

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



**Electroacoustics – Measurement microphones –  
Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard  
microphones by the reciprocity technique**

**Électroacoustique – Microphones de mesure –  
Partie 3: Méthode primaire pour l'étalonnage en champ libre des microphones  
étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité**



**THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED**  
**Copyright © 2016 IEC, Geneva, Switzerland**

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

#### **About the IEC**

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

#### **About IEC publications**

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

#### **IEC Catalogue - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)**

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

#### **IEC publications search - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)**

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

#### **IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)**

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

#### **Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)**

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

#### **IEC Glossary - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)**

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

#### **IEC Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)**

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch).

---

#### **A propos de l'IEC**

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

#### **A propos des publications IEC**

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

#### **Catalogue IEC - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)**

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

#### **Recherche de publications IEC - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)**

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

#### **IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)**

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

#### **Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)**

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

#### **Glossaire IEC - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)**

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

#### **Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)**

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch).

# INTERNATIONAL STANDARD

# NORME INTERNATIONALE



---

**Electroacoustics – Measurement microphones –  
Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard  
microphones by the reciprocity technique**

**Électroacoustique – Microphones de mesure –  
Partie 3: Méthode primaire pour l'étalonnage en champ libre des microphones  
étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

---

ICS 17.140.50; 33.160.50

ISBN 978-2-8322-3478-5

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.  
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references.....	6
3 Terms and definitions .....	6
4 Reference environmental conditions.....	7
5 Principles of free-field calibration by reciprocity.....	7
5.1 General principles .....	7
5.1.1 General .....	7
5.1.2 General principles using three microphones.....	7
5.1.3 General principles using two microphones and an auxiliary sound source .....	8
5.2 Basic expressions .....	8
5.3 Insert voltage technique .....	9
5.4 Free-field receiving characteristics of a microphone .....	9
5.5 Free-field transmitting characteristics of a microphone .....	10
5.6 Reciprocity procedure .....	11
5.7 Final expressions for the free-field sensitivity.....	11
5.7.1 Method using three microphones .....	11
5.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source .....	12
6 Factors influencing the free-field sensitivity .....	12
6.1 General.....	12
6.2 Polarizing voltage.....	12
6.3 Shield configuration .....	12
6.4 Acoustic conditions .....	13
6.5 Position of the acoustic centre of a microphone .....	13
6.6 Dependence on environmental conditions .....	14
6.6.1 General .....	14
6.6.2 Static pressure.....	14
6.6.3 Temperature .....	14
6.6.4 Humidity .....	14
6.6.5 Transformation to reference environmental conditions.....	14
6.7 Considerations concerning measurement space.....	15
7 Calibration uncertainty components.....	15
7.1 General.....	15
7.2 Electrical transfer impedance .....	15
7.3 Deviations from ideal free-field conditions.....	15
7.4 Attenuation of sound in air.....	16
7.5 Polarizing voltage.....	16
7.6 Physical properties of air.....	16
7.7 Imperfection of theory .....	16
7.8 Uncertainty on free-field sensitivity level .....	17
Annex A (informative) Values for the position of the acoustic centre.....	19
Annex B (normative) Values of the air attenuation coefficient.....	20
B.1 General.....	20
B.2 Calculation procedure .....	20

Annex C (informative) Environmental influence on the sensitivity of microphones .....	23
C.1 General.....	23
C.2 Dependence on static pressure .....	23
C.3 Dependence on temperature .....	23
Annex D (informative) Application of time selective techniques for removal of unwanted reflections and acoustic interference between microphones .....	25
D.1 General.....	25
D.2 Practical considerations .....	25
D.2.1 Signal-to-noise ratio .....	25
D.2.2 Reflections from walls and measurement rig .....	25
D.3 Frequency limitations .....	26
D.3.1 General .....	26
D.3.2 Measurements based on frequency sweeps .....	26
D.3.3 Measurements based on pure tones .....	26
D.4 Generating missing portions of the frequency response previous to transforming to the time-domain. ....	27
D.4.1 General .....	27
D.4.2 Missing frequencies below the minimum measurement frequency.....	27
D.4.3 Missing frequencies above the maximum measured frequency .....	27
D.4.4 Filtering the extended frequency response.....	28
Bibliography .....	29
Figure 1 – Equivalent circuit for a receiving microphone under free-field conditions.....	9
Figure 2 – Equivalent circuit for a transmitting microphone under free-field conditions.....	10
Figure A.1 – Example of the estimated values of the acoustic centres of LS1P and LS2aP microphones given in the bibliographical references for Annex A .....	19
Table 1 – Uncertainty components .....	17
Table B.1 – Values for attenuation of sound pressure in air (in dB/m).....	22

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTROACOUSTICS – MEASUREMENT MICROPHONES –****Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique**

## FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61094-3 has been prepared by IEC technical committee 29: Electroacoustics.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1995. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) a new informative annex describing the use of time-selective techniques to minimize the influence of acoustic reflections from the measurement setup;
- b) provision for the calibration of microphones in driven shield configuration.

The text of this standard is based on the following documents:

CDV	Report on voting
29/873/CDV	29/892A/RVC

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts in the IEC 61094 series, published under the general title *Electroacoustics – Measurement microphones*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

## ELECTROACOUSTICS – MEASUREMENT MICROPHONES –

### Part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique

#### 1 Scope

This part of IEC 61094

- specifies a primary method of determining the complex free-field sensitivity of laboratory standard microphones so as to establish a reproducible and accurate basis for the measurement of sound pressure under free-field conditions,
- is applicable to laboratory standard microphones meeting the requirements of IEC 61094-1,
- is intended for use by laboratories with highly experienced staff and specialized equipment.

NOTE The calibration principle described in this part of IEC 61094 is also applicable to working standard microphones, preferably used without their protection grid.

#### 2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 61094-1:2000, *Measurement microphones – Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*

IEC 61094-2:2009, *Electroacoustics – Measurement microphones – Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*

IEC TS 61094-7:2006, *Measurement microphones – Part 7: Values for the difference between free-field and pressure sensitivity levels of laboratory standard microphones*

ISO 9613-1, *Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

#### 3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 61094-1, IEC 61094-2, ISO/IEC Guide 98-3 and the following apply.

##### 3.1 phase

<free-field sensitivity of a microphone> phase angle between the open-circuit voltage and the sound pressure that would exist at the position of the acoustic centre of the microphone in the absence of the microphone, for a sinusoidal plane progressive wave of given frequency and direction of sound incidence, and for given environmental conditions

Note 1 to entry: Phase is expressed in degrees (°) or radians (rad).

### 3.2

#### **acoustic centre**

<microphone> point from which approximately spherical wavefronts from a sound-emitting transducer producing a sinusoidal signal at a given frequency appear to diverge with respect to a small region around an observation point at a specified direction and distance from the sound source

Note 1 to entry: The acoustic centre of a reciprocal transducer when used as a receiver is coincident with the acoustic centre when used as a transmitter.

Note 2 to entry: This definition only applies to regions of the sound field where spherical or approximately spherical wavefronts are observed.

### 3.3

#### **equivalent point-transducer**

notional transducer occupying a single point that, when located at the position of its acoustic centre, simulates the transmitting or receiving characteristics of a microphone, for a sinusoidal signal of given frequency, and for a given observation direction and distance

### 3.4

#### **principal axis**

<microphone> line through the centre of and perpendicular to the diaphragm of the microphone

### 3.5

#### **free-field conditions**

airborne sound-field environment where sound waves can propagate freely without disturbances of any kind

## 4 Reference environmental conditions

The reference environmental conditions are:

- temperature 23,0 °C
- static pressure 101,325 kPa
- relative humidity 50 %

## 5 Principles of free-field calibration by reciprocity

### 5.1 General principles

#### 5.1.1 General

A reciprocity calibration of microphones may be carried out by means of three microphones, two of which shall be reciprocal, or by means of an auxiliary sound source and two microphones, one of which shall be reciprocal.

NOTE 1 If one of the microphones is not reciprocal it can only be used as a sound receiver.

NOTE 2 Laboratory standard microphones are reciprocal when used within their linear operating range.

#### 5.1.2 General principles using three microphones

Let two of the microphones be coupled acoustically under free-field conditions. Using one of them as a sound source and the other as a sound receiver, the electrical transfer impedance is measured. When the acoustic transfer impedance of the system is known, the product of the free-field sensitivities of the two coupled microphones can be determined. Using pair-wise combinations of three microphones, three such mutually independent sensitivity products are

available, from which an expression for the free-field sensitivity of each of the three microphones can be derived.

### 5.1.3 General principles using two microphones and an auxiliary sound source

First, let the two microphones be coupled acoustically under free-field conditions, and the product of the free-field sensitivities of the two microphones be determined as described in 5.1.2. Next, let the two microphones be sequentially presented to the same sound pressure, set up by the auxiliary sound source under identical free-field conditions. The ratio of the two output voltages will then equal the ratio of the free-field sensitivities of the two microphones. Thus, from the product and the ratio of the free-field sensitivities of the two microphones, an expression for the free-field sensitivity of each of the two microphones can be derived.

NOTE In order to obtain the ratio of free-field sensitivities, a direct comparison method can be used, and the auxiliary sound source can be another type of transducer or a third microphone having mechanical or acoustical characteristics which differ from those of the microphones being calibrated.

## 5.2 Basic expressions

Laboratory standard microphones are considered reciprocal and thus the two-port formulae of the microphones can be written as:

$$\begin{aligned} \underline{z}_{11} \underline{i} + \underline{z}_{12} \underline{q} &= \underline{U} \\ \underline{z}_{21} \underline{i} + \underline{z}_{22} \underline{q} &= \underline{p} \end{aligned} \quad (1)$$

where

$\underline{p}$	is the sound pressure, at the acoustical terminals of the microphone, in pascals (Pa);
$\underline{U}$	is the signal voltage at the electrical terminals of the microphone, in volts (V);
$\underline{q}$	is the volume velocity through the acoustical terminals (diaphragm) of the microphone, in cubic metres per second (m <sup>3</sup> /s);
$\underline{i}$	is the current through the electrical terminals of the microphone, in amperes (A);
$\underline{z}_{11} = \underline{Z}_e$	is the electrical impedance of the microphone when the diaphragm is blocked, in ohms ( $\Omega$ );
$\underline{z}_{22} = \underline{Z}_a$	is the acoustic impedance of the microphone when the electrical terminals are unloaded, in pascal-seconds per cubic metre (Pa·s·m <sup>-3</sup> ),
$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{M}_p \underline{Z}_a$	is equal to the reverse and forward transfer impedances in volt-seconds per cubic metre (V·s·m <sup>-3</sup> ), $\underline{M}_p$ being the pressure sensitivity of the microphone in volts per pascal (V·Pa <sup>-1</sup> ).

NOTE Underlined symbols represent complex quantities.

Formula (1) may then be rewritten as:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{U} \\ \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{p} \end{aligned} \quad (2)$$

which constitute the formulae of reciprocity for the microphone.

When the sound pressure  $\underline{p}$  is not uniform over the surface of the diaphragm, as will be the case at high frequencies when the microphone is located in a plane progressive wave, the location of the acoustic terminals is given through the equivalent point-transducer simulating

the microphone. In this case, Formula (1) will also be valid for the real microphone through a special interpretation of  $\underline{p}$ , see 5.4 and 5.5.

### 5.3 Insert voltage technique

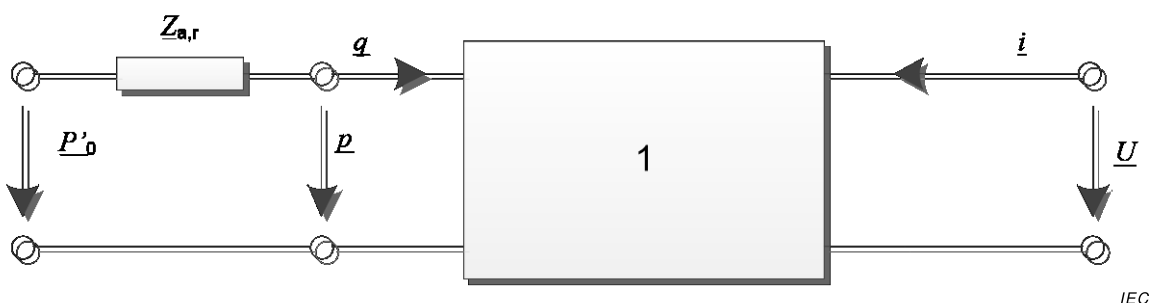
The insert voltage technique is used to determine the open-circuit voltage of a microphone when it is electrically loaded.

Let a microphone having a certain open-circuit voltage and internal electrical impedance be connected to an external electrical load impedance. To measure the open-circuit voltage, an impedance, small compared to the load impedance, is connected in series with the microphone and a calibrating voltage applied across it.

Let a sound pressure and a calibrating voltage of the same frequency be applied alternately. When the calibrating voltage is adjusted until it gives the same voltage drop across the load impedance as results from the sound pressure on the microphone, the open-circuit voltage will be equal in magnitude to the calibrating voltage.

### 5.4 Free-field receiving characteristics of a microphone

Let a microphone be placed in a progressive plane wave of sound pressure  $p_0$ . The equivalent circuit of the microphone is given in Figure 1, where  $\underline{p}'_0$  is the sound pressure when the diaphragm is blocked and  $\underline{p}$  the actual sound pressure at the acoustic terminals of the microphone.  $\underline{Z}_{a,r}$  is the acoustic radiation impedance of the microphone.



#### Key

1 microphone

**Figure 1 – Equivalent circuit for a receiving microphone under free-field conditions**

Let  $\underline{p}'_0$  be related to  $\underline{p}_0$  through:

$$\frac{\underline{p}'_0}{\underline{p}_0} = \underline{S}(f, \theta)$$

where  $\underline{S}(f, \theta)$  is the scattering factor and depends on the geometrical configuration of the microphone. It is a function of frequency  $f$  and angle of incidence  $\theta$  of the sound wave impinging on the diaphragm of the microphone.

