

	Ultraschall Hydrophone Eigenschaften und Kalibrierung im Frequenzbereich von 15 MHz bis 40 MHz (IEC 62092:2001) Deutsche Fassung EN 62092:2001	DIN EN 62092
ICS 11.040.55; 17.140.50 Ultrasonics Hydrophones Characteristics and calibration in the frequency range from 15 MHz to 40 MHz (IEC 62092:2001); German version EN 62092:2001 Ultrasons Hydrophones Caractéristiques et étalonnage dans la gamme de fréquences de 15 MHz à 40 MHz (CEI 62092:2001); Version allemande EN 62092:2001 Die Europäische Norm EN 62092:2001 hat den Status einer Deutschen Norm. Beginn der Gültigkeit Die EN 62092 wurde am 2001-10-01 angenommen. Nationales Vorwort Für die vorliegende Norm ist das nationale Arbeitsgremium GUK 821.3 „Medizinische Ultraschallgeräte“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE zuständig. Norm-Inhalt war veröffentlicht als E DIN EN 62092:2001-02. Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 87 „Ultrasonics“ erarbeitet. Fortsetzung Seite 2 und 53 Seiten EN DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		
 Documents Document Sharing Hub		

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

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

IEC hat 1997 die Benummerung der IEC-Publikationen geändert. Zu den bisher verwendeten Normnummern wird jeweils 60000 addiert. So ist z. B. aus IEC 68 nun IEC 60068 geworden.

Deutsche Fassung

Ultraschall
Hydrophone

Eigenschaften und Kalibrierung im Frequenzbereich von 15 MHz bis 40 MHz
(IEC 62092:2001)

Ultrasonics
Hydrophones
Characteristics and calibration in the frequency
range from 15 MHz to 40 MHz
(IEC 62092:2001)

Ultrasons
Hydrophones
Caractéristiques et étalonnage dans la gamme
de fréquences de 15 MHz à 40 MHz
(CEI 62092:2001)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2001-10-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

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

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

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien, Tschechische Republik und dem Vereinigten Königreich.

CENELEC

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

Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	6
3 Definitionen	6
4 Liste der verwendeten Zeichen	9
5 Hydrophoneigenschaften	10
5.1 Allgemeines	10
5.2 Grundlegende Daten	10
5.3 Hydrophonklasse	11
5.4 Empfindlichkeit	11
5.5 Frequenzgang	11
5.6 Richtcharakteristik	12
5.7 Effektiver Radius	13
5.8 Dynamischer Bereich und Linearität	13
5.9 Elektrische Ausgangskenngößen	14
5.9.1 Elektrischer Ausgang	14
5.9.2 Konfiguration der Ausgangsleitung und Nachschwingresonanz im Kabel	15
5.10 Informationen über den integrierten Verstärker, falls vorhanden	15
5.11 Umgebungs- und andere Aspekte	15
5.11.1 Temperaturbereich	15
5.11.2 Wasserfestigkeit	15
5.11.3 Wassereigenschaften und unvereinbare Materialien	15
5.11.4 Sonstige Aspekte	15
6 Relative Messungen von Hydrophoneigenschaften	16
6.1 Allgemeine Begriffe	16
6.1.1 Relative Messung für die Ermittlung der Richtcharakteristik und für den Empfindlichkeitsvergleich	16
6.1.2 Zeitliche Wellenform- und Frequenzvarianten und Hydrophonlage	16
6.2 Messvarianten	17
6.2.1 Ultraschallwandler	17
6.2.2 Messarten	18
6.2.3 Varianten der zeitlichen Wellenformen	19
6.2.4 Varianten der Hydrophonlage	20
6.3 Anforderungen	23
6.3.1 Messgefäß und Wasser	23
6.3.2 Temperaturstabilität	23
6.3.3 Lagegenauigkeit	24
6.3.4 Maximale Hydrophongröße	24

	Seite
6.3.5 Anforderungen an die elektronischen Geräte	26
6.3.6 Anforderungen mit besonderem Bezug auf die Time-Delay-Spektrometrie	27
7 Hydrophonkalibrierung	27
Anhang A (informativ) Tabellen	29
Anhang B (informativ) Verhalten von PVDF-Polymersensoren in Ultraschallfeldern hoher Intensität	32
Anhang C (informativ) Hydrophonpositionierung im Ultraschall-Nahfeld	35
Anhang D (informativ) Time-Delay-Spektrometrie – Anforderungen und kurzer Überblick über die Technik	37
Anhang E (informativ) Die absolute Kalibrierung von Hydrophonen bis 40 MHz	40
Anhang F (informativ) Literaturhinweise	50
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	53
 Bild 1 – Koordinaten eines Feldpunkts P im Nahfeld eines ebenen, kreisförmigen Ultraschallwandlers mit dem Radius a	 28
Bild E.1 – Experimenteller Aufbau der interferometrischen Folienmethode	43
Bild E.2 – Von einem koplanaren Membranhydrophon von 9 μm erzeugte Hydrophonwellenform; das Membranhydrophon ist im Brennpunkt eines 5-MHz-Wandlers (Brennweite 51 mm) angeordnet	46
Bild E.3 – Mit der Folie erzeugte Interferometer-(Verschiebungs-)Wellenform; die Folie ist im Brennpunkt des 5-MHz-Wandlers (Fokalposition 51 mm) angeordnet	46
Bild E.4 – Frequenzspektrum der Verschiebungswellenform (untere Kurve) und der differenzierten Verschiebungswellenform (obere Kurve)	47
Bild E.5 – Empfindlichkeit eines bilaminaren 9-μm-Membranhydrophons mit 0,2 mm aktivem Element, ermittelt bei 5-MHz-Abständen über einen Frequenzbereich 5 MHz bis 60 MHz	47
 Tabelle A.1 – Liste typischer Unsicherheitswerte, die mit den in dieser Norm angegebenen Kalibriermethoden für den hier behandelten Frequenzbereich erzielt werden	 29
Tabelle A.2 – Schallgeschwindigkeit c [18, 19] und linearer Amplitudenschwächungskoeffizient α, dividiert durch die quadrierte Frequenz ([20], interpoliert) als Funktion der Temperatur, in Wasser	30
Tabelle A.3 – Wellenformvarianten und Hydrophonlagevarianten	30
Tabelle A.4 – Dezibel-(dB)-Werte und entsprechende Amplitudenverhältnisse	31

