,y,z) zum Zeitpunkt t
	F	geometrische Brennweite eines fokussierenden Wandlers
A2	G_{th}	Korrektur, die der Beugung im Ausbreitungsfeld Rechnung trägt und sich auf die durch den Wandler erzeugte Wellenform und den Empfang durch das Hydrophon bezieht
	G_{tt}	Korrektur, die der Beugung im Ausbreitungsfeld Rechnung trägt und sich auf die Erzeugung und den Empfang durch den Wandler bezieht
	j_{max}	Nummer des weitesten Abtastpunktes in einem Radial-Scan
A2	J_p	Reziprozitätskoeffizient für ebene Wellen
	k	Kreiswellenzahl ($= 2 \pi / \lambda$)
A2	I_t	Sendestrom, mit dem ein Wandler angesteuert wird
	L_{TA}	Wandleraperturbreite
	L_{SA}	Quellenaperturbreite
	$\underline{M}$	allgemeines Formelzeichen für die komplexe Hydrophon-Empfindlichkeit, wobei $M = \underline{M} $ deren Betrag und $\arg(\underline{M})$ deren Argument (= Phasenwinkel) ist
	$M_c(f)$	Hydrophon-Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende
	$M_L(f)$	Hydrophon-Empfindlichkeit bei Last am Kabelende
A2	M_t^*	scheinbarer Empfangs-Spannungsübertragungskoeffizient eines Hilfswandlers

	N_{av}	Anzahl an Wellenformmittelwerten, die zum Erzeugen des zeitlichen Mittelwertes der Spannungswellenform genommen wurde
	N	Anzahl an diametralen Bündelabtastungen
	N_{harm}	Ordnungszahl der Oberschwingung
A2	p_a	von einem Wandler an seiner Oberfläche erzeugter Schalldruck
	p_i	auf eine Wandleroberfläche einfallender Schalldruck
	p_h	auf die Oberfläche des Hydrophons einfallender Schalldruck
	p_0	Druckamplitude
	p_1	Schalldruckamplitude an der Austrittsfläche eines Wandlers
	$p(x,y,z,t)$	Augenblickswert des Schalldrucks am Punkt (x,y,z) zum Zeitpunkt t
	$P(l)$	Gesamtultraschalleistung, die durch eine Ebene unendlichen Ausmaßes in einem Schallfeld im Abstand l vom Ultraschallwandler hindurchtritt
	P_o	Gesamtultraschalleistung, die von einem Schallwandler ausgesendet wird
	rf	HF-Signale
	r	Abstand vom Ultraschall-Bündelmittelpunkt zu einem Abtastpunkt
	R	$(l/\pi a_1^2)$ – normierter Abstand zwischen einem Wandler und einem Hydrophon, normiert auf den Rayleigh-Abstand $(\pi a_1^2/\lambda)$
	R_{1i}, R_{2i}	Abstände vom Bündelmittelpunkt zu den Extremwerten der i -ten diametralen Bündelabtastung
A2	R_{RT}	Amplitudenreflexionskoeffizient der Reflektor/Wasser-Grenzfläche
	s	Abstand vom Ultraschall-Bündelmittelpunkt zum nächsten Abtastpunkt
A2	S_t^*	scheinbarer Sende-Stromübertragungskoeffizient eines Hilfswandlers
	t_H	Zeit des Eintreffens der ersten Kopfswelle
	t_{TDS}	verfügbare Zeit für eine Freifeld-Messung bei der Zeitverzögerungsspektrometrie
	TF	akustischer Übertragungsfaktor
	$U_L(x,y,z,t)$	Spannung am Kabelende für ein Hydrophon, das sich am Bezugspunkt (x,y,z) zum Zeitpunkt t befindet
	$U_L'(x,y,z,t)$	Spannung am Kabelende, einschließlich des Rauschens, für ein Hydrophon, das sich am Bezugspunkt (x,y,z) zum Zeitpunkt t befindet
A2	U_{Last}	Spannung, die mit Hilfe des an das System gekoppelten Wandlers gemessen wird
	$U_n(x,y,z)$	Effektivwert des Rauschpegels, der mit dem Hydrophon am Bezugspunkt (x,y,z) gemessen wurde
A2	U_t	von einem Wandler im Empfangsmodus erzeugte Spannung
	U_T	Spannung an den Anschlussklemmen eines Ultraschallwandlers
	$\vec{v}(x,y,z,t)$	Vektor des Augenblickswertes der Teilchengeschwindigkeit (Schnelle) am Punkt (x,y,z) zum Zeitpunkt t
	v_t	Geschwindigkeit einer Radialwelle in einer Wandlerplatte
	w_f	Bündelbreite der Grundfrequenz-Feldkomponente
	z	Koordinate entlang der Bündelachse, ausgehend von der Wandleroberfläche (z_1, z_2, z_3 und z_4 sind spezielle Abstandswerte entsprechend bestimmter Kriterien bezüglich der Randwellen und Kopfwellen)