As  $\underline{p} = \underline{p}'_0 - \underline{Z}_{a,r} \underline{q}$ , the two-port Formulae (2) can be written as:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} \\ \underline{p}'_0 &= \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}) \underline{q} \end{aligned} \quad (3)$$

and thus, from the basic definition, the free-field sensitivity is given by:

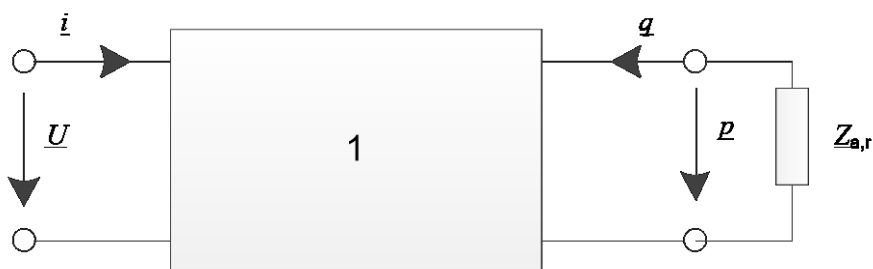
$$\underline{M}_f = \left( \frac{\underline{U}}{\underline{p}'_0} \right)_{i=0} = \underline{M}_p \frac{\underline{Z}_a}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}} \underline{S}(f, \theta) \quad (4)$$

Formula (4) shows that the difference between the pressure sensitivity and the free-field sensitivity is determined not only by the geometry of the microphone through the scattering factor  $\underline{S}(f, \theta)$  but also by the relation between the acoustic impedance of the microphone and the radiation impedance.

NOTE The effect of the microphone venting mechanism is not accounted for in the model presented and will also influence the difference between the pressure sensitivity and free-field sensitivity at low frequencies (see 6.1).

### 5.5 Free-field transmitting characteristics of a microphone

Let a microphone be used as a transmitter under free-field conditions. The equivalent circuit of the microphone is given in Figure 2.



IEC

#### Key

1 microphone

**Figure 2 – Equivalent circuit for a transmitting microphone under free-field conditions**

As  $\underline{p} = -\underline{Z}_{a,r} \underline{q}$ , the two-port formulae of transmitting microphone can be written as:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} \\ \underline{0} &= \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}) \underline{q} \end{aligned} \quad (5)$$

so that:

$$-\underline{q} = \frac{\underline{M}_p \underline{Z}_a}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}} \underline{i} = \frac{\underline{M}_f}{\underline{S}(f, \theta)} \underline{i}$$

From the general principle of reciprocity, it can be deduced that at a remote point, the equivalent point-transducer will act as a simple source of strength  $-\underline{q} \underline{S}(f, \theta) = \underline{M}_f \underline{i}$  and the sound pressure  $\underline{p}'_0$  at the distance  $d$  between this point and the equivalent point-transducer will then be:

$$\underline{p}_0 = j \frac{\rho f}{2d} \underline{M}_{f,1} \underline{i}_1 e^{-\gamma d} e^{j\omega t} = j \frac{\rho f}{2d} \underline{M}_{f,1} \underline{i}_1 e^{j(\omega t - kd)} e^{-\alpha d} \quad (6)$$

where

$\gamma = \alpha + jk$  is the complex propagation coefficient,  $\alpha$  is the air attenuation coefficient,  $k$  is the wave number and  $\rho$  is the density of the gas.

NOTE Derivation of Formula (6) given above is based on a lumped parameter representation of the microphone (see Formula (1)). A more rigorous derivation can be obtained by using an integral form of representation of the formulae of the microphone.

## 5.6 Reciprocity procedure

Let two microphones denoted as microphone 1 and microphone 2 with free-field sensitivities  $\underline{M}_{f,1}$  and  $\underline{M}_{f,2}$ , respectively, be situated in a free field facing each other and with coincident principal axes. A current  $\underline{i}_1$  through the electrical terminals of microphone 1 will produce a sound pressure  $\underline{p}_0$  given by Formula (6) at a distance  $d$  from its acoustic centre, under free-field conditions. When introducing microphone 2 into the sound field, neglecting losses in the medium and assuming no interaction takes place between the two microphones, the open-circuit voltage of microphone 2 will be:

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{f,2} \underline{p}_0 = j \frac{\rho f}{2d_{12}} \underline{M}_{f,1} \underline{M}_{f,2} \underline{i}_1 e^{j(\omega t - kd_{12})}$$

$d_{12}$  being the distance between the acoustic centres of microphone 1 and microphone 2.

At high frequencies the molecular relaxation effects and viscous losses in air cannot be neglected and thus, the product of the free-field sensitivities is given by:

$$\underline{M}_{f,1} \underline{M}_{f,2} = -j \frac{2d_{12}}{\rho f} \frac{\underline{U}_2}{\underline{i}_1} e^{jkd_{12}} e^{\alpha d_{m12}}, \quad (7)$$

where  $d_{m12}$  is the physical distance between the diaphragms of microphone 1 and microphone 2, being the actual distance the sound wave has propagated.

## 5.7 Final expressions for the free-field sensitivity

### 5.7.1 Method using three microphones

Implementing the principles in 5.1.2, let the electrical transfer impedance  $\underline{U}_2 / \underline{i}_1$  be denoted by  $\underline{Z}_{e,12}$  with similar expressions for microphone pairs involving the third microphone, microphone 3. The final expression for the complex free-field sensitivity of microphone 1 is then:

$$\underline{M}_{f,1} = \left( \frac{2}{\rho f} \frac{d_{12} d_{31}}{d_{23}} \frac{\underline{Z}_{e,12} \underline{Z}_{e,31}}{\underline{Z}_{e,23}} e^{jk(d_{12} + d_{31} - d_{23})} e^{\alpha(d_{m12} + d_{m31} - d_{m23})} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Similar expressions apply for microphone 2 and microphone 3.

The modulus and phase of the free-field sensitivity can be derived from Formula (8), whereupon the phase should be referred to the full four-quadrant phase range, i.e. 0 to  $2\pi$  rad or 0 to 360°.

### 5.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source

If only two microphones and an auxiliary sound source are used, then implementing the principles in 5.1.3, the final expression for the modulus of the free-field sensitivity is:

$$\underline{M}_{f,1} = \left( r_{12} \frac{2d_{12}}{\rho f} Z_{e,12} e^{jkd_{12}} e^{\alpha d_{m12}} \right)^{1/2} \quad (9)$$

where the ratio of the free-field sensitivities of the two microphones,  $r_{12}$ , is measured by comparison against the auxiliary source, see 5.1.3.

## 6 Factors influencing the free-field sensitivity

### 6.1 General

The free-field sensitivity of a laboratory standard microphone depends on polarizing voltage, as it has an electrostatic transductions mechanism, and the environmental conditions.

The basic mode of operation of a polarized electrostatic microphone assumes that the electrical charge on the microphone is kept constant at all frequencies. This condition cannot be maintained at very low frequencies and the product of the microphone capacitance and the polarizing resistance determines the time constant for the flow of charge to and from the microphone. While the open-circuit sensitivity of the microphone, as obtained using the insert voltage technique, will be determined correctly, the absolute output from an associated preamplifier to the microphone will decrease at low frequencies in accordance with this time constant.

The construction principles of laboratory standard microphones imply that the static pressure behind and in front of the diaphragm shall remain the same. To comply with this a pressure equalizing tube is used to connect the back cavity of the microphone to the external medium. The effect of this tube is that the free-field sensitivity will approach zero at very low frequencies (below a few hertz). The technique described in this standard is not suitable for determining the free-field sensitivity in this frequency range.

Furthermore, the definition of the free-field sensitivity implies that certain requirements be fulfilled by the measurements. It is essential during a calibration that these conditions are controlled sufficiently well so that the resulting uncertainty components are small.

### 6.2 Polarizing voltage

The sensitivity of a laboratory standard microphone is approximately proportional to the polarizing voltage and thus the polarizing voltage actually used during the calibration shall be reported.

To comply with IEC 61094-1, a polarizing voltage of 200,0 V is recommended.

### 6.3 Shield configuration

The open-circuit voltage, and therefore the free-field sensitivity, depends on the shield configuration. Consequently, IEC 61094-1 specifies a reference mechanical configuration for the shield for use in determining the open-circuit voltage. While the reference mechanical configuration is essential, the shield can either be grounded (grounded-shield configuration), or the output voltage from the microphone can be applied to the shield (driven-shield configuration). It shall be stated whether the driven-shield or grounded-shield configuration was used in the measurements.

The same shield configuration shall apply to both transmitter and receiver microphones during the calibration.

If any non-standard configuration is used, the results of a calibration shall be referred to the reference mechanical configuration.

If the manufacturer specifies a maximum mechanical force to be applied to the central electrical contact of the microphone, this limit shall not be exceeded.

NOTE 1 When the shield is driven, the loading impedance as seen from the microphone is maximized, and it can be described more accurately than in the case of using the grounded shield configuration. In the ideal case, in which the microphone is a perfectly linear and passive device and the shield is either grounded, or driven from a zero source impedance, there is no difference between the open-circuit sensitivity with grounded or driven shield.

NOTE 2 In the driven-shield configuration, applying the output voltage from the microphone to the shield means that any difference between the signal applied on the shield and on the centre-pin of the microphone is negligible.

NOTE 3 If a microphone is connected to a preamplifier by means of an adapter there is the possibility that the open-circuit voltage of the microphone is not determined properly by the insert voltage technique at high frequencies. The deviations depend on the load impedance as seen from the microphone.

#### 6.4 Acoustic conditions

The free-field sensitivity of a microphone depends on the geometrical configuration of the housing containing the preamplifier. For this reason, the microphone and the shield configuration shall be attached to a cylinder whose diameter is equal to the nominal diameter of the microphone, see Table 1 and Table 2 in IEC 61094-1:2000. The length of the cylinder shall be long compared to the diameter of the microphone. A minimum length of twenty times the diameter of the microphone with a gradually tapered transition to the supporting structure is recommended. This arrangement shall also apply to the transmitter microphone.

The definition of the free-field sensitivity of a microphone refers to the sound pressure in an undisturbed plane progressive wave. In the far field of a sound source located under free-field conditions, spherical waves are encountered which, at a sufficient distance from the source, are approximately plane waves in a limited region. Thus, the distance between the receiver microphone and the transmitter microphone shall be great enough to ensure approximately plane waves in a suitable region around the receiver microphone (see 7.3). Conversely, the influence of reflections from the interior surfaces of an anechoic chamber usually increases as the distance between the two microphones is increased. Also the scattering factor  $\underline{S}(f, \theta)$  depends on the character of the sound field and can only be unambiguously defined for a true plane progressive wave. Therefore, the metrological conditions should be carefully chosen and it may be preferable to carry out calibrations at more than one distance to assess the calibration uncertainty attributable to dependence on these conditions.

#### 6.5 Position of the acoustic centre of a microphone

The position of the acoustic centre of a microphone can be determined from measurements of the sound pressure produced by the microphone when used as a sound source in a free field, as a function of distance  $r$  from an arbitrarily chosen reference point of the microphone. In a limited region of the far field, the sound pressure, corrected for the effect of sound attenuation, will follow the  $1/r$ -law,  $r$  being referred now to the acoustic centre of the microphone. Thus, when plotting the inverse value of the measured sound pressure as a function of the distance from an arbitrarily chosen reference point of the microphone (most conveniently the centre of the diaphragm), a straight line can be fitted (e.g. by the methods of least squares) through the plotted values. The intersection of this straight line and the abscissa axis determines the position of the acoustic centre relative to the reference point.

The acoustic centres used to determine  $d_{12}$  (see 5.7) shall relate to the orientation and separation used during the free-field calibrations.

Annex A contains information on typical values for the position of the acoustic centre for laboratory standard microphones.

NOTE Specific applications may require defining the acoustic centre of the microphone at a fixed position, for instance, at the centre of the microphone diaphragm. Whereas this would result in the modulus of the sensitivity having a dependence on the distance between microphone and source, it may provide a useful reference for the phase response. While using this fixed acoustic centre in the calculations is possible, an alternative is to determine the sensitivity using the acoustic centre based on the inverse-distance law and later apply a correction to the phase response to the preferred position of the acoustic centre.

## 6.6 Dependence on environmental conditions

### 6.6.1 General

The general dependence of the pressure sensitivity on environmental conditions is given in 6.5 of IEC 61094-2:2009. In addition to this, the free-field sensitivity further depends on environmental conditions through the relation given in Formula (4). In this formula, the radiation impedance is a function of the air density and speed of sound. Similarly the scattering factor  $\underline{S}(f,\theta)$  depends on the wavelength and thus on the speed of sound in air.

### 6.6.2 Static pressure

In addition to the dependence described in IEC 61094-2:2009 (6.5 and Annex D), a further dependence is caused by the relationship between the acoustic impedance of the microphone and its radiation impedance due to the change in the density of air with static pressure. The major influence of the mass term of the radiation impedance is to lower the resonance frequency of the microphone slightly.

### 6.6.3 Temperature

In addition to the dependence described in IEC 61094-2:2009 (6.5 and Annex D), a further dependence is caused by the relationship between the acoustic impedance of the microphone and its radiation impedance due to the change in the density and the speed of sound in air with temperature. In addition, a dependence is caused by the scattering factor  $\underline{S}(f,\theta)$  according to Formula (4) due to the change in the speed of sound in air with temperature. IEC TS 61094-7:2006, Clause 6 describes the temperature dependence of the difference between the free-field sensitivity and the pressure sensitivity that shall be considered in addition to the temperature dependence of the pressure sensitivity itself.

NOTE If a microphone is exposed to excessive temperature variations, a permanent change in sensitivity can result.

### 6.6.4 Humidity

According to Formula (4) a slight effect may be found on the free-field sensitivity in addition to influence on the pressure sensitivity, caused by the influence of humidity on the density and speed of sound in air.