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 87/203A/FDIS, zukünftige 1. Ausgabe von IEC 62092, ausgearbeitet von dem IEC TC 87 „Ultrasonics“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2001-10-01 als EN 62092 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2002-07-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2004-10-01

Anhänge, die als „normativ“ bezeichnet sind, gehören zum Norminhalt.
Anhänge, die als „informativ“ bezeichnet sind, enthalten nur Informationen.
In dieser Norm ist Anhang ZA normativ und sind die Anhänge A, B, C, D und E informativ.
Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62092:2001 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

Einleitung

Die räumliche und zeitliche Schalldruckverteilung in einem Ultraschallfeld in einem flüssigen Medium wird gemeinhin mit Hilfe von Miniatur-Ultraschall**hydrophonen** ermittelt. Die Eigenschaften und die Kalibrierung dieser **Hydrophone** sind in einer Reihe von IEC-Normen für den Frequenzbereich 0,5 MHz bis 15 MHz behandelt worden. Der Zweck der vorliegenden Internationalen Norm ist es, diesen Frequenzbereich bis 40 MHz zu erweitern. Die Hauptanwendung von **Hydrophonen** in diesem Zusammenhang ist die Messung von Ultraschallfeldern, die von medizinisch-diagnostischen Geräten in Wasser abgestrahlt werden. Es hat sich in den letzten Jahren gezeigt, dass der Einsatz von **Hydrophonen** im Frequenzbereich über 15 MHz von Bedeutung für die vollständige Charakterisierung dieser Einrichtungen ist, vor allem wegen des vermehrten Auftretens von Hochfrequenzanteilen in Ultraschallsignalen, das auf nichtlineare Ausbreitung zurückzuführen ist. Außerdem wächst die Zahl der medizinischen Ultraschallsysteme, die mit Frequenzen von über 15 MHz arbeiten, insbesondere die der intraoperativen Sonden.

Der Begriff „**Hydrophon**“ kann zwar in einem weiteren Sinn benutzt werden, aber im Rahmen dieser Norm bezeichnet er piezoelektrische Miniatur-**Hydrophone**. Dieser Gerätetyp wird heute in verschiedenen Bereichen des medizinischen Ultraschalls eingesetzt und dient insbesondere der quantitativen Charakterisierung der Feldstruktur medizinisch-diagnostischer Geräte. Was andere Druckaufnehmertypen wie z. B. Aufnehmer in Lichtwellenleitertechnik betrifft, so sind einige Vorschriften dieser Internationalen Norm auch auf diese Aufnehmer anwendbar, andere jedoch nicht. Wenn in Zukunft diese anderen „**Hydrophon**“-typen in der Schallfeldmessung an Bedeutung gewinnen, sind ihre Eigenschaften und ihre Kalibrierung in einer überarbeiteten Fassung dieser Internationalen Norm oder in einer getrennten Internationalen Norm zu regeln.

In Übereinstimmung mit der augenblicklichen Messpraxis werden **Hydrophone** in dieser Internationalen Norm als Amplitudenaufnehmer und nicht als Phasenaufnehmer behandelt. Wenn Phasenmessungen in Zukunft Bedeutung erlangen sollten, ist diese Norm zu überarbeiten, wobei für diese Art der Messung dann strengere Anforderungen nötig sind.

ANMERKUNG 1 Dementsprechend wird **Hydrophonempfindlichkeit** in dieser Norm als reale Größe (die das Amplitudenverhältnis ausdrückt) verstanden.

ANMERKUNG 2 Diese Internationale Norm gilt für den Frequenzbereich von 15 MHz bis 40 MHz. **Hydrophone**eigenschaften und die **Hydrophon**kalibrierung bis 15 MHz sind in den Internationalen Normen IEC 60866 und IEC 61101 geregelt. In der Praxis kann sich der Nutzfrequenzbereich eines **Hydrophons** in beide Frequenzbereiche – unter und über 15 MHz – erstrecken. Das Ziel war daher, die Regelungen dieser Internationalen Norm so zu gestalten, dass sie den Regelungen der oben genannten Normen möglichst ähnlich sind. Unterschiede sind entweder auf unterschiedliche technische Erfordernisse in den entsprechenden Frequenzbereichen oder auf den seit der Veröffentlichung der oben genannten Normen erzielten technischen und wissenschaftlichen Fortschritt zurückzuführen. Zurzeit wird versucht, alle vorhandenen **Hydrophon**normen nach Möglichkeit neu zu strukturieren und zusammenzufassen. Es darf erwartet werden, dass dieses Bemühen zu einheitlichen Normen für den ganzen Bereich praktischer **Hydrophon**anwendungen führt.

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm gilt für

- **Hydrophone** mit piezoelektrischen Aufnahmerelementen zur Messung der durch Ultraschallgeräte erzeugten gepulsten und Dauerschall-Ultraschallfelder;
- **Hydrophone** für Messungen in Wasser und im Frequenzbereich zwischen 15 MHz und 40 MHz;
- **Hydrophone** mit oder ohne integrierten Verstärker;
- **Hydrophone** mit kreisförmigem, piezoelektrisch aktivem Element.