	$z_{\min}$	Mindestabstand für ein Hydrophon endlicher Größe von einem Wandler
	z_{pf}	Abstand des Druckfokus von einem fokussierenden Wandler
	z_{T}	Übergangsabstand
A2	Z_{RT}	Schallkennimpedanz des Reflektors
	Δz	Abstandsdifferenz
	Z_{h}	komplexe elektrische Ausgangsimpedanz eines Hydrophons
	Z_{L}	komplexe elektrische Lastimpedanz
	α	Amplitudendämpfungskoeffizient der Messflüssigkeit (Wasser) für ebene Wellen geringer Signalstärke
	β	Nichtlinearitätsparameter im Sinne von $\beta = 1 + B/(2A)$
	δ	Amplitude der zweiten Harmonischen, ausgedrückt als Prozentzahl des Schalldrucks bei der Grundfrequenz
	δ_{av}	Druckamplitudenkorrektur für die endliche Größe des Hydrophons
	θ	Winkel zwischen der Ultraschall-Ausbreitungsrichtung und der z -Achse, entspricht dem Winkel zwischen der Geraden, die den Mittelpunkt des Ultraschallwandlers mit dem Mittelpunkt des Hydrophons verbindet, und der Ausbreitungsrichtung
	θ_1	Winkel zwischen der Geraden, die den Mittelpunkt des Ultraschallwandlers mit dem Mittelpunkt des Hydrophons verbindet, und der Richtung, in der die maximale Empfindlichkeit des Hydrophons liegt
	γ	Verhältnis des Bündelradius zum wirksamen Hydrophonradius
	ζ	akustische Verschiebung, von einem optischen Interferometer gemessen
	θ	Einfallswinkel einer Ultraschallwelle bezüglich der Hydrophonachse (θ_3 , θ_6 : mit speziellem Bezug auf eine 3-dB- bzw. 6-dB-Definition)
	λ	Ultraschall-Wellenlänge
	λ_1	optische Wellenlänge
	ξ	das $\pi/2$ -Fache der Rayleigh-Länge (a_t^2/λ , siehe IEC 61828) eines fokussierenden Wandlers
	ρ	(Massen-)Dichte der Messflüssigkeit (Wasser)
A2	ρc	Schallkennimpedanz der Messflüssigkeit (Wasser)
	σ	nichtlinearer Verzerrungsparameter
	σ_{m}	nichtlinearer Ausbreitungsparameter
	τ	Pulsdauer oder Tonburst-Dauer (τ_{maxE} , τ_{maxH} : Höchstwerte, die sich auf die Vermeidung von Randwellen- bzw. Kopfwellenstörung beziehen)
	ω	Kreisfrequenz

5 Überblick über die Kalibrierverfahren

5.1 Prinzipien

Hydrophone werden für absolute Messungen der Eigenschaften eines Schallfeldes benötigt. Die zeitabhängige Ausgangsspannung eines **Hydrophons**, $u(t)$, kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$u(t) = p(t) * m(t) \quad (2)$$

Dabei ist

- $p(t)$ die Schallpulsform;
* eine Faltung;
 $m(t)$ die Impulsantwort des **Hydrophons**.