NOTE Certain conditions can influence the stability of polarizing voltage and backplate charge and therefore influence the sensitivity. For example the surface resistance of the insulation material between the backplate and the housing of the microphone can deteriorate under excessively humid conditions, particularly if the material is contaminated. The surface resistance has a noticeable effect on the sensitivity of the microphone at low frequencies, especially on the phase response.

### 6.6.5 Transformation to reference environmental conditions

When reporting the results of a calibration, the free-field sensitivity should be referred to the reference environmental conditions if reliable correction data are available. For moderate deviations from reference environmental conditions, the corrections used for the pressure sensitivity may be applied with appropriately increased uncertainty.

The actual conditions during the calibration should be reported.

NOTE During a calibration, the temperature of the microphone can be different from the ambient air temperature.

## 6.7 Considerations concerning measurement space

The test space shall be as free as possible of any effects that cause instabilities in the sound field, for example between measurements of microphone combinations. These include changing environment conditions, air flows, thermal gradients and electromagnetic disturbance.

It shall have a level of background noise and vibration that enables the measurements to meet the signal-to-noise requirements of the measurement system used. In practice, steps should be taken to reduce the background noise as much as possible.

## 7 Calibration uncertainty components

### 7.1 General

In addition to the factors mentioned in Clause 6, which affect the free-field sensitivity, further uncertainty components are introduced by the method, the equipment and the degree of care under which the calibration is carried out. Factors which affect the calibration in a known way shall be measured or calculated with as high accuracy as practicable in order to minimize their influence on the resulting uncertainty.

### 7.2 Electrical transfer impedance

Various methods are used for measuring the electrical transfer impedance with the necessary accuracy, and no preference is given.

The current through the transmitter is usually determined by measuring the voltage across a calibrated impedance in series with the transmitter microphone. To ensure a correct determination of the current, the grounded or driven shield configuration shall be attached to the transmitter microphone. The calibration of the series impedance shall include any cable capacitance and other load impedance present when measuring the voltage across the impedance. This allows the electrical transfer impedance to be determined from a voltage ratio measurement and the calibrated value of series impedance.

The voltage used to excite the transmitter microphone shall be such that the uncertainty arising from harmonics, either from this source or generated by the microphone, is small compared to the random uncertainty.

Noise or other interference such as cross-talk, whether of acoustical or other origin, shall not unduly affect the determination of the free-field sensitivity.

The presence of electrical cross-talk results in apparent deviations from the  $1/r$ -law having a periodicity of one wavelength.

NOTE 1 Frequency selective techniques can be used to improve the signal-to-noise ratio.

NOTE 2 Time selective techniques can be used to minimize the influence of cross-talk and reflections from the environment and the mechanical supports in the calibration set-up. See Annex D.

NOTE 3 Cross-talk can be measured with the microphones positioned as during a calibration, but with the receiver microphone substituted by a dummy microphone having the same capacitance and external geometry as the receiver microphone, and then determining the resulting difference in the electric transfer impedance. Alternatively, cross-talk can be determined by setting the polarizing voltage to zero during a calibration. In both methods, frequency selective techniques are advantageous.

### 7.3 Deviations from ideal free-field conditions

During a calibration, certain acoustic requirements shall be fulfilled (see 6.4). The calibration shall be carried out in a free field. This condition is most practically obtained in an anechoic room where wind is absent and airborne noise is minimal. Due to the non-ideal performance of the absorption material lining the walls and the finite size of the room, some frequency

dependent reflections from the walls will occur and result in deviations from the  $1/r$ -law for the modulus of sound pressure. The magnitude of these deviations will depend on the distance and direction from the sound source. At a given frequency, the deviations as a function of distance will show a periodicity between a half and one wavelength, corresponding to a reflected wave that is parallel or perpendicular to the direct wave. Normally, the smallest deviations are obtained in a region around the centre of the room and where the principle axis is neither parallel nor perpendicular to any walls of the room. However, the presence of braces, grillwork, cables, supports of various kinds, lighting, ventilation, etc., may give rise to disturbances in the sound field.

The influence of these disturbing reflections can be reduced to acceptable levels only by exercising the utmost care when establishing the calibration system and procedure.

Annex D gives examples of time selective techniques that may also be used to reduce the influence of deviations from ideal free-field conditions.

Further, in order to ensure an approximately plane wave in a suitable region around the receiving microphone, it is recommended that the distance between the two microphones during the calibration should be greater than ten times the nominal diameter of the microphones.

#### **7.4 Attenuation of sound in air**

Under practical conditions, sound waves propagating in a free field will be attenuated due to molecular relaxation effects and to thermal-viscous losses.

This attenuation depends on the frequency of the sound, the water vapour content and the temperature of the air. It is determined by the real part  $\alpha$ , the air attenuation coefficient, of the complex propagation coefficient  $\gamma$  in Formula (6).

Values of the air attenuation coefficient expressed in nepers per metre shall be calculated from the formulae given in Annex B.

#### **7.5 Polarizing voltage**

In order to determine the polarizing voltage, provision can be made for measuring this voltage directly at the terminals of the microphone. This is important when the polarizing voltage is obtained from a high-impedance source, due to the finite insulation resistance of the microphone. Alternatively, the insulation resistance of the microphone can be measured and verified to be sufficiently high that a measurement of the polarizing voltage supply with the microphone removed, or a measurement at a low impedance port of the polarizing voltage supply, are valid.

#### **7.6 Physical properties of air**

Certain quantities describing the physical properties of air are required for calculating the sensitivity of a microphone or its dependence on environmental conditions. These quantities depend on environmental conditions such as static pressure, temperature and humidity. Values of the quantities and their dependencies on environmental conditions are described in Annex B and in IEC 61094-2:2009, Annex F.

#### **7.7 Imperfection of theory**

The practical implementation of the reciprocity theorem and the derivation of the acoustic transfer impedance are based on some idealized assumptions about the microphones and the movement of the microphone diaphragm. The following are examples where these assumptions may not be fully valid.

- Small scale imperfections in the microphones may lead to different movement patterns of the diaphragm between individual samples of a given microphone model, resulting in variations in the position of the acoustic centre, in particular at high frequencies.
- Microphones may not be reciprocal. The effect of this can be minimized by combining only microphones of the same model.

### 7.8 Uncertainty on free-field sensitivity level

The uncertainty on the free-field sensitivity level should be determined in accordance with ISO/IEC Guide 98-3. When reporting the results of a calibration, the uncertainty, as a function of frequency, shall be stated as the expanded uncertainty of measurement using a coverage factor  $k$  corresponding to a 95 % confidence probability.

Due to the complexity of the final expression for the free-field sensitivity in Formula (8), the uncertainty analysis of the acoustic transfer impedance is usually performed by repeating a calculation while the various components are changed one at a time by their associated uncertainty. The difference from the result derived by the unchanged components is then used to determine the standard uncertainty related to the various components.

Table 1 lists a number of components affecting the uncertainty of a calibration. Not all of the components may be relevant in a given calibration setup because various methods are used for measuring the electrical transfer impedance, for minimizing the influence of correlated reflections from the environment and for determining the acoustic centres of the microphones.

**Table 1 – Uncertainty components**

Measured quantity	Relevant subclause no.
<b>Electrical transfer impedance</b>	
Series impedance	7.2
Voltage ratio	7.2
Cross-talk	7.2
Inherent and ambient noise	7.2
Distortion	7.2
Reflections from surroundings	7.2; 7.3
Frequency	7.2
Receiver shield	6.3
Transmitter shield	6.3; 7.2
<b>Acoustic transfer impedance</b>	
Distance	6.4; 6.5
Static pressure	6.6.2; 7.6
Temperature	6.6.3; 7.6
Relative humidity	6.6.4; 7.6
Standing waves between microphones	7.3
Air attenuation	7.4; Annex B
<b>Microphone parameters</b>	
Acoustic centres	6.5
Polarizing voltage	6.2; 7.5
<b>Imperfection of theory</b>	
Deviation from plane-waves	6.4; 7.3
<b>Processing of results</b>	
Mathematical manipulations	

<b>Measured quantity</b>	<b>Relevant subclause no.</b>
Rounding error	
Repeatability of measurements	
Static pressure corrections	6.6; Annex C
Temperature corrections	6.6; Annex C

The uncertainty components listed in Table 1 are generally a function of frequency and shall be derived as a standard uncertainty. The uncertainty components should be expressed in a linear form but a logarithmic form is also acceptable as the values are typically very small and the derived final expanded uncertainty of measurement is then essentially the same.

## Annex A (informative)

### Values for the position of the acoustic centre

As defined, the acoustic centre depends on orientation, on frequency and on the distance of the observation point from the microphone. At sufficiently remote observation points, the effect of the acoustic centre position on the calibration uncertainty diminishes. At such distances, the centre of the diaphragm may be taken as the acoustic centre. For distances in the range 150 mm to 500 mm, normally used when carrying out reciprocity calibrations, the values given in the bibliography and shown in Figure A.1 may be applied. The values for the position of the acoustic centre refers to the principal axis and are given relative to the surface of the diaphragm as a function of frequency for microphones type LS1P and LS2aP. A positive sign indicates that the acoustic centre is in front of the diaphragm. The uncertainty of the values in Figure A.1 is estimated to be less than 2 mm below the resonance frequency of the microphones. At present such data are not available for other types of microphones.

NOTE In general, the acoustic centre will be different for individual microphones of the same type, particularly at high frequencies around and above the resonance frequency of the microphone. In practice, use of an average or typical value of the acoustic centre may simplify the calculation of the free-field sensitivity. In this case it is necessary to add an additional uncertainty component associated with the variability of the acoustic centre to the uncertainty budget.

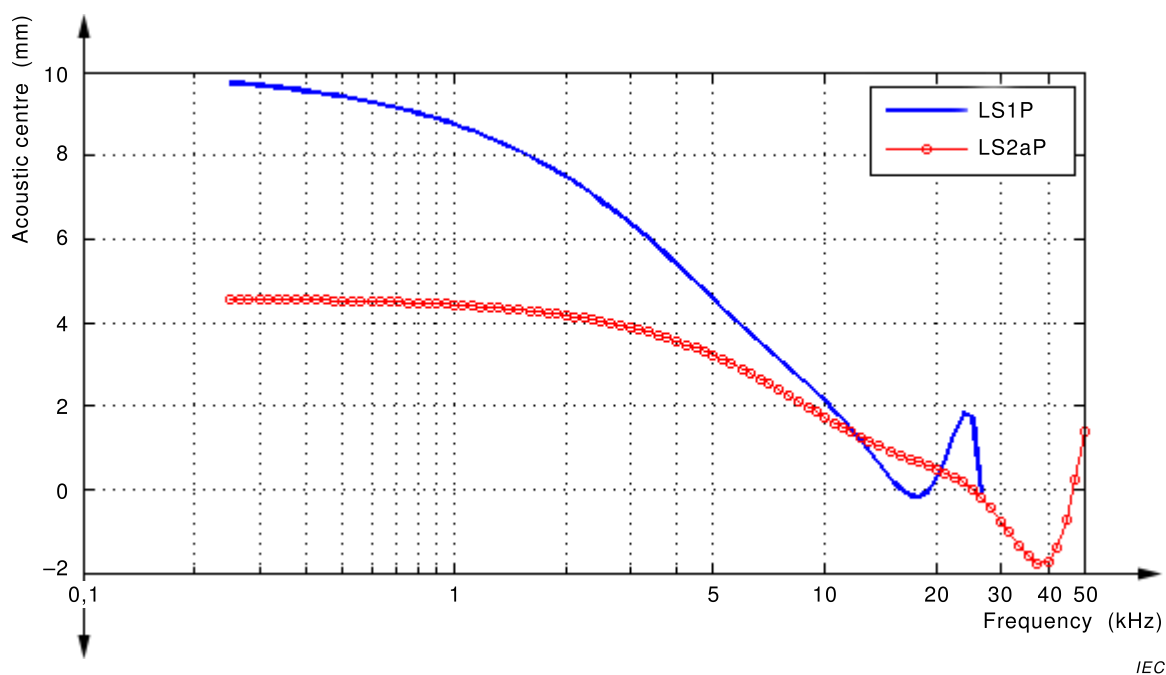


Figure A.1 – Example of the estimated values of the acoustic centres of LS1P and LS2aP microphones given in the bibliographical references for Annex A

## Annex B (normative)

### Values of the air attenuation coefficient

#### B.1 General

Certain quantities, describing the properties of air, enter the expressions for calculating the free-field sensitivity of the microphones, see Formulae (6) and (7). Methods for calculating the density and speed of sound in humid air (including dispersion effects) are described in IEC 61094-2. Methods for calculating the air attenuation coefficient are given in ISO 9613-1. Its Annex A describes the physical mechanisms for the phenomenon, and 5.2 and Annex B give formulae for calculating the attenuation coefficient as a function of frequency, temperature, static pressure and relative humidity. The calculation procedure in B.2 follows the guidelines in ISO 9613-1 with a few adjustments to comply with the procedures given in IEC 61094-2.

#### B.2 Calculation procedure

The formulae given in this annex are based on the measured environmental variables:

- $t$  temperature, in degree Celsius (°C);  
 $p_s$  static pressure, in pascals (Pa);  
 $H$  relative humidity, as a percentage (%).