Diese Internationale Norm regelt

- relevante **Hydrophone**eigenschaften;
- Methoden zur Ermittlung der **Richtcharakteristik** und der **Hydrophon**empfindlichkeit auf der Grundlage von relativen oder Vergleichsmessungen

und beschreibt

- absolute **Hydrophon**-Kalibrierverfahren.

Empfehlungen und Verweisungen auf anerkannte Literatur erfolgen für verschiedene relative und absolute Kalibrierverfahren für den von dieser Internationalen Norm behandelten Frequenzbereich.

2 Normative Verweisungen

Diese Europäische Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation (einschließlich Änderungen).

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

IEC 61101:1991, *The absolute calibration of hydrophones using the planar scanning technique in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*.

IEC 61102:1991, *Measurement and characterization of ultrasonic fields using hydrophones in the frequency range 0,5 MHz to 15 MHz*.

IEC 61161:1992, Änderung 1 (1998)¹⁾, *Ultrasonic power measurement in liquids in the frequency range 0,5 MHz to 25 MHz*.

IEC 61828, *Ultrasonics – Focusing transducers – Definitions and measurement methods for the transmitted fields*.²⁾

3 Definitionen

Für die Anwendung dieser Internationalen Norm gelten die folgenden Definitionen:

3.1

akustischer Mittelpunkt

der Punkt auf oder in der Nähe eines Wandlers, von dem die sphärisch divergierenden Schallwellen, die von dem Wandler ausgehen und an entfernten Stellen beobachtet werden können, herzukommen scheinen

[Definition 3.3 in IEC 60866]

3.2

Bündelachse

die **Bündelachse** wird nur in Bezug auf die Ausrichtung benutzt und ist eine Gerade, die zwei Punkte des räumlichen und zeitlichen Spitzenschalldrucks auf zwei halbkugelförmigen Flächen verbindet, deren Mittelpunkte ungefähr in der geometrischen Mitte eines Ultraschallwandlers oder einer Ultraschallwandler-Elementgruppe liegen. Die eine Halbkugel hat einen Krümmungsradius von ungefähr $A_g/\pi\lambda$, wobei A_g die geometrische Fläche des Ultraschallwandlers oder der Ultraschallwandler-Elementgruppe und λ die Wellenlänge des der Nennfrequenz entsprechenden Schalldrucks ist. Die zweite Halbkugel hat einen Krümmungsradius von entweder $2A_g/\pi\lambda$ oder $A_g/3\pi\lambda$, je nachdem, welcher Wert der geeignetere ist. Zu Ausrichtungszwecken kann diese Gerade auf die Oberfläche des Ultraschallwandlers oder der Ultraschallwandler-Elementgruppe projiziert werden

¹⁾ Es gibt eine zusammengefasste Auflage 1.1 (1998), die die IEC 61161 (1992) und deren Änderung 1 (1998) enthält.

²⁾ Erscheint demnächst.

Bei den meisten Anwendungsfällen werden zwei senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls liegende ebene Flächen verwendet. Wenn eine halbkugelförmige Fläche nicht einen einzelnen Spitzenwert enthält, wird eine andere halbkugelförmige Fläche mit einem anderen Krümmungsradius gewählt, auf der es nur ein einziges Maximum gibt

[Definition 3.5 in IEC 61102]

3.3

Richtcharakteristik

Richtcharakteristik eines **Hydrophons**

im Allgemeinen graphische Darstellung der Empfindlichkeit eines **Hydrophons** in Abhängigkeit von der Ausbreitungsrichtung der einfallenden ebenen Schallwelle in einer vorgegebenen Ebene durch den **akustischen Mittelpunkt** und bei einer gegebenen Frequenz

[Definition 3.12 in IEC 60866]

3.4

effektiver Radius

effektiver Radius eines aktiven **Hydrophonelements**

Radius eines Empfangs**hydrophons** in Form einer starren Scheibe, das eine vorausgesagte **Richtcharakteristik** mit einer Winkelöffnung gleich der beobachteten Winkelöffnung hat. Die Winkelöffnung wird bei einem gegebenen Pegel unter dem Höchstwert der **Richtcharakteristik** ermittelt. Bei den vorgegebenen Pegeln von 3 dB und 6 dB werden die Radien mit a_3 bzw. a_6 bezeichnet

[Definitionen 3.4 in IEC 61101 und 3.13 in IEC 61102]

Zeichen: a , a_3 , a_6

Einheit: Meter, m

3.5

elektrische Lastimpedanz

elektrische Eingangsimpedanz (bestehend aus Real- und Imaginärteil), an die das Ausgangskabel der **Hydrophoneinheit** angeschlossen ist oder angeschlossen werden soll

Zeichen: Z_L

Einheit: Ohm, Ω

3.6

Empfindlichkeit bei Last am Kabelende

Hydrophonempfindlichkeit bei Last am Kabelende

Verhältnis des Augenblickswerts der Spannung am Ende eines beliebigen integrierten Kabels oder eines beliebigen Ausgangssteckers eines **Hydrophons** bei Anschluss an eine vorgegebene elektrische Eingangsimpedanz zum Augenblickswert des Schalldrucks im ungestörten freien Schallfeld einer ebenen Welle am Ort des akustischen Mittelpunkts des **Hydrophons**, wenn das **Hydrophon** entfernt worden wäre

[Definitionen 3.5 in IEC 61101 und 3.14 in IEC 61102]

Zeichen: M_L

Einheit: Volt je Pascal, V/Pa

3.7

Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende

Hydrophonempfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende

Verhältnis des Augenblickswerts der Leerlaufspannung am Ende eines beliebigen integrierten Kabels oder eines beliebigen Ausgangssteckers eines **Hydrophons** zum Augenblickswert des Schalldrucks im ungestörten freien Schallfeld einer ebenen Welle am Ort des akustischen Mittelpunkts des **Hydrophons**, wenn das **Hydrophon** entfernt worden wäre

[Definition 3.15 in IEC 61102, geändert]

Zeichen: M_c

Einheit: Volt je Pascal, V/Pa

3.8

Fernfeld

das Schallfeld in einer Entfernung von der Schallquelle, in der die Augenblickswerte des Schalldrucks und der Teilchengeschwindigkeit im Wesentlichen phasengleich sind

[Definition 3.2 in IEC 60866]

ANMERKUNG 1 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 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).