Wenn der Fourier-Bereich betrachtet wird und $U(f)$, $P(f)$ und $M(f)$ die jeweiligen Fourier-Transformierten sind, dann ist das resultierende Spannungsspektrum, $U(f)$, gleich $P(f) \times M(f)$. Die Größe $M(f)$ ist die komplexwertige Übertragungsfunktion (Empfindlichkeit) des **Hydrophons**, die sowohl reale als auch imaginäre Komponenten umfasst.

In Übereinstimmung mit der derzeitigen Messpraxis werden **Hydrophone** in dieser Norm als Amplituden- (= Betrags-) Sensoren und nicht als Phasensensoren behandelt. Es gibt jedoch Anzeichen dafür, dass die Phasenmessung in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird, insbesondere auf Grund der Entfaltungsverfahren (siehe IEC 62127-1), die die komplexe Übertragungsfunktion der **Hydrophone** erfordern. Wenn Phasenmessungen tatsächlich wichtig werden, wird diese Norm einer Überarbeitung bedürfen, wobei für diese Art von Messungen strengere Anforderungen gestellt werden müssen. Eine Zusammenfassung der derzeitigen Leistungsfähigkeit von (relativen) Phasenmessungen ist im Anhang I des vorliegenden Dokuments enthalten.

ANMERKUNG 1 Dementsprechend wird die **Hydrophon**-Empfindlichkeit in dieser gesamten Norm als eine reale Größe (die ein Amplitudenverhältnis ausdrückt) verstanden.

Die Festlegung der Kalibrierverfahren erfolgt unter Anwendung folgender Prinzipien:

a) Kalibrierung mit einem Standardwandler

Ein **Hydrophon** kann durch Vergleich mit einem Standardwandler, der als Ultraschalleistungsquelle verwendet wird, kalibriert werden. Die Ausgangsleistung des Schallwandlers muss nach einem Verfahren mit einer Schallfeldkraftwaage (siehe IEC 61161) bestimmt werden.

b) Kalibrierung ohne Standardwandler

Diese Art der Kalibrierung umfasst:

1) Reziprozitätskalibrierung

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

2) Physikalische Kalibrierung

Eine Kalibrierung, bei der der Schalldruck am Hydrophon aus der Messung eines mit dem Schallfeld im Zusammenhang stehenden physikalischen Parameters, wie z. B. akustische Verschiebung usw., berechnet wird (z. B. optische Interferometrie).

ANMERKUNG 2 Die „Absolut“kalibrierung von **Hydrophonen** wird hier so verstanden, dass kein Bezug auf ein anderes **Hydrophon** genommen wird. Diese Kalibrierung wird manchmal auch „Primär“kalibrierung genannt. Andererseits werden **Hydrophone** in der Praxis oft nach einem „Sekundär“verfahren oder „Substitutions“verfahren kalibriert, was einem Empfindlichkeitsvergleich mit einem kalibrierten Referenz-**Hydrophon** entspricht. Das Referenz-**Hydrophon** selbst kann in einem „Absolut“verfahren oder wiederum gegen ein anderes Referenz-**Hydrophon** kalibriert worden sein usw. Offensichtlich gibt es zwei verschiedene grundlegende Verfahren: Durchführung einer Absolutkalibrierung des **Hydrophons** oder Vergleich der Empfindlichkeit von zwei **Hydrophonen**. Abschnitte 9, 10, 11 und die Anhänge D, F und H behandeln das erstgenannte Grundverfahren. Die letztgenannte Verfahrensweise wird in Abschnitt 12 ausführlich behandelt. Es sollte beachtet werden, dass eine Kalibrierung nach dem Substitutionsverfahren üblicherweise beide Schritte beinhaltet und dass der interessierte Anwender sowohl Abschnitt 12 als auch die anderen Abschnitte heranziehen sollte, die Absolutkalibrierung behandeln (und dass im Fall der Kalibrierung nach dem Substitutionsverfahren die **Unsicherheiten** von beiden grundlegenden Schritten zur endgültigen Kalibrier-**Unsicherheit** beitragen).