The calculation of the air absorption takes into account that the humid air is not an ideal gas and thus some additional quantities and constants are used:

- $T$  = 273,15 +  $t$ , the thermodynamic temperature, in kelvin (K);  
 $T_{20}$  = 293,15 K (20 °C);  
 $p_{s,r}$  = 101 325 Pa;  
 $c$  speed of sound at actual environmental conditions, in metres per second (m/s);  
 $p_{sv}(t)$  saturation water vapour pressure, in pascals (Pa);  
 $x_w$  molar fraction of water vapour in air;  
 $\alpha_{cl}$  classical absorption neglecting the influence of molecular relaxation processes;  
 $\alpha_{rot}$  absorption caused by rotational molecular relaxation processes, in nepers per metre (Np/m);  
 $\alpha_{vib,O}$  molecular absorption due to vibrational relaxation of oxygen, in nepers per metre (Np/m);  
 $\alpha_{vib,N}$  molecular absorption due to vibrational relaxation of nitrogen, in nepers per metre (Np/m);  
 $f_{rO}$  oxygen relaxation frequency, in hertz (Hz);  
 $f_{rN}$  nitrogen relaxation frequency, in hertz (Hz);  
 $\alpha$  =  $\alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib,O} + \alpha_{vib,N}$  air attenuation coefficient, in nepers per metre (Np/m).

#### Step 1

Determine the saturation water vapour pressure (see also IEC 61094-2:2009, F.2):

$$p_{sv}(t) = \exp(1,237\,884\,7 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,912\,131\,6 \cdot 10^{-2} \cdot T + 33,937\,110\,47 - 6,3343\,184\,5 \cdot 10^3 \cdot T^{-1})$$

**Step 2**

Determine the molar fraction of water vapour:

$$x_w = \frac{H}{100} \left( \frac{p_{sv}}{p_s} \right) \left( 1,000\,62 + 3,14 \cdot 10^{-8} \cdot p_s + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \right)$$

**Step 3**

Determine the relaxation frequencies:

$$f_{rO} = \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left[ 24 + 4,04 \cdot 10^6 x_w \left( \frac{0,2 + 10^3 x_w}{3,91 + 10^3 x_w} \right) \right]$$

$$f_{rN} = \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[ 9 + 28 \cdot 10^3 x_w \exp \left( -4,170 \left( \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{1}{3}} - 1 \right) \right) \right]$$

**Step 4**

Determine the individual absorption components:

$$\alpha_{cl} + \alpha_{rot} = 18,42 \times 10^{-12} f^2 \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{vib,O} = 4,3778 f^2 c^{-1} \left( f_{rO} + f^2 / f_{rO} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-2} \exp(-2239,1/T)$$

$$\alpha_{vib,N} = 36,6624 f^2 c^{-1} \left( f_{rN} + f^2 / f_{rN} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-2} \exp(-3352,0/T)$$

**Step 5**

Calculate the air attenuation coefficient  $\alpha$  in nepers per metre (Np/m):

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib,O} + \alpha_{vib,N} = f^2 \left[ 18,42 \times 10^{-12} \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\ \left. + \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-2} \left( \frac{4,3778}{c} \frac{\exp(-2239,1/T)}{f_{rO} + (f^2 / f_{rO})} + \frac{36,6624}{c} \frac{\exp(-3352,0/T)}{f_{rN} + (f^2 / f_{rN})} \right) \right]$$

The accuracy of the calculated air attenuation coefficient is estimated to be  $\pm 10\%$  for variations within the following ranges:

Air temperature:	-20 °C to 50 °C
Static pressure:	less than 200 kPa
Molar fraction of water vapour:	$0,5 \times 10^{-3}$ to $50 \times 10^{-3}$

Frequency-to-pressure ratio: 0,4 Hz/kPa to 10<sup>4</sup> Hz/kPa

Table B.1 gives values for the attenuation of sound pressure in air calculated according to ISO 9613-1 under the environmental conditions most relevant for reciprocity free-field calibrations in a laboratory.

The tabulated values are expressed in decibels per metre as 8,686  $\alpha$ .

**Table B.1 – Values for attenuation of sound pressure in air (in dB/m)**

<i>f</i> kHz	<i>t</i> = 21 °C, <i>p<sub>s</sub></i> = 101,325 kPa			<i>t</i> = 23 °C, <i>p<sub>s</sub></i> = 101,325 kPa			<i>t</i> = 25 °C, <i>p<sub>s</sub></i> = 101,325 kPa		
	<i>H</i> =25 %	<i>H</i> =50 %	<i>H</i> =80 %	<i>H</i> =25 %	<i>H</i> =50 %	<i>H</i> =80 %	<i>H</i> =25 %	<i>H</i> =50 %	<i>H</i> =80 %
1,0	0,005 4	0,004 8	0,005 4	0,005 4	0,005 2	0,005 9	0,005 4	0,005 7	0,006 3
1,25	0,007 5	0,005 9	0,006 3	0,007 2	0,006 2	0,006 9	0,007 0	0,006 7	0,007 6
1,6	0,011 1	0,007 5	0,007 7	0,010 4	0,007 8	0,008 3	0,009 9	0,008 2	0,009 1
2,0	0,016 2	0,009 9	0,009 3	0,014 9	0,009 9	0,009 9	0,014 0	0,010 2	0,010 7
2,5	0,024 0	0,013 4	0,011 6	0,022 0	0,013 2	0,012 1	0,020 3	0,013 2	0,012 9
3,15	0,036 5	0,019 2	0,015 3	0,033 2	0,018 4	0,015 5	0,030 4	0,018 0	0,016 1
4,0	0,056 5	0,028 7	0,021 2	0,051 4	0,027 1	0,021 0	0,046 9	0,025 9	0,021 2
5,0	0,084 6	0,042 6	0,029 9	0,077 3	0,039 7	0,029 1	0,070 6	0,037 4	0,028 7
6,3	0,126 7	0,064 9	0,044 1	0,117 0	0,060 1	0,042 1	0,107 6	0,056 1	0,040 7
8,0	0,188 2	0,101 0	0,067 3	0,176 7	0,093 3	0,063 5	0,164 5	0,086 6	0,060 5
10,0	0,264 3	0,152 7	0,101 3	0,253 9	0,141 1	0,094 9	0,240 5	0,130 8	0,089 6
12,5	0,357 8	0,229 2	0,153 5	0,353 7	0,213 1	0,143 4	0,342 9	0,198 0	0,134 7
16,0	0,477 1	0,354 1	0,243 5	0,488 5	0,332 7	0,227 5	0,488 9	0,311 5	0,213 2
20,0	0,592 9	0,513 9	0,368 2	0,626 6	0,490 1	0,345 2	0,646 8	0,464 1	0,324 0
25,0	0,712 3	0,725 6	0,551 4	0,773 7	0,706 1	0,520 7	0,822 4	0,679 4	0,491 0
31,5	0,842 1	1,001 9	0,824 4	0,933 2	0,999 8	0,787 6	1,016 6	0,982 8	0,749 1
40,0	0,994 7	1,344 5	1,219 1	1,113 6	1,379 5	1,184 7	1,232 6	1,391 5	1,141 9
50,0	1,175 8	1,713 5	1,708 3	1,315 7	1,800 7	1,693 0	1,463 6	1,861 2	1,659 4

## **Annex C** (informative)

### **Environmental influence on the sensitivity of microphones**

#### **C.1 General**

Annex C gives information on the influence of static pressure and temperature on the free-field sensitivity of type LS1P and LS2P microphones. At present, such data are not available for other types of LS microphones.

A comprehensive description of the influence of the environmental conditions on the pressure sensitivity of microphones is given in Annex D of IEC 61094-2:2009. In addition to this influence, the radiation impedance and the diffraction around the microphone also depend on the environmental conditions.

Constructional details of the microphone determine the relative influence of the environmental conditions. The speed of sound, the density and the viscosity of air are considered linear functions of temperature and/or static pressure. The resulting static pressure and temperature coefficients of the microphone are then considered to be determined by the ratio of the free-field sensitivity at reference conditions to the free-field sensitivity at the relevant static pressure and temperature, respectively. The examples apply to the free-field sensitivity for sound propagation along the principal axis toward the front of diaphragm.

#### **C.2 Dependence on static pressure**

Examples of the static pressure coefficient referring to the pressure sensitivity of microphones are shown in Figure D.1 of IEC 61094-2:2009. The additional influence from the radiation impedance will modify this figure primarily by lowering the resonance frequency slightly. Thus, in the absence of a detailed knowledge of the static pressure coefficients for the free-field sensitivities the corresponding values for the pressure sensitivities may be used with an increased uncertainty at high frequencies. In general, the static pressure coefficient depends on constructional details of the microphone and the actual values may differ considerably for two microphones of different manufacture although the microphones may belong to the same type. Consequently, the static pressure coefficients shown on Figure D.1 of IEC 61094-2:2009 should not be applied to individual microphones.

The low-frequency value of the static pressure coefficient generally lies between  $-0,01$  dB/kPa and  $-0,02$  dB/kPa for LS1P microphones, and between  $-0,003$  dB/kPa and  $-0,008$  dB/kPa for LS2P microphones.

#### **C.3 Dependence on temperature**

Examples of the temperature coefficient referring to the pressure sensitivity of microphones are shown in Figure D.2 of IEC 61094-2:2009. For the free-field sensitivity, temperature variations influence the free-field sensitivity in two ways: via the additional radiation impedance and via the scattering factor  $\underline{S}(f,\theta)$  (see Formula (4)).

The influence on the free-field sensitivity arising from the radiation impedance follows the same procedure as outlined in C.2 above, i.e. the temperature coefficients valid for the pressure sensitivities may be applied with an increased uncertainty at high frequencies.

The influence of temperature on the speed of sound, i.e. on the wavelength, also affects the scattering factor  $\underline{S}(f,\theta)$  (see Formula (4)). This effect will depend on the angle of sound incidence and may lead to high values at high frequencies at certain angles of minimum sensitivity. For normal incidence of sound, IEC TS 61094-7 describes the free-field to

pressure sensitivity level differences for type LS1P and LS2P microphones and their dependence on temperature.

The low-frequency value of the temperature coefficient generally lies between  $-0,005$  dB/K and  $+0,005$  dB/K for both LS1P and LS2P microphones.

## **Annex D** (informative)

### **Application of time selective techniques for removal of unwanted reflections and acoustic interference between microphones**

#### **D.1 General**

The practical implementation of the free-field reciprocity method can suffer from a number of problems that will have a degrading effect on the accuracy of the free-field sensitivity determined from these measurements. These perturbations include electrical cross-talk, reflections from the mechanical elements used to hold the microphones in place and from room walls, and the acoustic interference between microphones. These perturbations can be totally or partially removed by filtering in the time domain (time-selective or time-windowing techniques).

The basic principles of filtering in the time domain relevant for this part of IEC 61094 are described in IEC 61094-8:2012, B.1, B.2 and B.3.

#### **D.2 Practical considerations**

##### **D.2.1 Signal-to-noise ratio**

It is common, due to the very low signal-to-noise ratio (SNR) during the measurement of the electrical transfer impedance, that pure sinusoidal signals are used for driving the transmitter microphone. Large driving signals can introduce harmonic artefacts that will affect the level of the fundamental frequency component, and thus should be avoided. A possibility for improving the SNR is to apply narrow-band filtering either by hardware filters, by spectral averaging, or by synchronous averaging in the time domain.

Signal-to-noise ratio is frequency dependent. At low and very high frequencies, the efficiency of microphones as sound transmitters is very low, and the resulting SNR is poor; it would require impractically long averaging times to obtain a sufficiently narrow filtering bandwidth. Acceptable SNR's are generally obtained in the frequency range from 0,1 times to 3 times the resonance frequency of the microphones.

This presents a limitation on the frequency range where measurements of the electrical transfer impedance yield an acceptable accuracy, regardless of the signal type used.

##### **D.2.2 Reflections from walls and measurement rig**

The instant in which reflections from walls and other mechanical elements of the measurement rig reach the microphones helps to decide how long the total impulse response should be in order to fully separate early and late reflections from the direct impulse response. Besides the practical design considerations that define the position of potentially reflective elements in the measurement set-up, a decision on the sound absorbing material used in the measurement rooms will have an influence in the selection of the measurement parameters.

Circular convolution can occur when the transfer function is measured in the frequency domain, and then transformed into the time domain. Consequently, for insufficiently long impulse responses, or inversely insufficiently small frequency spacing, late-arriving secondary or tertiary reflections at the receiver microphone will be missed out, which then fold over the obtained impulse response and most likely affect the final results. This is particularly critical in small rooms. The problem can be minimized by

- decreasing the size of the frequency steps, hence increasing the length of the impulse response (this will also improve sampling of the reflections and other disturbances), and
- having the walls of the measurement room covered with absorbent material that reduces the amplitude of the incident wave by at least 30 dB.

Circular convolution will not occur when using sweeps providing that sufficient zero-padding is used. However, it is important to ensure that the impulse response is sufficiently long as to include all reflections.

### **D.3 Frequency limitations**

#### **D.3.1 General**

Swept-sine signals can be used to measure the frequency response in a finite frequency range that can include low frequencies, and up to a frequency limit prescribed by the instrumentation used. Measurements based on pure tones or broadband signals, like pseudo-random noise, can also start at low frequencies, and go up to the high frequency limit dictated by the instrumentation. Due to the signal-to-noise limitations discussed in D.2.1, the practical difficulties of including low frequency measurements may outweigh the benefits.

In addition, the nature of each measurement method requires that low frequency limitations are treated differently.

#### **D.3.2 Measurements based on frequency sweeps**

Sweep signals can be designed to have a frequency content confined within a finite frequency band. The signal processing resulting in the determination of the impulse response is based on the deconvolution of the measured response with the inverse filter; therefore, the design of the signal can benefit from the following considerations.

- The inverse filter will amplify those frequency components outside of the frequency range of interest. This can potentially mask the retrieved impulse response if the signal-to-noise ratio (SNR) outside the frequencies of interest is not high enough to counterbalance the amplification provided by the inverse filter.
- Any discontinuity in the excitation signal will yield artefacts in the form of impulsive noise. This is particularly important when designing the onset and end of the excitation signal. Tapering the start and end of the excitation signal with a time window can avoid such problems.
- If the time-frequency selectivity featured by sweep signals is to be fully exploited, particularly for distortion analysis, it is important to implement the deconvolution process as a linear convolution. To do this in the frequency domain by means of the Discrete Fourier Transform (DFT) or the Fast Fourier Transform (FFT) algorithms, one has to add zeroes at the end of the temporal signals (this procedure is often referred to as “zero-padding”) so that there is no wrap-around effect when performing the convolution.