3.9

geometrischer Radius des Hydrophons

geometrischer Radius des aktiven **Hydrophonelements**

Radius, der durch die Abmessungen des aktiven Elements eines **Hydrophons** bestimmt ist

[Definition 3.18 in IEC 61102]

Zeichen: a_g

Einheit: Meter, m

3.10

Hydrophon

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

[Definitionen 3.4 in IEC 60866 und 3.19 in IEC 61102]

3.11

Hydrophonachse

nominale Symmetrieachse des aktiven **Hydrophonelements**

ANMERKUNG Wenn vom Hersteller nicht (ausdrücklich und quantitativ) anders angegeben, ist sie im Sinne dieser Norm durch die scheinbare geometrische Symmetrieachse des **Hydrophons** gegeben.

3.12

integrierter Verstärker

aktives elektronisches Gerät, das fest mit dem **Hydrophon** verbunden ist und seine Ausgangsimpedanz herabsetzt

ANMERKUNG 1 Ein **integrierter Verstärker** erfordert eine Versorgungsspannung (oder Versorgungsspannungen).

ANMERKUNG 2 Der **integrierte Verstärker** kann einen Vorwärtsspannungs-Übertragungsfaktor von weniger als 1 haben, d. h., er braucht nicht unbedingt ein Spannungsverstärker im eigentlichen Sinne zu sein.

3.13

Pulsdauer

das 1,25fache des Intervalls zwischen den Zeitpunkten, an denen das Zeitintegral des quadrierten Augenblickswerts des Schalldrucks 10 % bzw. 90 % seines Endwerts erreicht

[Definition 3.30 in IEC 61102]

3.14

Unsicherheit

mit dem Messergebnis verbundener Parameter, der die Streuung der Werte charakterisiert, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden können

[Siehe 2.2.3 in ISO/IEC: Leitfaden für die Angabe der Messunsicherheit [1]³⁾]

³⁾ Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise in Anhang F.

4 Liste der verwendeten Zeichen

a	effektiver Radius (a_3 , a_6 : mit besonderem Bezug auf eine 3-dB- bzw. 6-dB-Definition)
a_g	geometrischer Radius des Hydrophons
$a_{\max}$	größter effektiver Radius
a_t	Radius eines Ultraschallwandlers
A_g	geometrische Fläche eines Ultraschallwandlers
B/A	Fox-Wallace-Nichtlinearitätsparameter
c	Schallgeschwindigkeit in der Messflüssigkeit (Wasser)
e	Basis natürlicher Logarithmen
f	Frequenz
f_f	Grundanregungsfrequenz eines zur Erzeugung nichtlinearer Verzerrung verwendeten Signals
f_u	Obergrenze des angegebenen Frequenzbandes eines Hydrophons
F	geometrische Brennweite eines fokussierenden Wandlers
k	Kreiswellenzahl
M_c	Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende
M_L	Empfindlichkeit bei Last am Kabelende
n	Ordnungszahl der Oberschwingung
p_0	Druckamplitude
r	Weglänge vom Wandlerrand zu einem Punkt im Schallfeld
R	seitlicher Abstand von der Bündelachse ($R_{\max E}$, $R_{\max H}$: Höchstwerte zur Vermeidung von Randwellen- bzw. Kopfwelleninterferenz)
t_H	Ankunftszeit der nächstgelegenen Kopfwellen
t_{TDS}	verfügbare Zeit für eine Freifeldmessung mittels Time-Delay-Spektrometrie
T	akustischer Übertragungsfaktor
V_t	Radialwellengeschwindigkeit in einer Wandlerplatte
w_f	Bündelbreite des Grundfrequenz-Feldanteils
x	Koordinate entlang der Bündelachse , ausgehend von der Wandleroberfläche (x_1 , x_2 , x_3 und x_4 sind spezielle Entfernungswerte entsprechend bestimmten Kriterien in Zusammenhang mit Randwellen und Kopfwellen)
$x_{\min}$	kleinster Abstand für ein Hydrophon endlicher Größe von einem Wandler
x_{pf}	Entfernung des Druckbrennpunkts von einem fokussierenden Wandler
Δx	Entfernungsdifferenz

Z_h	elektrische Ausgangsimpedanz eines Hydrophons
Z_L	elektrische Lastimpedanz
α	Kleinsignal-Amplitudendämpfungskoeffizient der Messflüssigkeit (Wasser) für ebene Wellen
β	Nichtlinearitätsparameter im Sinne von $\beta = 1+B/(2A)$
γ	Verhältnis von Bündeldurchmesser zu Hydrophondurchmesser
δ	Druckamplitudenkorrektur für endliche Hydrophongröße
ζ	mit einem optischen Interferometer gemessene akustische Verschiebung
θ	Einfallswinkel einer Ultraschallwelle in Relation zur Hydrophonachse (θ_3 , θ_6 : mit besonderem Bezug auf eine 3-dB- bzw. 6-dB-Definition)
λ	Ultraschall-Wellenlänge
λ_1	optische Wellenlänge
ξ	$\pi/2$ mal die Rayleigh-Länge (a_t^2/λ , siehe IEC 61828) eines fokussierenden Wandler
ρ	(Massen-)Dichte der Messflüssigkeit (Wasser)
σ , σ_m	nichtlinearer Verzerrungsparameter
τ	Pulsdauer oder Burstdauer ($\tau_{\max E}$, $\tau_{\max H}$: Höchstwerte zur Vermeidung von Randwellen- bzw. Kopfwelleninterferenz)
ω	Kreisfrequenz