5.2 Zusammenfassung der Kalibrierverfahren

Die geeigneten Frequenzbereiche der verschiedenen Verfahren, die zum Kalibrieren von Ultraschall-**Hydrophonen** verwendet werden können, sind nachfolgend angegeben, wobei auf die Abschnitte dieses Dokuments verwiesen wird, in denen eine Beschreibung der Verfahren enthalten ist. Tabelle 1 liefert eine tabellarische Auflistung der üblicherweise erzielbaren Kalibrier-**Unsicherheiten**.

- a) Freifeld-Kalibrierung nach dem Reziprozitätsgesetz Abschnitt 9
 - Kalibrierung ohne Standardwandler in einem **Freifeld** zwischen 50 kHz und 15 MHz
- b) **Freifeld**-Kalibrierung durch Flächenabtastung Abschnitt 10
 - Kalibrierung mit einem Standardwandler in einem **Freifeld** zwischen 500 kHz und 15 MHz
- c) Kalibrierung mit optischer Interferometrie Abschnitt 11
 - physikalische Kalibrierung durch eine **Freifeld**-Messung der akustischen Verschiebung zwischen 200 kHz und 40 MHz
- d) Kalibrierung durch Vergleich Abschnitt 12
 - Kalibrierung durch Vergleich mit einem kalibrierten **Hydrophon** zwischen 50 kHz und 40 MHz

Tabelle 1 – Liste typischer Unsicherheitswerte, die mit den in dieser Norm angegebenen Kalibrierverfahren für den hierin berücksichtigten Frequenzbereich erhalten werden (1 von 2)

Abschnitt	Verfahren	Frequenzbereich	Unsicherheit
9	Zwei-Wandler-Reziprozitätskalibrierung (9.3.4)	1 MHz bis 2 MHz	6 %
		bis zu 10 MHz	10 %
		bis zu 15 MHz	16 %
	Reziprozitätsverfahren mit drei Wandlern (9.3.1)	50 kHz bis 100 kHz	5 %
		bis zu 500 kHz	6 %
		bis zu 1 MHz	10 %
10	Freifeld-Kalibrierung durch Flächenabtastung (Anhang D)	500 kHz bis 10 MHz	6 %
		bis zu 15 MHz	18 %
11	Freifeld-Kalibrierung durch optische Interferometrie (Anhang F)	200 kHz* bis 1 MHz	7 %
		bis zu 10 MHz	7 %
		bis zu 20 MHz	8 %
		bis zu 30 MHz	10 %
		bis zu 40 MHz	11 %

Tabelle 1 (2 von 2)

Abschnitt	Verfahren	Frequenzbereich	Unsicherheit
12	Kalibrierung durch Vergleich mit einem Standard-Hydrophon (12.5.2) (Anhang G, Anhang H)	50 kHz bis 200 kHz	9 %
		bis zu 1 MHz	8 %
		bis zu 10 MHz	7 %
		bis zu 20 MHz	11 %
		bis zu 30 MHz	12 %
		bis zu 40 MHz	12 %
* Der untere Wert von 200 kHz des Frequenzbereiches sollte nicht als unterer Grenzwert angesehen werden, bis zu dem die Kalibrierung mit optischer Interferometrie durchgeführt werden kann. Dieser wird üblicherweise durch die Reflexionen am Wasserbehälter und an dem zu kalibrierenden Gerät bestimmt.			

5.3 Angabe der Ergebnisse

Die Empfindlichkeit der **Hydrophon**-Einheit am Kabelende muss in V/Pa bzw. in dezimalen Teilen davon oder als logarithmischer Pegel in dB mit Bezug auf einen festgelegten Empfindlichkeitswert angegeben werden. Außerdem muss angegeben werden, ob der angegebene Empfindlichkeitswert der **Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende** oder der **Empfindlichkeit bei Last am Kabelende** entspricht. Im letztgenannten Fall müssen die betreffenden elektrischen Lastbedingungen mit angegeben werden, d. h. die Impedanz der elektrischen Last, um die besagte Empfindlichkeit zu erhalten.

ANMERKUNG 1 „Am Kabelende“ verweist auf das Ende des Ausgangskabels der **Hydrophon**-Einheit mit oder ohne **Hydrophon-Vorverstärker**.