#### **D.3.3 Measurements based on pure tones**

When the frequency response is measured with pure tones, the start and end points of the frequency range measured can be chosen arbitrarily. Due to the presence of cross-talk, background noise, and the poor transmission capabilities of the microphones, it is impractical and possibly time-consuming to make measurements at frequencies below one-eighth of the resonance frequency for LS1 and LS2 microphones.

The highest measurement frequency should be chosen such that a more realistic representation of the direct impulse response between microphones is obtained. This usually occurs when the highest measured frequency is more than 2 to 3 times the resonance frequency of the microphones.

## D.4 Generating missing portions of the frequency response previous to transforming to the time-domain.

### D.4.1 General

To make the transformation from the frequency domain to the time domain and obtain a representation of the impulse response that is free of artefacts, it is necessary to measure the transfer impedance at frequencies from  $-\infty$  to  $+\infty$  (or from 0 to  $+\infty$  when using a one-sided frequency response). This cannot be done in practice, and any measurement will be subject to well-defined frequency limits,  $(f_{\min}, f_{\max})$  as discussed above. A less accurate but still reliable representation can be obtained by using two procedures: filling the missing frequency ranges with theoretically determined values of the frequency response, and applying either a low-pass frequency filter or a band-pass frequency filter before the transformation to the time domain.

In principle, the measured frequency response can be represented as the multiplication of the infinite frequency response and a rectangular band-pass frequency filter. However, the use of this approach is not recommended because such a filter has poorly attenuated side lobes that can result in an impulse response contaminated with spurious components.

### D.4.2 Missing frequencies below the minimum measurement frequency

The electrical transfer impedance from  $f = 0$  to  $f = f_{\min}$  can be generated using an expression obtained from re-arranging Formula (7):

$$\frac{U_2}{i_1} = j \frac{\rho f}{2d_{12}} \underline{M}_{f,1} \underline{M}_{f,2} e^{-jk d_{12}} e^{-\alpha d_{m12}} \quad (\text{D.1})$$

At low frequencies up to about a quarter of the resonance frequency, the free-field sensitivity can be calculated by using Formula (4). At these frequencies the load of the radiation impedance can be neglected, and the free-field sensitivity can be calculated from the product of the pressure sensitivity and the scattering factor. Furthermore, at these frequencies air absorption can also be neglected in Formula (D.1).

The pressure sensitivity can be determined experimentally from electrostatic actuator measurements or reciprocity calibration. However, it is important to note that in a free-field calibration, the static pressure equalization tube of the microphone is exposed to the sound field. The pressure sensitivity can also be determined analytically from lumped parameter models.

The diffraction factor can be determined either numerically, using the Boundary Element Method, the Finite Element Method or any other integral formulation, or it can be determined experimentally from measurements in a large standing wave tube.

NOTE In order to avoid strong discontinuities between the calculated and the measured transfer impedances, a smoothing transition can be achieved by defining an overlap frequency range in which the frequency response is calculated as a progressive gliding average.

### D.4.3 Missing frequencies above the maximum measured frequency

The high frequency data cannot in practice be determined from Formula (D.1) due to the many complexities of the behaviour of the microphone: resonances in the back cavity, viscous losses, etc. A simplified approach may be to consider the microphone as a single degree of freedom system, where the sensitivity falls by 12 dB per octave above its resonance frequency. A simple and practical approach is to extrapolate the complex frequency response using the last few measurement points in which the measured frequency response decays smoothly.

#### **D.4.4 Filtering the extended frequency response**

An additional measure to accelerate the decay of the frequency response at high frequencies is to apply a low-pass frequency filter. A low-pass filter designed for this purpose should have highly attenuated secondary lobes (at least 80 dB), minimal ripple (0,01 dB maximum), and linear phase. It is also recommended that the roll-off frequency of the filter lies within the extrapolated frequency range.

NOTE A band-pass having similar properties to the low-pass filter can also be used.

## Bibliography

Relevant for Annex A:

WAGNER, R.P., and NEDZELNITSKY, V. Determination of acoustic center correction values for type LS2aP microphones at normal incidence, *J. Acoust. Soc. Am.* **104**, 1998, 192-203

BARRERA-FIGUEROA, S., RASMUSSEN, K., and JACOBSEN, F. *The acoustic center of laboratory standard microphones* *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2006, 2668-2675

RODRIGUES, D., DUROCHER, J.-N., BRUNEAU, M., and BRUNEAU A.-M., A new method for the determination of the acoustic center of acoustic transducers, *Acta Acustica united with Acustica* **96**, 2010, 300-305

Relevant for Annex D:

A general bibliography concerning time selective methods applied to microphone calibration is presented in IEC 61094-8. The bibliography below supplements this with literature that is specifically related to the application of time-selective techniques to free-field reciprocity calibration.

IEC 61094-8:2012, *Measurement microphones – Part 8: Methods for determining the free-field sensitivity of working standard microphones by comparison*

LAMBERT, J.-M., and DUROCHER, J.-N., *Analyse des perturbations acoustiques lors de l'étalonnage en champ libre des microphones étalons à condensateurs dits d'un pouce par la technique de la réciprocité*, Laboratoire National d'Essais, 1989

VORLÄNDER, M., and BIETZ, H. Novel broad band reciprocity technique for simultaneous free-field and diffuse-field microphone calibration, *Acustica* **80**, 1994, 365-377

BARRERA-FIGUEROA, S., RASMUSSEN, K., and JACOBSEN, F. A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones, *J. Acoust. Soc. Am.* **114**, 2003, 1467-1476

KWON, H.S., SUH, S.J., and SUH, J.G. Frequency Windowing Technique for Reducing Multi-Path Noise in Free-Field Reciprocity Microphone Calibration Method, *Key Engineering Materials* **321-323**, 2006, 1245-1248

---

## SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	32
1 Domaine d'application.....	34
2 Références normatives .....	34
3 Termes et définitions .....	34
4 Conditions ambiantes de référence .....	35
5 Principe de l'étalonnage en champ libre par réciprocité .....	35
5.1 Principes généraux .....	35
5.1.1 Généralités .....	35
5.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones .....	36
5.1.3 Principes généraux de la méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire .....	36
5.2 Expressions de base .....	36
5.3 Technique de la tension insérée .....	37
5.4 Caractéristiques de réception en champ libre d'un microphone.....	37
5.5 Caractéristiques en champ libre d'un microphone émetteur .....	38
5.6 Procédure de la réciprocité.....	39
5.7 Expressions finales de l'efficacité en champ libre.....	40
5.7.1 Méthode utilisant trois microphones.....	40
5.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire .....	40
6 Facteurs d'influence sur l'efficacité en champ libre .....	40
6.1 Généralités .....	40
6.2 Tension de polarisation .....	41
6.3 Configuration du blindage.....	41
6.4 Conditions acoustiques .....	41
6.5 Position du centre acoustique d'un microphone.....	42
6.6 Influence des conditions ambiantes .....	42
6.6.1 Généralités .....	42
6.6.2 Pression statique .....	42
6.6.3 Température .....	42
6.6.4 Humidité .....	43
6.6.5 Transposition aux conditions ambiantes de référence .....	43
6.7 Considérations concernant l'espace de mesure.....	43
7 Composantes d'incertitudes d'un étalonnage .....	43
7.1 Généralités .....	43
7.2 Impédance électrique de transfert.....	43
7.3 Ecart par rapport aux conditions en champ libre idéales .....	44
7.4 Atténuation du son dans l'air .....	45
7.5 Tension de polarisation .....	45
7.6 Propriétés physiques de l'air.....	45
7.7 Imperfection de la théorie .....	45
7.8 Incertitude sur le niveau d'efficacité en champ libre .....	45
Annexe A (informative) Valeurs de la position du centre acoustique .....	47
Annexe B (normative) Valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air .....	48
B.1 Généralités .....	48
B.2 Procédure de calcul .....	48

Annexe C (informative) Influence de l'environnement sur l'efficacité des microphones .....	51
C.1 Généralités .....	51
C.2 Influence de la pression statique .....	51
C.3 Influence de la température .....	51
Annexe D (informative) Application de techniques de filtrage temporel pour l'élimination des réflexions et interférences acoustiques indésirables entre les microphones .....	53
D.1 Généralités .....	53
D.2 Considérations pratiques .....	53
D.2.1 Rapport signal sur bruit .....	53
D.2.2 Réflexions des parois et de l'équipement de mesure .....	53
D.3 Limitations en fréquence .....	54
D.3.1 Généralités .....	54
D.3.2 Mesures basées sur les balayages en fréquence .....	54
D.3.3 Mesures basées sur les sons purs .....	54
D.4 Génération des portions manquantes de la réponse en fréquence avant la transformation en domaine temporel .....	55
D.4.1 Généralités .....	55
D.4.2 Fréquences manquantes au-dessous de la fréquence de mesure minimale .....	55
D.4.3 Fréquences manquantes au-dessus de la fréquence de mesure maximale .....	56
D.4.4 Filtrage de la réponse en fréquence étendue .....	56
Bibliographie .....	57
 Figure 1 – Circuit équivalent pour un microphone récepteur dans des conditions de champ libre .....	 37
Figure 2 – Circuit équivalent pour un microphone émetteur dans des conditions de champ libre .....	38
Figure A.1 – Exemple de valeurs estimées des centres acoustiques des microphones LS1P et LS2aP indiquées dans les références bibliographiques pour l'Annexe A .....	47
 Tableau 1 – Composantes d'incertitude .....	 46
Tableau B.1 – Valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air (en dB/m) .....	50

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### ÉLECTROACOUSTIQUE – MICROPHONES DE MESURE –

#### **Partie 3: Méthode primaire pour l'étalonnage en champ libre des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité**

##### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 61094-3 a été établie par le comité d'études 29 de l'IEC: Electroacoustique.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1995. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) une nouvelle annexe informative décrivant l'utilisation de techniques de filtrage temporel pour réduire le plus possible l'influence des réflexions acoustiques du montage de mesure;
- b) disposition relative à l'étalonnage des microphones en configuration de blindage gardé.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
29/873/CDV	29/892A/RVC

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61094, publiées sous le titre général *Electroacoustique – Microphones de mesure*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

## ELECTROACOUSTIQUE – MICROPHONES DE MESURE –

### Partie 3: Méthode primaire pour l'étalonnage en champ libre des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61094:

- spécifie une méthode primaire de détermination de l'efficacité en champ libre complexe des microphones étalons de laboratoire de manière à établir une base reproductible et exacte pour la mesure de la pression acoustique dans des conditions de champ libre,
- est applicable aux microphones étalons de laboratoire satisfaisant aux exigences de l'IEC 61094-1,
- est destinée à être utilisée dans des laboratoires ayant du personnel hautement expérimenté et un équipement spécialisé.

NOTE Le principe d'étalonnage décrit dans cette partie de l'IEC 61094 s'applique également aux microphones étalons de travail, utilisés de préférence sans leur grille de protection.

#### 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 61094-1:2000, *Microphones de mesure – Partie 1: Spécifications des microphones étalons de laboratoire*

IEC 61094-2:2009, *Electroacoustique – Microphones de mesure – Partie 2: Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité*

IEC TS 61094-7:2006, *Microphones de mesure – Partie 7: Valeurs des différences entre les niveaux d'efficacité en champ libre et en pression des microphones étalons de laboratoire*

ISO 9613-1, *Acoustique – Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre – Partie 1: Calcul de l'absorption atmosphérique*

Guide ISO/IEC 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (GUM:1995)

#### 3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 61094-1, IEC 61094-2, et le Guide ISO/IEC 98-3 ainsi que les suivants s'appliquent.

##### 3.1 phase

<efficacité en champ libre d'un microphone> angle de phase entre la tension en circuit ouvert et la pression acoustique qui existerait à l'emplacement du centre acoustique du microphone

en l'absence de celui-ci, pour une onde progressive plane sinusoïdale de fréquence et direction données de l'incidence acoustique, et pour des conditions ambiantes données

Note 1 à l'article: La phase est exprimée en degrés (°) ou en radians (rad).

### **3.2 centre acoustique**

<microphone> point à partir duquel les surfaces d'onde approximativement sphériques provenant d'un transducteur émetteur acoustique générant un signal sinusoïdal de fréquence donnée semblent diverger par rapport à une petite région autour d'un point d'observation, dans une direction et à une distance spécifiées de la source sonore

Note 1 à l'article: Le centre acoustique d'un transducteur réciproque utilisé comme récepteur coïncide avec le centre acoustique de ce transducteur utilisé comme émetteur.

Note 2 à l'article: Cette définition s'applique seulement aux régions du champ acoustique où les surfaces d'ondes sont sphériques ou approximativement sphériques.

### **3.3 transducteur ponctuel équivalent**

transducteur théorique occupant un seul point et qui, à la position de son centre acoustique, simule les caractéristiques d'émission ou de réception d'un microphone, pour un signal sinusoïdal d'une fréquence donnée, et une direction et une distance données

### **3.4 axe principal**

<microphone> ligne passant par le centre de la membrane du microphone et perpendiculaire à celle-ci

### **3.5 conditions de champ libre**

environnement de champ acoustique aérien dans lequel les ondes acoustiques peuvent se propager librement sans perturbations d'aucune sorte

## **4 Conditions ambiantes de référence**

Les conditions ambiantes de référence sont les suivantes:

- température 23,0 °C
- pression statique 101,325 kPa
- humidité relative 50 %

## **5 Principe de l'étalonnage en champ libre par réciprocité**

### **5.1 Principes généraux**

#### **5.1.1 Généralités**

Un étalonnage de microphones par réciprocité peut être effectué au moyen de trois microphones, deux d'entre eux devant être réciproques, ou au moyen d'une source sonore auxiliaire et de deux microphones, dont l'un doit être réciproque.