5 Hydrophoneigenschaften

5.1 Allgemeines

Für eine vollständige Charakterisierung der Leistungsfähigkeit eines **Hydrophons** im Frequenzbereich dieser Internationalen Norm werden die folgenden Daten benötigt.

5.2 Grundlegende Daten

Die folgenden Daten sind kurz anzugeben:

- die grundlegenden elektroakustischen Wandlerprinzipien, der betreffende Materialtyp und die Form und geometrischen Abmessungen (Durchmesser, Dicke) des aktiven **Hydrophonelements**;
- die Konfiguration und die Konstruktion des **Hydrophons**;

ANMERKUNG 1 Bei Membran**hydrophonen** ist es z. B. wichtig zu wissen, ob das **Hydrophon** koplanar oder bilaminar ausgeführt ist.

- ob die **Hydrophoneinheit** einen **integrierten Verstärker** enthält;
- die Haupteinfallrichtung für den Ultraschall in Bezug auf das **Hydrophon**.

ANMERKUNG 2 Der letzte Punkt ist wichtig, weil aus der Literatur [2] bekannt ist, dass sich die Empfindlichkeit bei Umkehr der Ultraschall-Einfallrichtung in Bezug auf das **Hydrophon** selbst bei Membran**hydrophonen** ändern kann.

Auch sollte die Frequenz der Grunddickenresonanz des aktiven **Hydrophonelements** angegeben werden.

5.3 Hydrophonklasse

Da **Hydrophone** für sehr unterschiedliche Messarten eingesetzt werden, ist es nicht erforderlich, für jedes Gerät die Erfüllung der höchsten Anforderungen zu verlangen. Daher werden zwei **Hydrophonklassen** – Klasse 1 und Klasse 2 – für genormte Messzwecke im behandelten Frequenzbereich (15 MHz bis 40 MHz) wie folgt festgelegt.

Die Empfindlichkeit der **Hydrophoneinheit** am Kabelende (mit oder ohne **integrierten Verstärker**) in Abhängigkeit von der Frequenz muss über eine angegebene Bandbreite von mindestens einer Oktave im Frequenzbereich von 15 MHz bis 40 MHz mit einer Toleranz von ± 2 dB (Klasse 1) bzw. ± 4 dB (Klasse 2) konstant sein. Außerdem soll sie für jedes Frequenzinkrement von 1 MHz, das in das angegebene Frequenzband fällt, um nicht mehr als $\pm 0,5$ dB (Klasse 1) bzw. ± 1 dB (Klasse 2) variieren.

ANMERKUNG 1 Die Obergrenze des angegebenen Frequenzbandes, auf das sich die **Hydrophonklasse** bezieht, kommt häufig vor und wird in dieser Internationalen Norm als f_u bezeichnet.

ANMERKUNG 2 Die Bandbreitenkriterien für **Hydrophone** der Klasse 1 und der Klasse 2 beziehen sich auf deren Fähigkeit, Schallfelder, in denen eine Reihe von Frequenzanteilen auftreten, genau zu messen. Die vollständige quantitative Charakterisierung von Ultraschallfeldern im Frequenzbereich dieser Norm erfordert typischerweise, jedoch nicht ausschließlich die Verwendung von **Hydrophonen** der Klasse 1. Dagegen sind **Hydrophone** der Klasse 2 geeignet, wenn relative Messungen durchgeführt werden müssen, z. B. bei der Bestimmung der räumlichen Eigenschaften eines Feldes.

ANMERKUNG 3 Ähnliche, jedoch unterschiedlich bezeichnete **Hydrophonklassen**, nämlich Klasse A und Klasse B, sind in IEC 60866 festgelegt worden. Es ist zu beachten, dass die beiden Normen für verschiedene Frequenzbereiche gelten und dass sich die Klassendefinitionen in den beiden Normen daher nicht entgegenstehen. Wenn ein **Hydrophon** mit hinreichend großem Nutzfrequenzbereich gemäß beiden Normen qualifiziert werden soll, sind vier Kombinationen von **Hydrophonklassen** wie folgt möglich: Klasse A + Klasse 1; Klasse A + Klasse 2; Klasse B + Klasse 1; Klasse B + Klasse 2.

5.4 Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit der **Hydrophoneinheit** am Kabelende ist in V/Pa oder in dezimalen Teilen oder als logarithmischer Pegel in dB mit Bezug auf einen angegebenen Empfindlichkeitswert anzugeben.

Wenn ein **integrierter Verstärker** zu dem gegebenen Empfindlichkeitswert beiträgt, ist dies anzugeben.

ANMERKUNG 1 „Am Kabelende“ bezieht sich auf das Ende des Ausgangskabels der **Hydrophoneinheit** mit oder ohne **integrierten Verstärker**.

Es ist anzugeben, ob der gegebene Empfindlichkeitswert als **Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende** oder als **Empfindlichkeit bei Last am Kabelende** verstanden wird. Im letzteren Fall sind die entsprechenden elektrischen Belastungsbedingungen, d. h. die **elektrische Lastimpedanz** anzugeben, für die die angegebene Empfindlichkeit gilt.