Die **Unsicherheit** der Empfindlichkeitsangabe muss angegeben werden. Wenn die Empfindlichkeit für einen Frequenzbereich angegeben wird, muss die Unsicherheit genau für denselben Frequenzbereich angegeben werden. Erfolgt die Empfindlichkeitsangabe für eine Anzahl von Frequenz(punkt)en, dann sollte die **Unsicherheit** für Frequenzbereiche angegeben werden, die für den Anwender wahrscheinlich von Nutzen sind.

ANMERKUNG 2 Eine Anleitung zur Beurteilung der **Unsicherheit** ist im Anhang A enthalten.

Der Frequenzbereich, für den die Empfindlichkeitsangabe erfolgt und für den die **Unsicherheit** gilt, muss angegeben werden. Für die Zwecke dieser Norm dürfen die Werte der Empfindlichkeit und der **Unsicherheit** für mehrere Frequenzbereiche getrennt angegeben werden. Der Frequenzgang darf als Absolutwert der Empfindlichkeit oder als Relativwert mit Bezug auf den Absolutwert der **Hydrophon**-Empfindlichkeit bei einer bestimmten Frequenz angegeben werden. Im Fall der Relativangabe müssen die Bezugsempfindlichkeit und die Frequenz, für die die Angabe gilt, angegeben werden.

Die Verfahren, nach denen die Empfindlichkeit und deren **Unsicherheit** erhalten wurden, müssen beschrieben werden.

Jede Kalibrierung ist lediglich für die während der Kalibrierung herrschenden Umgebungsbedingungen gültig. Aus diesem Grund müssen die für die Kalibrierung zutreffenden Umgebungsbedingungen mit angegeben werden. Dies schließt all diejenigen Bedingungen ein, die die Empfindlichkeit des Gerätes beeinflussen könnten. Zu den anzugebenden Bedingungen gehören:

- Datum der Kalibrierung;
- Wassertemperatur und deren **Unsicherheit**;
- ob die **Hydrophoneinheit** einen **Hydrophon-Vorverstärker** enthält oder nicht, einschließlich einer eindeutigen Identifikationsangabe;

- Wasserbeschaffenheit, Länge der Tauchdauer und jegliches angewendete Benetzungsverfahren, wie z. B. die Zugabe eines Benetzungsmittels;

ANMERKUNG 3 Die Empfindlichkeit eines elektrisch nicht abgeschirmten **Hydrophons** mit Einschichtmembran wird z. B. durch die elektrische Leitfähigkeit des verwendeten Wassers beeinflusst.

ANMERKUNG 4 Das Verhalten einiger **Hydrophone** kann sich während des Eintauchens in Wasser ändern, und es ist wichtig, dass die Kalibrierungen erst im Anschluss an eine zum Stabilisieren des Verhaltens ausreichende Tauchdauer abgeschlossen werden.

- die Ausrichtung des **Hydrophons** bezüglich jeglicher Achse oder Ausrichtungskennzeichnung auf dem Körper oder Gehäuse;
- Festlegung der Einzelheiten zur Befestigung für Situationen, in denen die Art der Befestigung die Empfindlichkeit des **Hydrophons** beeinflusst;

ANMERKUNG 5 Die Festlegung der Einzelheiten der Hydrophonbefestigung hat mit Sorgfalt zu erfolgen, wenn bei niedrigen Frequenzen (unterhalb 200 kHz) die akustischen Wellenlängen so groß sind, dass die Verwendung langer Tonbursts zu einer Störung des direkten akustischen Signals durch Reflexionen von der Befestigung führen kann. Das Ausmaß des Effektes kann dadurch untersucht werden, dass die Burstlänge verändert und der Einfluss der Reflexionen auf das Hydrophonsignal beobachtet wird. Akustische Absorber können zur Unterdrückung dieser Reflexionen nützlich sein. Auch die Hydrophonempfindlichkeit kann durch die Art der Hydrophonbefestigung beeinflusst werden, und auch dies kann durch systematische Untersuchung der verschiedenen Anordnungen herausgefunden werden.