NOTE 1 Si l'un des microphones n'est pas réciproque, il ne peut être utilisé que comme récepteur.

NOTE 2 Les microphones étalons de laboratoire sont réciproques lorsqu'ils sont utilisés dans leur plage de fonctionnement linéaire.

### 5.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones

Soit deux microphones couplés acoustiquement dans des conditions de champ libre. L'impédance électrique de transfert est mesurée en utilisant l'un d'entre eux comme source sonore et l'autre comme récepteur. Si l'impédance acoustique de transfert du système est connue, le produit des efficacités en champ libre des deux microphones couplés peut être déterminé. En effectuant des combinaisons des microphones deux à deux, trois produits d'efficacité mutuellement indépendants sont obtenus, à partir desquels l'expression de l'efficacité en champ libre de chacun des trois microphones peut être déduite.

### 5.1.3 Principes généraux de la méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire

Dans un premier temps, les deux microphones sont couplés acoustiquement dans les conditions de champ libre, le produit des efficacités en champ libre des deux microphones étant déterminé comme indiqué en 5.1.2. Ensuite, les deux microphones sont soumis de manière séquentielle à la même pression acoustique, produite par la source sonore auxiliaire, dans des conditions de champ libre identiques. Le rapport des tensions de sortie est alors égal au rapport des efficacités en champ libre des deux microphones. Ainsi, à partir du produit et du rapport des efficacités en champ libre des deux microphones, une expression de l'efficacité en champ libre peut être déduite pour chacun d'eux.

NOTE Pour obtenir le rapport des efficacités en champ libre, une méthode de comparaison directe peut être utilisée et la source sonore auxiliaire peut être un autre transducteur ou un troisième microphone présentant des caractéristiques mécaniques ou acoustiques différentes de celles des microphones étalonnés.

## 5.2 Expressions de base

Les microphones étalons de laboratoire sont considérés comme étant réciproques. Dans ces conditions, les formules du réseau à deux accès des microphones peuvent s'écrire sous la forme:

$$\begin{aligned} \underline{z}_{11} \underline{i} + \underline{z}_{12} \underline{q} &= \underline{U} \\ \underline{z}_{21} \underline{i} + \underline{z}_{22} \underline{q} &= \underline{p} \end{aligned} \quad (1)$$

où

$\underline{p}$	est la pression acoustique aux bornes acoustiques du microphone, en pascal (Pa);
$\underline{U}$	est la tension de signal aux bornes électriques du microphone, en volts (V);
$\underline{q}$	est le flux de vitesse acoustique à travers les bornes acoustiques (membrane) du microphone, en mètres cubes par seconde ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
$\underline{i}$	est le courant à travers les bornes électriques du microphone, en ampères (A);
$\underline{z}_{11} = \underline{Z}_e$	est l'impédance électrique du microphone quand la membrane est bloquée, en ohms ( $\Omega$ );
$\underline{z}_{22} = \underline{Z}_a$	est l'impédance acoustique du microphone quand les bornes électriques sont déchargées, en pascal-seconde par mètre cube ( $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ ),
$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{M}_p \underline{Z}_a$	est égal aux impédances de transfert inverse et direct en volts-secondes par mètre cube ( $\text{V}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $\underline{M}_p$ étant l'efficacité en pression du microphone en volts par pascal ( $\text{V}\cdot\text{Pa}^{-1}$ ).

NOTE Les symboles soulignés représentent des quantités complexes.

La Formule (1) peut ainsi être réécrite sous la forme:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{U} \\ \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{p} \end{aligned} \quad (2)$$

qui constituent les formules de réciprocité du microphone.

Si la pression acoustique  $\underline{p}$  n'est pas uniforme sur toute la surface de la membrane, comme c'est le cas aux fréquences élevées quand le microphone est soumis à une onde progressive plane, l'emplacement des bornes acoustiques est donné au moyen du transducteur ponctuel équivalent simulant le microphone. Dans ce cas, la Formule (1) est également valable pour le microphone réel avec une interprétation spéciale de  $\underline{p}$  (voir 5.4 et 5.5).

### 5.3 Technique de la tension insérée

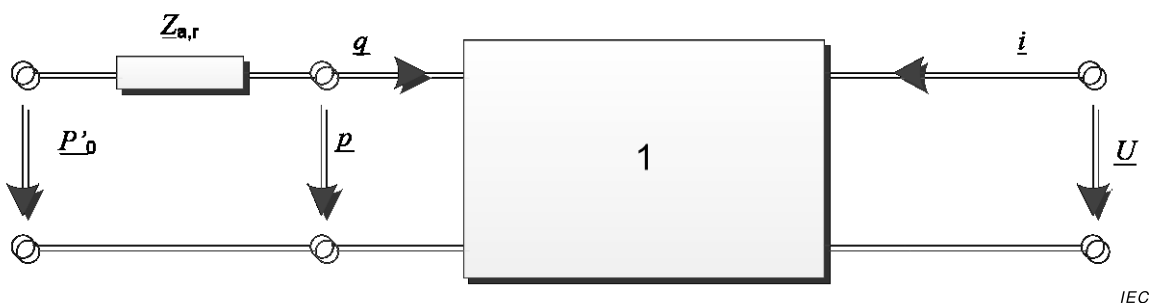
La technique de la tension insérée est utilisée pour déterminer la tension en circuit ouvert d'un microphone quand il est chargé électriquement.

Soit un microphone ayant une tension en circuit ouvert et une impédance électrique interne données, connecté à une impédance de charge électrique externe. Pour mesurer la tension en circuit ouvert, une impédance (petite par rapport à l'impédance de charge) est connectée en série avec le microphone et une tension d'étalonnage est appliquée à ses bornes.

Soit une pression acoustique et une tension d'étalonnage de même fréquence appliquées alternativement. La tension d'étalonnage est ajustée de sorte qu'elle produise la même chute de tension à l'impédance de charge que celle qui résulte de la pression acoustique sur le microphone; la tension en circuit ouvert étant alors égale en amplitude à la tension d'étalonnage.

### 5.4 Caractéristiques de réception en champ libre d'un microphone

Soit un microphone soumis à une onde progressive plane de pression acoustique  $p_0$ . Le circuit équivalent du microphone est donné dans la Figure 1, où  $\underline{p}'_0$  est la pression acoustique quand la membrane est bloquée et  $\underline{p}$  la pression acoustique réelle aux bornes acoustiques du microphone.  $\underline{Z}_{a,r}$  est l'impédance acoustique de rayonnement du microphone.



#### Légende

1 microphone

**Figure 1 – Circuit équivalent pour un microphone récepteur dans des conditions de champ libre**

Soit  $\underline{p}'_0$  relié à  $\underline{p}_0$  par:

$$\frac{p'_0}{p_0} = \underline{S}(f, \theta)$$

où  $\underline{S}(f, \theta)$  est le facteur de diffraction et dépend de la configuration géométrique du microphone. Il est fonction de la fréquence  $f$  et de l'angle d'incidence  $\theta$  de l'onde acoustique sur la membrane du microphone.

Comme  $\underline{p} = \underline{p}'_0 - \underline{Z}_{a,r} \underline{q}$ , les formules du circuit à deux accès (2) peuvent être écrites sous la forme:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} \\ \underline{p}'_0 &= \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}) \underline{q} \end{aligned} \quad (3)$$

et, à partir de la définition de base, l'efficacité en champ libre est donnée par:

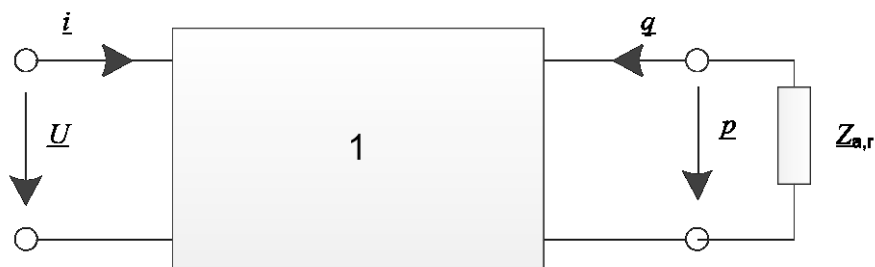
$$\underline{M}_f = \left( \frac{\underline{U}}{\underline{p}'_0} \right)_{i=0} = \underline{M}_p \frac{\underline{Z}_a}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}} \underline{S}(f, \theta) \quad (4)$$

La Formule (4) montre que la différence entre l'efficacité en pression et l'efficacité en champ libre est déterminée non seulement par la géométrie du microphone au travers du facteur de diffraction  $\underline{S}(f, \theta)$ , mais également par la relation entre l'impédance acoustique du microphone et l'impédance de rayonnement.

NOTE L'effet du mécanisme de ventilation du microphone n'est pas pris en compte dans le modèle présenté et influence également la différence entre l'efficacité en pression et l'efficacité en champ libre à basses fréquences (voir 6.1).

### 5.5 Caractéristiques en champ libre d'un microphone émetteur

Soit un microphone utilisé comme émetteur dans des conditions de champ libre. Le circuit équivalent du microphone est donné dans la Figure 2.



IEC

#### Légende

1 microphone

**Figure 2 – Circuit équivalent pour un microphone émetteur dans des conditions de champ libre**

Comme  $\underline{p} = -\underline{Z}_{a,r} \underline{q}$ , les formules du circuit à deux accès, du microphone émetteur peuvent être écrites sous la forme:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} \\ 0 &= \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + (\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}) \underline{q} \end{aligned} \quad (5)$$

de sorte que:

$$-\underline{q} = \frac{\underline{M}_p \underline{Z}_a}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_{a,r}} \underline{i} = \frac{\underline{M}_f}{\underline{S}(f, \theta)} \underline{i}$$

Il peut être déduit du principe général de réciprocité qu'en un point éloigné, le transducteur ponctuel équivalent se comporte comme une simple source ayant un débit acoustique  $-\underline{q} \underline{S}(f, \theta) = \underline{M}_f \underline{i}$  et la pression acoustique  $\underline{p}_0$  à une distance  $d$  entre ce point et le transducteur ponctuel équivalent est alors:

$$\underline{p}_0 = j \frac{\rho f}{2d} \underline{M}_f \underline{i} e^{-\underline{\gamma}d} e^{j\omega t} = j \frac{\rho f}{2d} \underline{M}_f \underline{i} e^{j(\omega t - kd)} e^{-\alpha d} \quad (6)$$

où

$\underline{\gamma} = \alpha + jk$  est l'exposant linéique de propagation complexe,  $\alpha$  est l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air,  $k$  est le nombre d'ondes et  $\rho$  est la masse volumique du gaz.

NOTE La démonstration de la Formule (6) ci-dessus repose sur une représentation de paramètre localisé du microphone (voir Formule (1)). Une démonstration plus rigoureuse peut être obtenue en utilisant une forme de représentation intégrale des formules du microphone.

## 5.6 Procédure de la réciprocité

Soit deux microphones appelés microphone 1 et microphone 2 présentant les efficacités en champ libre  $\underline{M}_{f,1}$  et  $\underline{M}_{f,2}$  respectivement, placés face à face dans un champ libre et dont les axes principaux sont confondus. Un courant  $\underline{i}_1$  traversant les bornes électriques du microphone 1 produit une pression acoustique  $\underline{p}_0$  donnée par la Formule (6) à une distance  $d$  de son centre acoustique, dans les conditions de champ libre. Lorsque le microphone 2 est introduit dans le champ acoustique, sans tenir compte des pertes dans le milieu et en partant du principe qu'aucune interaction n'a lieu entre les deux microphones, la tension en circuit ouvert du microphone 2 est:

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{f,2} \underline{p}_0 = j \frac{\rho f}{2d_{12}} \underline{M}_{f,1} \underline{M}_{f,2} \underline{i}_1 e^{j(\omega t - kd_{12})}$$

$d_{12}$  étant la distance entre les centres acoustiques du microphone 1 et du microphone 2.

A des fréquences élevées, les effets de la relaxation moléculaire et les pertes visqueuses dans l'air ne peuvent pas être négligées et le produit des efficacités en champ libre est ainsi donné par:

$$\underline{M}_{f,1} \underline{M}_{f,2} = -j \frac{2d_{12}}{\rho f} \frac{\underline{U}_2}{\underline{i}_1} e^{jkd_{12}} e^{\alpha d_{m12}}, \quad (7)$$

où  $d_{m12}$  est la distance physique entre les membranes du microphone 1 et du microphone 2, c'est-à-dire la distance réelle à laquelle l'onde acoustique s'est propagée.

## 5.7 Expressions finales de l'efficacité en champ libre

### 5.7.1 Méthode utilisant trois microphones

En appliquant les principes énoncés en 5.1.2, considérons que l'impédance électrique de transfert  $\underline{U}_2 / \underline{i}_1$  est notée  $\underline{Z}_{e,12}$  avec des expressions similaires pour d'autres paires impliquant le troisième microphone (microphone 3). L'expression finale de l'efficacité en champ libre complexe du microphone 1 est alors:

$$\underline{M}_{f,1} = \left( \frac{2}{\rho f} \frac{d_{12} d_{31}}{d_{23}} \frac{\underline{Z}_{e,12} \underline{Z}_{e,31}}{\underline{Z}_{e,23}} e^{jk(d_{12} + d_{31} - d_{23})} e^{\alpha(d_{m12} + d_{m31} - d_{m23})} \right)^{1/2} \quad (8)$$

Des expressions similaires s'appliquent pour le microphone 2 et le microphone 3.

Le module et la phase de l'efficacité en champ libre peuvent être déduits de la Formule (8), après quoi il convient que la phase fasse référence à toute la plage de phases à quatre quadrants, c'est-à-dire 0 à  $2\pi$  rad ou 0 à 360°.