Die **Unsicherheit** der angegebenen Empfindlichkeit ist anzugeben.

ANMERKUNG 2 Tabelle A.1 fasst Gesamtmess**unsicherheiten** der am meisten verwendeten Kalibriertechniken zusammen.

Der Frequenzbereich, für den die Empfindlichkeit gegeben ist und für den die **Unsicherheit** gilt, ist anzugeben. Für die Zwecke dieser Norm können die Empfindlichkeits- und **Unsicherheitswerte** getrennt für mehrere Frequenzbereiche angegeben werden.

Die Methoden, nach denen die Empfindlichkeit und ihre **Unsicherheit** bestimmt worden sind, sind zu beschreiben.

5.5 Frequenzgang

Die **Hydrophonempfindlichkeit** als Funktion der Frequenz ist entweder graphisch oder als Liste von Werten über einen Frequenzbereich, der mindestens das in 5.3 angegebene Frequenzband enthält, anzugeben. Wenn sie als Werteliste oder in Form von diskreten Punkten in einer Graphik angegeben wird, sollte der Fre-

quenzabstand zwischen benachbarten Punkten nicht größer als 1 MHz sein, soweit der Frequenzbereich dieser Internationalen Norm betroffen ist.

Der Frequenzgang kann in Form von absoluten Empfindlichkeitswerten oder in einer relativen Darstellung gegeben werden, und zwar relativ mit Bezug auf die absolute **Hydrophon**empfindlichkeit bei einer bestimmten Frequenz. Im Falle der relativen Darstellung sind die Bezugsempfindlichkeit und die Frequenz, für die sie gilt, anzugeben.

Die Angabe des Frequenzgangs sollte sich auf dieselben Bedingungen wie die Empfindlichkeitsangabe gemäß 5.4 beziehen. Wenn er sich auf unterschiedliche Bedingungen bezieht, ist dies eindeutig anzugeben, und es sind Formeln zu nennen, mit denen die verschiedenen Empfindlichkeiten zueinander in Beziehung gesetzt werden können.

Wenn sich die **Unsicherheit** der Empfindlichkeitswerte in der Darstellung des Frequenzgangs von der allgemeinen **Unsicherheits**beurteilung in 5.4 unterscheidet, ist dies eindeutig anzugeben, und die neue oder zusätzliche **Unsicherheit** ist zu nennen. Wenn der Frequenzgang nur graphisch dargestellt wird, muss die zusätzliche **Unsicherheit** aufgrund der Ablesung der Kurve geringer als 10 % der angegebenen Gesamt-**unsicherheit** sein.

Wenn der Frequenzgang als Liste absoluter Empfindlichkeitswerte angegeben wird, kann die Empfindlichkeitsangabe gemäß 5.4 entfallen.

ANMERKUNG 1 Der Frequenzgang und damit die **Hydrophon**klasse können von den elektrischen Belastungsbedingungen abhängen.

ANMERKUNG 2 Wenn das **Hydrophon** bei einer praktischen Anwendung mit nachgeordneten elektronischen Bauteilen wie Verstärker, Oszilloskop usw. verwendet wird, wird der Frequenzgang des gesamten Systems natürlich auch von dem Frequenzgang dieser zusätzlichen Bauteile beeinflusst.

5.6 Richtcharakteristik

ANMERKUNG 1 Den **effektiven Radius** erhält man aus der **Richtcharakteristik** (siehe 5.7). Es ist zwar wünschenswert, über die vollständigen Informationen, d. h. sowohl über die **Richtcharakteristik** als auch über den **effektiven Radius** zu verfügen, aber in der Praxis kann man sich darauf beschränken, nur die Richtcharakteristik gemäß diesem Abschnitt oder den **effektiven Radius** gemäß 5.7 anzugeben.

ANMERKUNG 2 Für die Zwecke dieser Norm wird angenommen, dass das aktive **Hydrophonelement** nominell eine kreisförmige Geometrie aufweist. Wenn in Zukunft **Hydrophone** mit einer anderen Geometrie auf den Markt kommen, muss diese Norm entsprechend geändert werden.

Die **Richtcharakteristik** des **Hydrophons** ist sowohl an der unteren als auch an der oberen Grenze des gemäß 5.3 angegebenen Frequenzbandes wie folgt zu messen und anzugeben.

Die **Richtcharakteristik** ist zu messen, indem das **Hydrophon** um eine senkrecht zur **Hydrophonachse** stehende Achse mindestens von -35° bis $+35^\circ$ (mit der **Hydrophonachse** als Bezugsachse) oder mindestens vom ersten linken Minimum zum ersten rechten Minimum – je nachdem, welcher Winkel der kleinere ist – geschwenkt wird. Dies muss zweimal, und zwar um zwei senkrecht aufeinander stehende Schwenkachsen vorgenommen werden. Wenn ein **Hydrophon** in der senkrecht zu seiner Achse befindlichen Ebene eine spezielle Richtung hat (beim Membran**hydrophon** z. B. die Richtung der elektrischen Leitungen), sollten die Schwenkachsen in dieser Richtung und senkrecht zu ihr verlaufen. Die Richtungen der Schwenkachsen sind auf dem **Hydrophon** oder in der Begleitliteratur anzugeben.

Die beiden **Richtcharakteristiken**, die mit den beiden Messungen an senkrechten Schwenkachsen erzielt werden, sind anzugeben.

Wenn bei einem der für die **Richtcharakteristik** erzielten Ergebnisse der Winkel zwischen der Richtung der größten Empfindlichkeit und der **Hydrophonachse** größer als $1/10$ der Winkeldifferenz zwischen der linken – 6-dB-Richtung und der rechten – 6-dB-Richtung ist, ist dies anzugeben; desgleichen ist der Achsenabweichungswinkel anzugeben.