- eine Spezifikation der Eigenschaften jeglicher am **Hydrophon** während der Kalibrierung angebrachter zusätzlicher Kabel;
- die nominelle Richtung des einfallenden Ultraschalls in Bezug zum **Hydrophon**;

ANMERKUNG 6 Der letzte Punkt ist wichtig, da veröffentlichte Untersuchungen [4] zeigen, dass sich selbst bei Membran-**Hydrophonen** die Empfindlichkeit bei Umkehr der Ultraschallausbreitungsrichtung in Bezug zum **Hydrophon** ändert.

- der Höchstwert des während der Kalibrierung auf das **Hydrophon** einwirkenden Schalldrucks;

ANMERKUNG 7 Anhang B beschreibt die Linearität von **Hydrophonen**, die aus Polyvinylidenfluorid (PVDF) hergestellt und für die Verwendung zur Charakterisierung von Schallfeldern hoher Amplituden bestimmt sind.

- jegliche getroffene Annahme zum untersuchten Gerät (z. B. die Lage des **Hydrophon-Bezugsmittelpunkts**).

Wenn von einem kalibrierten **Hydrophon** Gebrauch gemacht wird in einer Umgebung, die sich wesentlich von der bei der Kalibrierung vorliegenden Umgebung unterscheidet, muss der Anwender möglicherweise seine Beurteilung der **Messunsicherheiten** nach oben korrigieren, um die Umgebungsänderung zu berücksichtigen.

5.4 Empfohlene Kalibrierperioden

Die für das Hydrophon empfohlene Kalibrierperiode hängt von dessen Eigenschaften ab. Der Hersteller muss dieses Intervall angeben.

ANMERKUNG 1 Eine Kalibrierperiode von einem Jahr wird in den meisten Fällen angemessen sein (siehe IEC 62127-3).

Bei Referenz-**Hydrophonen**, die ausschließlich für Kalibrierzwecke verwendet werden, wird empfohlen, eine jährliche Kalibrierung vorzunehmen. Bei Feldanwendungen von **Hydrophonen** können in kürzeren Zeitabständen durchgeführte Kalibrierungen erforderlich sein.

ANMERKUNG 2 Es kann hilfreich sein, die Kalibrierung eines Arbeits-(oder Feld-) **Hydrophons** durch einen „Stichproben-Vergleich“ mit einem zweiten kalibrierten (Referenz-) **Hydrophon** oder einer Prüfschallquelle zu überprüfen, wobei eines der im Anhang G beschriebenen Wellenformkonzepte zur Anwendung kommt. In Extremfällen, in denen Bedenken bezüglich der Stabilität des Arbeits-**Hydrophons** bestehen, kann dies vor und nach den Messungen erfolgen (siehe IEC 62127-1 über die **Hydrophon**-Anwendung).

6 Generelle Anforderungen an ein Hydrophon-Kalibriersystem

6.1 Mechanische Positionierung

6.1.1 Allgemeines

Die genaue Positionierung und Ausrichtung des Wandlers, **Hydrophons** und Reflektors (für das in Abschnitt 9 beschriebene Reziprozitätsverfahren) sind erforderlich, und diese Teile sollten in stabilen, festen Halterungen angebracht werden, die die Ausführung der angemessenen Einstellungen erlauben. Es wird empfohlen, dass das **Hydrophon** und der Wandler so mit einer Einrichtung zur Einstellung seitlicher Positionen und Ausrichtung ausgestattet werden, dass die Änderung des **Hydrophon**-Ausgangssignals weniger als 0,1 dB beträgt, wenn die Befestigungsvorrichtungen, die entweder die räumliche Positionierung oder die relative Ausrichtung des **Hydrophons** regeln, um einen Inkrementschritt bewegt werden.

6.1.2 Genauigkeit der axialen Hydrophon-Position

Der axiale Abstand des **Hydrophon-Bezugsmittelpunkts** vom Wandler muss bekannt und mindestens auf 0,2 mm reproduzierbar sein.

ANMERKUNG 1 Es wird empfohlen, dass Wiederholmessungen zum Ableiten der Kalibrier-**Unsicherheit** durchgeführt werden, die das Entfernen und Wiederanbringen des **Hydrophons** am selben Punkt im Wandlerfeld beinhalten können.