### 5.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire

Si seulement deux microphones et une source sonore auxiliaire sont utilisés, si les principes énoncés en 5.1.3 sont appliqués, l'expression finale du module de l'efficacité en champ libre est:

$$\underline{M}_{f,1} = \left( r_{12} \frac{2d_{12}}{\rho f} \underline{Z}_{e,12} e^{jkd_{12}} e^{\alpha d_{m12}} \right)^{1/2} \quad (9)$$

où le rapport des efficacités en champ libre des deux microphones,  $r_{12}$ , est mesuré par comparaison avec la source auxiliaire (voir 5.1.3).

## 6 Facteurs d'influence sur l'efficacité en champ libre

### 6.1 Généralités

L'efficacité en champ libre d'un microphone étalon de laboratoire dépend de la tension de polarisation, car il a un mécanisme de transductions électrostatiques, et des conditions ambiantes.

Le mode de fonctionnement de base d'un microphone électrostatique polarisé suppose que la charge électrique sur le microphone est maintenue constante à toutes les fréquences. Cette condition ne peut pas être maintenue à des fréquences très faibles, et le produit de la capacité d'un microphone et de la résistance de polarisation détermine la constante de temps pour le flux de charge vers/depuis le microphone. Lorsque l'efficacité en circuit ouvert du microphone, telle qu'obtenue à l'aide de la technique de la tension insérée, est déterminée correctement, la sortie absolue d'un préamplificateur associé au microphone diminue à basses fréquences conformément à cette constante de temps.

Les principes de construction des microphones étalons de laboratoire impliquent que la pression statique derrière et devant la membrane doit rester la même. Pour satisfaire à cette exigence, un tube d'équilibrage des pressions est utilisé pour raccorder la cavité arrière du microphone au support externe. Ce tube a pour effet d'approcher l'efficacité en champ libre de zéro à des fréquences très faibles (au-dessous de quelques hertz). La technique décrite dans la présente Norme n'est pas adaptée pour déterminer l'efficacité en champ libre dans cette plage de fréquences.

De plus, la définition de l'efficacité en champ libre implique que certaines exigences soient satisfaites par les mesures. Pendant l'étalonnage, il est essentiel que ces conditions soient suffisamment bien contrôlées pour que les composantes d'incertitude qui en résultent soient réduites.

## 6.2 Tension de polarisation

L'efficacité d'un microphone étalon de laboratoire est approximativement proportionnelle à la tension de polarisation. La tension de polarisation effectivement utilisée pendant l'étalonnage doit donc être indiquée.

Pour satisfaire à l'IEC 61094-1, une tension de polarisation de 200,0 V est recommandée.

## 6.3 Configuration du blindage

La tension en circuit ouvert et, par conséquent, l'efficacité en champ libre, dépendent de la configuration du blindage. Par conséquent, l'IEC 61094-1 spécifie une configuration mécanique de référence pour le blindage, à utiliser lors de la détermination de la tension en circuit ouvert. La configuration mécanique de référence étant essentielle, le blindage peut être mis à la terre (configuration du blindage à la masse) ou la tension de sortie du microphone peut être appliquée au blindage (configuration du blindage gardé). Il doit être indiqué si la configuration du blindage gardé ou du blindage à la masse a été utilisée dans les mesures.

La même configuration du blindage doit s'appliquer aux microphones émetteurs et récepteurs pendant l'étalonnage.

Si une configuration non normalisée est utilisée, les résultats de l'étalonnage doivent faire référence à la configuration mécanique de référence.

Si le constructeur indique une force mécanique maximale à appliquer au contact électrique central du microphone, cette limite ne doit pas être dépassée.

NOTE 1 Lorsque le blindage est gardé, l'impédance de charge telle qu'observée par le microphone est optimisée. Elle peut être décrite plus précisément que dans le cas de l'utilisation d'une configuration du blindage à la masse. Dans le cas idéal où le microphone est un dispositif parfaitement linéaire et passif et le blindage est soit mis à la terre soit gardé à partir d'une source d'impédance nulle, il n'y a pas de différence entre l'efficacité en circuit ouvert avec le blindage mis à la terre ou gardé.

NOTE 2 Dans la configuration du blindage gardé, si la tension de sortie est appliquée entre le microphone et le blindage, cela signifie que la différence entre le signal appliqué sur le blindage et sur l'axe central du microphone est négligeable.

NOTE 3 Si un microphone est relié à un préamplificateur au moyen d'un adaptateur, il est possible que la tension en circuit ouvert du microphone ne soit pas déterminée correctement par la technique de tension insérée à des fréquences élevées. Les écarts dépendent de l'impédance de charge telle qu'observée à partir du microphone.

## 6.4 Conditions acoustiques

L'efficacité en champ libre d'un microphone dépend de la configuration géométrique du boîtier contenant le préamplificateur. C'est la raison pour laquelle le microphone et la configuration du blindage doivent être fixés sur un cylindre dont le diamètre est égal au diamètre nominal du microphone, (voir le Tableau 1 et le Tableau 2 de l'IEC 61094-1:2000). La longueur du cylindre doit être grande par rapport au diamètre du microphone. Une longueur au moins égale à vingt fois le diamètre du microphone avec une transition progressivement effilée par rapport à la structure de soutien est recommandée. Cet agencement doit aussi s'appliquer au microphone émetteur.

La définition de l'efficacité en champ libre fait appel à la pression acoustique d'une onde progressive plane non perturbée. Dans le champ lointain d'une source acoustique placée dans des conditions de champ libre se trouvent des ondes sphériques qui, à une distance suffisamment grande de la source, sont assimilables à des ondes planes dans une zone

limitée. Aussi, la distance entre le microphone récepteur et le microphone émetteur doit être suffisamment grande pour garantir cette approximation d'onde plane dans une région suffisante autour du microphone récepteur (voir 7.3). D'un autre côté, l'influence des réflexions sur les surfaces internes d'une chambre anéchoïque croît habituellement à mesure que la distance entre les microphones augmente. De plus, le facteur de diffraction  $\underline{S}(f, \theta)$  dépend de la nature du champ acoustique et ne peut être défini sans ambiguïté que pour une onde plane progressive idéale. Par conséquent, il convient de choisir avec soin les conditions métrologiques et il peut être préférable d'effectuer des étalonnages à plusieurs distances pour estimer l'incertitude d'étalonnage imputable aux variations de ces conditions.

## 6.5 Position du centre acoustique d'un microphone

La position du centre acoustique d'un microphone peut être déterminée à partir des mesures de la pression acoustique produite par le microphone lorsqu'il est utilisé comme source acoustique dans un champ libre, en fonction de la distance  $r$  par rapport à un point de référence du microphone choisi de manière arbitraire. Dans une région limitée du champ lointain, la pression acoustique corrigée des effets de l'atténuation acoustique suit une loi en  $1/r$ ,  $r$  étant compté par rapport au centre acoustique du microphone. Ainsi, lorsqu'est porté sur un graphique l'inverse de la valeur de la pression acoustique mesurée en fonction de la distance par rapport à un point de référence choisi de manière arbitraire (pour plus de commodité, le centre de la membrane), une droite peut être ajustée (par la méthode des moindres carrés, par exemple) parmi les valeurs tracées. L'intersection de cette droite avec l'axe des abscisses détermine la position du centre acoustique du microphone par rapport au point de référence.

Les positions des centres acoustiques servant à déterminer  $d_{12}$  (voir 5.7) doivent correspondre à l'orientation et à la distance séparant les microphones pendant l'étalonnage en champ libre.

L'Annexe A contient des informations sur les valeurs typiques de la position du centre acoustique de microphones étalons de laboratoire.

NOTE Certaines applications spécifiques peuvent exiger de définir le centre acoustique du microphone dans une position fixe (au centre de la membrane du microphone, par exemple). En partant du principe que cela entraîne un module d'efficacité dépendant de la distance entre le microphone et la source, cela peut fournir une référence utile pour la réponse en phase. Même s'il est possible d'utiliser ce centre acoustique fixe dans les calculs, une alternative consiste à déterminer l'efficacité à l'aide du centre acoustique en s'appuyant sur la loi de la distance inverse, puis à corriger la réponse en phase en fonction de la position préférentielle du centre acoustique.

## 6.6 Influence des conditions ambiantes

### 6.6.1 Généralités

L'influence générale de l'efficacité en pression sur les conditions ambiantes est donnée en 6.5 de l'IEC 61094-2:2009. De plus, l'efficacité en champ libre dépend des conditions ambiantes au travers de la relation donnée dans la Formule (4). Dans cette formule, l'impédance de rayonnement est fonction de la densité de l'air et de la célérité du son. De même, le facteur de diffraction  $\underline{S}(f, \theta)$  dépend de la longueur d'onde et donc de la célérité du son dans l'air.

### 6.6.2 Pression statique

Outre la dépendance décrite en 6.5 et à l'Annexe D de l'IEC 61094-2:2009, une dépendance supplémentaire est due à la relation entre l'impédance acoustique du microphone et son impédance de rayonnement causée par la variation de la densité de l'air en fonction de la pression statique. L'influence majeure du terme massique de l'impédance de rayonnement est de réduire légèrement la fréquence de résonance du microphone.

### 6.6.3 Température

Outre la dépendance décrite en 6.5 et à l'Annexe D de l'IEC 61094-2:2009, une dépendance supplémentaire est due à la relation entre l'impédance acoustique du microphone et son

impédance de rayonnement causée par la variation de la densité de l'air et de la célérité du son dans l'air en fonction de la température. De plus, une dépendance est due au facteur de diffraction  $\underline{S}(f,\theta)$  selon la Formule (4) en raison de la variation de la célérité du son dans l'air en fonction de la température. L'IEC TS 61094-7:2006, Article 6 décrit l'influence de la température sur la différence entre l'efficacité en champ libre et l'efficacité en pression qui doit être prise en compte, en plus de son influence sur l'efficacité en pression elle-même.

NOTE L'exposition d'un microphone à des variations de température excessives peut modifier son efficacité de manière définitive.

#### **6.6.4 Humidité**

Conformément à la Formule (4), un léger effet peut être trouvé sur l'efficacité en champ libre en plus de l'influence sur l'efficacité en pression, causée par l'influence de l'humidité sur la densité de l'air et la célérité du son dans l'air.

NOTE Certaines conditions peuvent influencer la stabilité de la tension de polarisation et la charge de la platine arrière et, par conséquent, influencer l'efficacité. Par exemple, la résistance superficielle du matériau isolant entre la platine arrière et le boîtier du microphone peut être dégradée dans des conditions d'humidité excessive, particulièrement si le matériau est contaminé. La résistance superficielle a un effet notable sur l'efficacité du microphone aux basses fréquences, spécialement sur la réponse en phase.

#### **6.6.5 Transposition aux conditions ambiantes de référence**

Pour donner les résultats d'un étalonnage, il convient de ramener l'efficacité en champ libre aux conditions ambiantes de référence si des données de correction fiables sont disponibles. Pour des écarts modérés par rapport aux conditions ambiantes de référence, les corrections utilisées pour l'efficacité en pression peuvent être appliquées selon une incertitude accrue appropriée.

Il convient d'indiquer les conditions ambiantes réelles pendant l'étalonnage.

NOTE Pendant un étalonnage, la température du microphone peut être différente de la température ambiante.

#### **6.7 Considérations concernant l'espace de mesure**

Dans toute la mesure du possible, l'espace d'essai ne doit présenter aucun effet entraînant des instabilités dans le champ acoustique, par exemple entre les mesures de combinaisons de microphone. Ceci inclut les variations des conditions ambiantes, des débits d'air, des gradients thermiques et des perturbations électromagnétiques.

Le niveau de bruit de fond et de vibration doit permettre aux mesures de satisfaire aux exigences signal-bruit du système de mesure utilisé. Dans la pratique, il convient de prendre des mesures pour réduire le plus possible le bruit de fond.

### **7 Composantes d'incertitudes d'un étalonnage**

#### **7.1 Généralités**

Outre les facteurs mentionnés à l'Article 6 ayant un impact sur l'efficacité en pression, d'autres composantes d'incertitude sont introduites par la méthode, l'équipement et le degré de précaution dont l'étalonnage fait l'objet. Les facteurs qui ont un impact connu sur l'étalonnage doivent être mesurés ou calculés avec un niveau d'exactitude aussi élevé que possible, de façon à réduire le plus possible leur influence sur l'incertitude qui en résulte.

#### **7.2 Impédance électrique de transfert**

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer l'impédance électrique de transfert avec l'exactitude nécessaire, aucune préférence n'étant donnée à l'une d'entre elles.

Le courant dans le transmetteur est généralement déterminé en mesurant la tension dans une impédance étalonnée en série avec le microphone émetteur. Pour assurer une détermination correcte du courant, la configuration du blindage mis à la terre ou gardé doit être reliée au microphone émetteur. L'étalonnage de l'impédance en série doit inclure toutes les capacités de câble et autres impédances de charge présentes lors de la mesure de la tension dans l'impédance. Cela permet de déterminer l'impédance électrique de transfert à partir d'une mesure du rapport de tension et de la valeur étalonnée de l'impédance en série.

La tension utilisée pour exciter le microphone émetteur doit être telle que l'incertitude résultant des harmoniques, provenant de cette source ou générées par le microphone, est petite comparée à l'incertitude aléatoire.

Le bruit ou toute autre interférence (la diaphonie, par exemple, qu'elle soit d'origine acoustique ou autre) ne doit pas avoir d'impact inconsidéré sur la détermination de l'efficacité en champ libre.

La présence de diaphonie électrique se traduit par un écart apparent avec la loi en  $1/r$  dont la périodicité est égale à une longueur d'onde.

NOTE 1 Les techniques sélectives en fréquence peuvent être utilisées pour améliorer le rapport signal sur bruit.

NOTE 2 Les techniques de filtrage temporel peuvent être utilisées pour réduire le plus possible l'influence de la diaphonie et des réflexions provenant de l'environnement et des supports mécaniques dans le montage d'étalonnage. Voir l'Annexe D.