ANMERKUNG 3 Probleme bei der praktischen Feldmessung treten auf, wenn die Richtung der größten **Hydrophon**empfindlichkeit erheblich von der Frequenz abhängt.

5.7 Effektiver Radius

Aus den einzelnen gemäß 5.6 für die **Richtcharakteristik** erzielten Ergebnissen ist ein Wert für den **effektiven Radius** des aktiven **Hydrophonelements** an der Unter- und Obergrenze des gemäß 5.3 angegebenen Frequenzbandes wie folgt abzuleiten.

Wenn die Winkeldifferenz zwischen der linken – 3-dB-Richtung und der rechten – 3-dB-Rechnung $2\theta_3$ und die Winkeldifferenz zwischen der linken – 6-dB-Richtung und der rechten – 6-dB-Richtung $2\theta_6$ ist, gelten die folgenden Formeln für die **effektiven Radien**:

$$a_3 = 1,62c / (2\pi f \sin \theta_3) \quad (1)$$

und

$$a_6 = 2,22c / (2\pi f \sin \theta_6) \quad (2)$$

Dabei ist:

f die Ultraschallfrequenz der betreffenden Messung;

c die Schallgeschwindigkeit in Wasser bei der betreffenden Temperatur (siehe Tabelle A.2).

Wenn a_3 und a_6 bei der betreffenden **Richtcharakteristik** innerhalb von $\pm 10\%$ (des Höchstwerts) gleich sind, ist ihr arithmetisches Mittel als **effektiver Radius** zu verwenden. Ist dies nicht der Fall, ist der Wert zu verwenden, dessen Winkel θ näher bei 10° liegt.

Wenn die beiden auf diese Weise bei den zwei Messungen mit lotrechten Schwenkachsen erzielten Werte für den **effektiven Radius** innerhalb $\pm 10\%$ (des Höchstwerts) gleich sind, braucht nur ihr arithmetisches Mittel angegeben zu werden; andernfalls sind beide Werte anzugeben.

Wenn der von der Richtung der größten Empfindlichkeit und der **Hydrophonachse** gebildete Winkel bei einem der Ergebnisse für die **Richtcharakteristik** größer als $1/10$ der Winkeldifferenz zwischen der linken – 6-dB-Richtung und der rechten – 6-dB-Richtung ist, ist dies anzugeben; desgleichen ist der Achsenabweichungswinkel anzugeben, wenn dies nicht schon gemäß 5.6 geschehen ist.

5.8 Dynamischer Bereich und Linearität

Der dynamische Bereich des **Hydrophons**, d. h. der Druckamplitudenbereich, in dem die **Hydrophoneinheit** (gegebenenfalls mit einem **integrierten Verstärker**) eingesetzt werden kann, ist anzugeben.

Von diesem Bereich wird angenommen, dass er mindestens die folgenden Bedingungen erfüllt:

- 1) keine mechanischen oder elektrischen Beschädigungen des **Hydrophons** oder gegebenenfalls des **integrierten Verstärkers**;
- 2) keine Ausgangssättigung;
- 3) das Ausgangssignal muss über dem Rauschpegel liegen.

ANMERKUNG 1 „Ausgangssättigung“ bedeutet, dass eine Druckänderung am **Hydrophon**, die nicht gleich null ist, nicht zu einer Änderung der elektrischen Spannung führt.

ANMERKUNG 2 Der Rauschpegel kann von elektromagnetischen Störungen abhängen und kann sich daher in Abhängigkeit von den elektromagnetischen Bedingungen am Messort ändern. Idealerweise kann es möglich sein, einen Rauschpegel anzugeben, der alle anderen Rauschteile außer elektromagnetische Störungen umfasst.

Der Linearitätsbereich der **Hydrophoneinheit** gemäß 5.1.2 in IEC 60866 sollte angegeben werden.

ANMERKUNG 3 Informationen über die **Hydrophonlinearität** sind in Anhang B enthalten.

5.9 Elektrische Ausgangskenngrößen

Für alle quantitativen Werte in diesem Abschnitt gilt, dass sich das **Hydrophon** in Wasser unter Freifeldbedingungen befindet.

5.9.1 Elektrischer Ausgang

Es ist anzugeben, welcher der beiden folgenden Unterabsätze gilt (d. h. 5.9.1.1 oder 5.9.1.2).

5.9.1.1 Angepasste Impedanz

Wenn die Ausgangsimpedanz an die charakteristische Impedanz des Ausgangskabels (die typischerweise klein im Vergleich zu 1 kΩ ist) angepasst ist:

Die **elektrische Lastimpedanz**, an die das Ausgangskabel angeschlossen werden soll, ist anzugeben. In diesem Fall ist es erforderlich, dass alle Empfindlichkeitsangaben gemäß dieser Norm als **Empfindlichkeiten bei Last am Kabelende** mit Bezug auf diese Impedanz verstanden werden.

Grenzen für diese Impedanz sind so anzugeben, dass die tatsächliche Empfindlichkeit innerhalb eines angegebenen größten Fehlers oder innerhalb der unter 5.4 und 5.5 angegebenen **Unsicherheiten** mit der angegebenen Empfindlichkeit übereinstimmt.

ANMERKUNG 1 Das kann praktisch wie folgt geschehen: Es werden eine Unter- und eine Obergrenze für den Lastwiderstand (die den Kennimpedanzwert einschließen) und eine Obergrenze für die Kapazität parallel zum Widerstand angegeben.

ANMERKUNG 2 Dieser Unterabschnitt gilt normalerweise, wenn ein **integrierter Verstärker** vorhanden ist.