ANMERKUNG 2 Der **Hydrophon**abstand vom Wandler kann aus der Kenntnis der Zeit ermittelt werden, die zwischen der elektrischen Anregung des Wandlers und dem Eintreffen der akustischen Welle am **Hydrophon** verstreicht, wenn die Schallgeschwindigkeit in Wasser bei der betreffenden Temperatur bekannt ist.

Diese Anforderung kann im Fall von fokussierenden Quellenwandlern eine Änderung erfordern, abhängig von ihrer tatsächlichen axialen Feldverteilung.

ANMERKUNG 3 Bei fokussierenden Quellenwandlern, die im Frequenzbereich dieser Internationalen Normen arbeiten, ist die Positionierung kritisch. Folgendes ist eine Abschätzung der axialen Abstandsänderung vom Fokusabstand, d. h. $\Delta z = F - z$, die zu einer Druckminderung von 1 dB führt. Ausgehend von der im Anhang von IEC 61828 angegebenen theoretischen Gleichung $\sin[\xi (1/z - 1/F)]/\xi (1/z - 1/F) = 0,89$, wobei $\xi = \pi a_t^2 f / (2 c)$ ist, führt eine Zweiterm-Sinusentwicklung zu $\Delta z = 0,808 F^2/\xi$.

ANMERKUNG 4 Im folgenden Beispiel unterscheiden sich die Ultraschallamplituden an zwei axialen, 2 mm auseinanderliegenden Positionen, wenn sich eine ebene Ultraschallwelle im linearen Amplitudenbereich bei einer Wassertemperatur von 22 °C ausbreitet, bei einer Frequenz von 15 MHz um 0,09 dB und bei einer Frequenz von 40 MHz um 0,7 dB, was auf der frequenzabhängigen Dämpfung beruht (siehe Anhang E).

6.1.3 Genauigkeit der seitlichen Hydrophon-Position

Es wird empfohlen, die Änderung der **Hydrophon**-Ausgangsspannung zu überprüfen, wenn die seitliche **Hydrophon**-Position geändert wird, um sicherzustellen, dass das Signal maximiert wird.

ANMERKUNG Im **Fernfeld** einer theoretischen ebenen kreisförmigen Kolbenquelle und in der Fokalebene eines theoretischen fokussierenden Wandlers unter linearen Ausbreitungsbedingungen beträgt der seitliche Abstand von der Feldachse bei einer 0,5-dB-Amplitudenminderung $r = 0,107 c z/(f a_t)$ und bei einer 1-dB-Amplitudenminderung $r = 0,151 c z/(f a_t)$.

6.2 Temperaturmessung und Temperaturstabilität

Die elektroakustischen Eigenschaften von **Hydrophonen** können mit der Umgebungstemperatur schwanken. Aus diesem Grund wird empfohlen, das **Hydrophon** möglichst immer unter den gleichen Temperaturbedingungen wie bei der Anwendung zu kalibrieren. Wenn dies nicht möglich ist, können Korrekturen an den Werten der **Hydrophon**-Empfindlichkeit und des Frequenzgangs auf Grundlage früherer Kalibrierungen oder validierter analytischer Modelle vorgenommen werden. Die korrigierten Werte der Empfindlichkeit und des Frequenzgangs des **Hydrophons** sollten eine geringere **Unsicherheit** aufweisen als die unkorrigierten Werte.

ANMERKUNG Temperaturdriften sind aus zwei Gründen zu vermeiden:

- a) Die Amplitude der am **Hydrophon** eintreffenden Ultraschallwelle hängt von der Temperatur ab, was eine Folge der temperaturabhängigen Ultraschalldämpfung in Wasser ist (siehe Anhang E).
- b) Die Laufzeit des Ultraschallsignals hängt als Folge der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit in Wasser von der Temperatur ab (siehe Anhang E). Dies ist für die Einstellung des Zeitfensters für Tonbursts oder Pulse und auch für die Zeitverzögerungsspektrometrie von Bedeutung.