ANMERKUNG 3 Wenn der Eingang, an den das **Hydrophon**-Ausgangskabel angeschlossen wird, ein hochohmiger Eingang ist, können die Anforderungen dieses Unterabschnitts gewöhnlich mit einem zusätzlichen Nebenschlusswiderstand erfüllt werden.

5.9.1.2 Unangepasste Impedanz

Wenn die Ausgangsimpedanz nicht an die Kennimpedanz des Ausgangskabels angepasst ist:

Die Ausgangsimpedanz Z_h am Kabelende ist als Funktion der Frequenz anzugeben. Das kann geschehen, indem Real- und Imaginärteil der Impedanz oder die Werte der elektrischen Bauteile (wie Widerstand und Kapazität) einer Ersatzschaltung angegeben werden. Im letzteren Fall muss der Schaltungstyp eindeutig spezifiziert werden (z. B. ob der Widerstand in Reihe oder parallel zur Kapazität geschaltet ist).

Soweit der Frequenzbereich dieser Internationalen Norm betroffen ist, darf die Frequenzdifferenz zwischen benachbarten Frequenzpunkten dieser Angabe nicht größer als 2 MHz sein.

Die Beziehung zwischen der **Empfindlichkeit bei Last am Kabelende** und der **Empfindlichkeit bei Leerlauf am Kabelende** hängt von Z_h und Z_L ab und ist durch

$$M_L = M_c \left\{ \frac{\operatorname{Re}^2 Z_L + \operatorname{Im}^2 Z_L}{[\operatorname{Re} Z_h + \operatorname{Re} Z_L]^2 + [\operatorname{Im} Z_h + \operatorname{Im} Z_L]^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

gegeben, wobei „Re“ und „Im“ der Real- bzw. Imaginärteil der entsprechenden Größe sind.

Diese Formel kann für die Berechnung von Korrekturfaktoren verwendet werden, wenn die tatsächliche **elektrische Lastimpedanz** nicht den in Zusammenhang mit den gegebenen Empfindlichkeitswerten angegebenen Bedingungen entspricht.

Dieser Unterabschnitt gilt normalerweise, wenn kein **integrierter Verstärker** vorgesehen ist.

ANMERKUNG Gleichung (3) gilt für eine Frequenzdarstellung. In praktischen **Hydrophon**anwendungen mit Ultraschallpulsen müsste eine Zeitdarstellung (zeitliche Faltung und Entfaltung) betrachtet werden.

5.9.2 Konfiguration der Ausgangsleitung und Nachschwingresonanz im Kabel

Die grundlegende Konfiguration der Ausgangsleitungen, wie z. B. Differenzausgang (potenzialfrei) oder unsymmetrischer Ausgang, d. h. ein Einzelausgang und Erde, ist zu erklären.

Elektrische Übertragungsleitungen mit einem unangepassten Abschluss können unter bestimmten Bedingungen zu einer Nachschwingresonanz führen. Wenn dies bei der in Frage stehenden **Hydrophoneinheit**, insbesondere bei höheren Frequenzen in Zusammenhang mit einer Verzerrung durch endliche Amplituden, zu erwarten ist (entweder aufgrund des Ausgangskabels oder wegen einer inneren Übertragungsleitung), so sollte dies zusammen mit der zu erwartenden Nachschwingfrequenz angegeben werden.

5.10 Informationen über den integrierten Verstärker, falls vorhanden

Die erforderliche Versorgungsspannung (oder die erforderlichen Versorgungsspannungen) und der Stromverbrauch sind anzugeben.

Die Folgen von Abweichungen der Versorgungsspannung vom/von den Nennwert(en) sind anzugeben.

Alle Begrenzungen der Amplituden- und Frequenzbereiche, die nicht unter 5.3, 5.5 und 5.8 genannt sind, wie z. B. die, die auf Begrenzungen der Anstiegsgeschwindigkeit usw. zurückzuführen sind, sind anzugeben.

5.11 Umgebungs- und andere Aspekte

5.11.1 Temperaturbereich

Die nominelle Wassertemperatur, ihre **Unsicherheit** und der Temperaturbereich, über den die gegebene Empfindlichkeit gilt, sind anzugeben. Wenn möglich, sollte eine Korrektur für Temperaturen, die von den angegebenen Temperaturen abweichen, oder die Empfindlichkeit als Funktion der Temperatur angegeben werden. Wenn eine der anderen relevanten Größen gemäß dieser Norm erhebliche Änderungen über den nutzbaren Temperaturbereich aufweist, ist dies anzugeben, und es ist eine Korrektur zu nennen.

5.11.2 Wasserfestigkeit

Es ist anzugeben, welche Teile der **Hydrophoneinheit** wasserdicht sind und welche nicht. Begrenzungen der Eintauchdauer in Wasser (möglicherweise in Abhängigkeit von der Temperatur) sind gegebenenfalls anzugeben.

5.11.3 Wassereigenschaften und unvereinbare Materialien

Höchstgrenzen der Wasserleitfähigkeit sind gegebenenfalls anzugeben. Die Wasserbedingungen (z. B. Leitfähigkeit, Gasgehalt), auf die sich alle quantitativen Angaben dieses Abschnitts beziehen (einschließlich derer in 5.9), sind anzugeben.

Begrenzungen in Bezug auf unvereinbare Materialien (z. B. Flüssigkeiten, aufgelöste Stoffe) sind anzugeben.

5.11.4 Sonstige Aspekte

Im Falle von Membran**hydrophonen** sollten der Reflexionsfaktor und der Durchlassfaktor (vorzugsweise in Abhängigkeit von der Frequenz) angegeben werden.

Dem Benutzer ist ein ausführliches Handbuch zur Verfügung zu stellen.