Bezüglich a) kann folgendes Beispiel gegeben werden: Wenn sich eine ebene Ultraschallwelle im linearen Amplitudenbereich bei einer Temperatur um 22 °C über 15 cm ausbreitet, beträgt die Differenz zwischen den Ultraschallamplituden für zwei sich um 1 °C unterscheidende Temperaturen bei einer Frequenz von 15 MHz 0,2 dB und bei einer Frequenz von 40 MHz 1,5 dB. (Der Kleinamplituden-Dämpfungskoeffizient in Wasser ist proportional zum Frequenzquadrat. Im Anhang E sind Werte als Funktion der Temperatur angegeben.)

Bezüglich b) kann folgende Empfehlung gegeben werden: Bei einer Messung vom Typ II nach der Beschreibung im Abschnitt 12 (Vergleich der Empfindlichkeit von zwei oder mehr **Hydrophonen**) sollte der axiale **Hydrophon**-Abstand auf eine konstante Ausbreitungsdauer eingestellt werden.

6.3 Hydrophon-Größe

Das aktive Element eines **Hydrophons** erzeugt an seinen Elektroden eine Spannung, die proportional zum Mittelwert des Schalldrucks über der Elementoberfläche ist. Wenn eine vollständige räumliche Auflösung erreicht werden soll, muss der **wirksame Hydrophonradius** im Vergleich zur Wellenlänge des höchsten Frequenzanteils im für die Kalibrierung angewendeten Schallfeld klein sein. Des Weiteren wird der tatsächliche Schalldruck auf der empfindlichen **Hydrophon**-Oberfläche durch die vom **Hydrophon** selbst verursachte Beugung beeinflusst [5], [6], [7].

ANMERKUNG 1 Wenn das **Hydrophon** so sorgfältig entworfen wurde, dass es eine bekannte oder gut definierte aktive Oberfläche hat, kann es möglich sein, die Auswirkungen der räumlichen Mittelwertbildung und der Beugung bei einer bestimmten Frequenz durch Entfaltung auf Grundlage der bekannten Maße des aktiven Elements zu beseitigen.

ANMERKUNG 2 Eine Anleitung zur Beurteilung des Einflusses der räumlichen Mittelung auf Kalibrierungen ist in IEC 62127-1 und Anhang J zu finden.

6.4 Messgefäß und Wasserbeschaffenheit

Der Prüfbehälter muss groß genug sein, um die Verwirklichung von Freifeld-Bedingungen bei der niedrigsten betrachteten Frequenz zu ermöglichen. Er sollte ebenfalls groß genug sein, um den Abstand von Wandler und Hydrophon bis zu einem Grad zu variieren, der mit den Anforderungen der angewandten Kalibriertechnik vereinbar ist.

Die Wände des Behälters und die Wasseroberfläche sollten sich in ausreichendem Abstand zum Wandler und **Hydrophon** befinden, um sicherzustellen, dass jegliches auf Reflexion an diesen Oberflächen beruhende Signal nicht das Eintreffen des ersten vom Wandler erzeugten Signals stört. Des Weiteren sollten, falls möglich, derartige Oberflächen mit Schall absorbierenden Werkstoffen beschichtet sein.

Es ist wichtig, dass das Schallsignal nicht durch Reflexionen gestört wird. Die folgende Prüfung wird zu Beginn jeder Messung empfohlen. In allen Fällen, in denen Tonbursts oder Pulse angewendet werden, sollte das **Hydrophon**-Ausgangssignal beobachtet werden, wenn der Wandler-**Hydrophon**-Abstand um einige Millimeter geändert wird, um sich zu vergewissern, dass keine mehrfachen Wandler-**Hydrophon**-Echos des Empfangssignals auftreten. Wenn derartige Echos das Empfangssignal stören, könnte die Änderung der Pulswiederholfrequenz eine Abhilfemaßnahme darstellen.

Die Wassereigenschaften müssen mit der vom **Hydrophon**-Hersteller getroffenen Festlegung übereinstimmen.

ANMERKUNG Die Empfindlichkeit einiger **Hydrophone** kann von der elektrischen Leitfähigkeit des wässrigen Mediums abhängen. In derartigen Fällen muss sorgfältig vorgegangen werden, um sicherzustellen, dass die Bedingungen für die Messung denen für die Kalibrierung ähnlich sind.