NOTE 3 La diaphonie peut être mesurée en plaçant le microphone comme lors d'un étalonnage, mais en remplaçant le microphone récepteur par un microphone fictif présentant la même capacité et la même géométrie externe, puis en déterminant la différence qui en résulte dans l'impédance électrique de transfert. D'autre part, la diaphonie peut être déterminée en réglant la tension de polarisation sur zéro pendant un étalonnage. Dans les deux méthodes, les techniques sélectives en fréquence sont avantageuses.

### 7.3 Ecarts par rapport aux conditions en champ libre idéales

Pendant un étalonnage, certaines exigences acoustiques doivent être satisfaites (voir 6.4). L'étalonnage doit être effectué en champ libre. Cette condition est obtenue le plus généralement dans une chambre anéchoïque, dans laquelle le vent est absent et où le bruit transmis par voie aérienne est réduit au minimum. Des réflexions dépendantes de la fréquence se produisent, provoquant des écarts par rapport à la loi en  $1/r$  pour le module de la pression acoustique à cause des caractéristiques non idéales des matériaux absorbants tapissant les parois et des dimensions finies de la chambre. L'amplitude de ces écarts dépend à la fois de la distance et de la direction par rapport à la source acoustique. A une fréquence donnée, les écarts en fonction de la distance montrent une périodicité entre une demi-longueur d'onde et une longueur d'onde, selon que l'onde réfléchie est parallèle ou perpendiculaire à l'onde directe. En principe, les plus petits écarts sont obtenus dans une région située autour du centre de la chambre et où l'axe principal n'est ni parallèle ni perpendiculaire à aucune des parois de la chambre. Toutefois, la présence d'attaches, de grillage, de câbles, de supports de différentes sortes, d'éclairage, de ventilation, etc. peut provoquer également des perturbations dans le champ acoustique.

L'influence de ces réflexions perturbatrices ne peut être réduite à un niveau acceptable qu'en prenant le maximum de précautions lors de l'élaboration du système et de la procédure d'étalonnage.

L'Annexe D donne des exemples de techniques de filtrage temporel qui peuvent également être utilisées pour réduire l'influence des écarts par rapport aux conditions en champ libre idéales.

De plus, pour assurer une onde approximativement plane dans une zone convenable autour du microphone récepteur, il est recommandé que la distance entre les deux microphones lors de l'étalonnage soit supérieure à dix fois le diamètre nominal des microphones.

#### 7.4 Atténuation du son dans l'air

Dans un environnement réel, les ondes acoustiques se propageant en champ libre sont atténuées par la présence d'effets de relaxation moléculaires et de pertes par effet thermovisqueux.

Cette atténuation dépend de la fréquence de l'onde acoustique, de la quantité de vapeur d'eau et de la température de l'air. Elle est déterminée par la partie réelle  $\alpha$  (affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air) de l'exposant linéique de propagation complexe  $\gamma$  dans la Formule (6).

Les valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air, exprimées en népers par mètre, doivent être calculées à partir des formules données à l'Annexe B.

#### 7.5 Tension de polarisation

Pour déterminer la tension de polarisation, un dispositif peut être utilisé pour la mesurer directement aux bornes du microphone. Cela est important lorsque la tension de polarisation est délivrée par une source d'impédance élevée, compte tenu de la résistance d'isolement finie du microphone. La résistance d'isolement du microphone peut également être mesurée afin de s'assurer qu'elle est suffisamment élevée pour qu'une détermination de la tension de polarisation en l'absence de microphone ou une mesure au niveau de l'accès basse impédance de la source de tension de polarisation soient valables.

#### 7.6 Propriétés physiques de l'air

Certaines grandeurs décrivant les propriétés physiques de l'air sont exigées pour calculer la sensibilité d'un microphone ou sa dépendance aux conditions ambiantes. Ces grandeurs dépendent de conditions ambiantes telles que la pression statique, la température et l'humidité. Les valeurs des grandeurs physiques et leurs variations en fonction des conditions ambiantes sont données à l'Annexe B et dans l'IEC 61094-2:2009, Annexe F.

#### 7.7 Imperfection de la théorie

L'application pratique du théorème de la réciprocité pour le calcul de l'écart de l'impédance de transfert acoustique repose sur certaines hypothèses idéalisées sur les microphones et le mouvement de la membrane du microphone. Exemples pour lesquels ces hypothèses peuvent ne pas être entièrement valides.

- Les imperfections à petite échelle dans les microphones peuvent entraîner différents profils de mouvement de la membrane entre les échantillons individuels d'un modèle de microphone donné, entraînant des variations dans la position du centre acoustique, en particulier à des fréquences élevées.
- Les microphones peuvent ne pas être réciproques. Cet effet peut être réduit le plus possible en combinant uniquement les microphones de même modèle.

#### 7.8 Incertitude sur le niveau d'efficacité en champ libre

Il convient de déterminer l'incertitude sur le niveau d'efficacité en champ libre conformément au Guide ISO/IEC 98-3. Pour donner les résultats d'un étalonnage, l'incertitude, en fonction de la fréquence, doit être indiquée comme étant l'incertitude élargie de mesure à l'aide d'un facteur d'élargissement  $k$  correspondant à une probabilité de confiance de 95 %.

Compte tenu de la complexité de l'expression finale de l'efficacité en champ libre dans la Formule (8), l'incertitude de l'impédance de transfert acoustique est généralement analysée en répétant un calcul tandis que les diverses composantes sont remplacées une par une par leur incertitude associée. La différence par rapport au résultat obtenu par les composantes inchangées est alors utilisée pour déterminer l'incertitude-type relative aux diverses composantes.

Le Tableau 1 répertorie un certain nombre de composantes affectant l'incertitude d'un étalonnage. Toutes les composantes peuvent ne pas être appropriées dans une configuration d'étalonnage donnée car diverses méthodes sont utilisées pour mesurer l'impédance électrique de transfert, pour réduire le plus possible l'influence des réflexions corrélées provenant de l'environnement et pour déterminer les centres acoustiques des microphones.

**Tableau 1 – Composantes d'incertitude**

Grandeur mesurée	N° de paragraphe correspondant
<b>Impédance électrique de transfert</b>	
Impédance en série	7.2
Rapport de tension	7.2
Diaphonie	7.2
Bruit inhérent et ambiant	7.2
Distorsion	7.2
Réflexions des environs	7.2; 7.3
Fréquence	7.2
Blindage récepteur	6.3
Blindage émetteur	6.3; 7.2
<b>Impédance acoustique de transfert</b>	
Distance	6.4; 6.5
Pression statique	6.6.2; 7.6
Température	6.6.3; 7.6
Humidité relative	6.6.4; 7.6
Ondes stationnaires entre les microphones	7.3
Atténuation de l'air	7.4; Annexe B
<b>Paramètres des microphones</b>	
Centres acoustiques	6.5
Tension de polarisation	6.2; 7.5
<b>Imperfection de la théorie</b>	
Ecart par rapport aux ondes planes	6.4; 7.3
<b>Traitement des résultats</b>	
Manipulations mathématiques	
Erreur d'arrondi	
Répétabilité des mesures	
Corrections de la pression statique	6.6; Annexe C
Corrections de la température	6.6; Annexe C

Les composantes d'incertitude figurant au Tableau 1 sont généralement fonction de la fréquence et doivent être dérivées comme incertitude-type. Il convient d'exprimer les composantes d'incertitude sous forme linéaire, mais une forme logarithmique est également acceptable, les valeurs étant en général très faibles et l'incertitude élargie de mesure finale déduite étant quasiment identique.

## Annexe A (informative)

### Valeurs de la position du centre acoustique

Tel qu'il est défini, le centre acoustique dépend de la fréquence, de l'orientation et de la distance entre le point d'observation et le microphone. Pour des points d'observation suffisamment éloignés, la contribution de la position du centre acoustique dans l'incertitude d'étalonnage diminue. A ces distances, le centre de la membrane peut être pris comme centre acoustique. Toutefois, à des distances comprises entre 150 mm et 500 mm, souvent utilisées lors des étalonnages de réciprocité, les valeurs données dans la Bibliographie et présentées à la Figure A.1 peuvent s'appliquer. Les valeurs de la position du centre acoustique se rapportent à l'axe principal et sont comptées par rapport à la surface de la membrane en fonction de la fréquence pour les microphones de type LS1P et LS2aP. Une valeur positive signifie que le centre acoustique est en avant de la membrane. L'incertitude des valeurs dans la Figure A.1 est estimée inférieure à 2 mm en dessous de la fréquence de résonance des microphones. A l'heure actuelle, ces données ne sont pas disponibles pour les autres types de microphones.

NOTE En général, le centre acoustique est différent pour les microphones individuels de même type, en particulier à des fréquences élevées autour ou supérieures à la fréquence de résonance du microphone. En pratique, l'utilisation d'une valeur moyenne ou typique du centre acoustique peut simplifier le calcul de l'efficacité en champ libre. Dans ce cas, une composante d'incertitude supplémentaire associée à la variabilité du centre acoustique doit être ajoutée dans le budget d'incertitude.

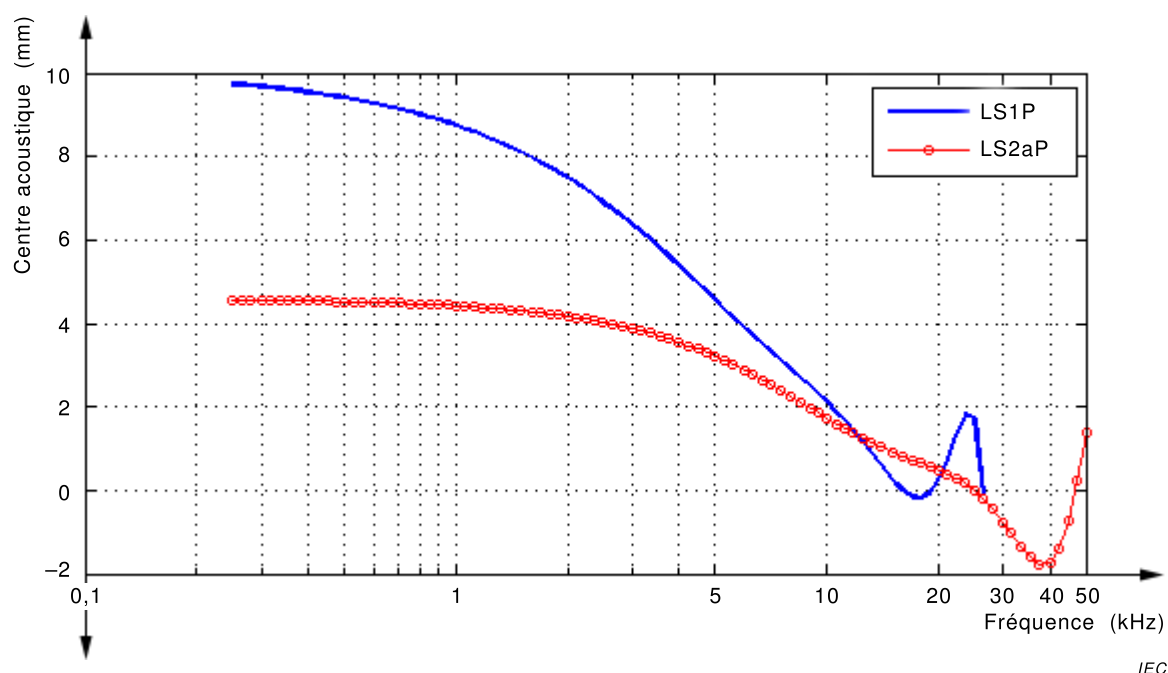


Figure A.1 – Exemple de valeurs estimées des centres acoustiques des microphones LS1P et LS2aP indiquées dans les références bibliographiques pour l'Annexe A

## Annexe B (normative)

### Valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air

#### B.1 Généralités

Certaines grandeurs, décrivant les propriétés de l'air, entrent dans les expressions pour le calcul de l'efficacité en champ libre des microphones (voir la Formule (6) et la Formule (7)). Les méthodes de calcul de la densité et de la célérité du son dans l'air humide (y compris les effets de dispersion) sont décrites dans l'IEC 61094-2. Les méthodes de calcul de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air sont données dans l'ISO 9613-1. Son Annexe A décrit les mécanismes physiques des phénomènes, le paragraphe 5.2 et l'Annexe B donnant les formules permettant de calculer l'affaiblissement linéique en fonction de la fréquence, de la température, de la pression statique et de l'humidité relative. La procédure de calcul en B.2 observe les instructions de l'ISO 9613-1, avec quelques ajustements pour satisfaire aux procédures indiquées dans l'IEC 61094-2.

#### B.2 Procédure de calcul

Les formules indiquées dans cette annexe reposent sur les variables d'environnement mesurées:

- $t$  température, en degrés Celsius (°C);
- $p_s$  pression statique, en pascals (Pa);
- $H$  humidité relative, en pourcentage (%);

Le calcul de l'absorption de l'air tient compte du fait que l'air humide n'est pas un gaz idéal et donc que certaines grandeurs et constantes supplémentaires sont utilisées:

- $T = 273,15 + t$ , température thermodynamique, en kelvin (K);
- $T_{20} = 293,15$  K (20 °C);
- $p_{s,r} = 101\,325$  Pa;
- $c$  célérité du son dans des conditions ambiantes réelles, en mètres par seconde (m/s);
- $p_{sv}(t)$  pression de la vapeur d'eau de saturation, en pascals (Pa);
- $x_w$  fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air;
- $\alpha_{cl}$  absorption classique négligeant l'influence des procédés de relaxation moléculaire;
- $\alpha_{rot}$  absorption causée par les procédés de relaxation moléculaire rotationnelle, en népers par mètre (Np/m);
- $\alpha_{vib,O}$  absorption moléculaire due à la relaxation vibrationnelle de l'oxygène, en népers par mètre (Np/m);
- $\alpha_{vib,N}$  absorption moléculaire due à la relaxation vibrationnelle de l'azote, en népers par mètre (Np/m);
- $f_{rO}$  fréquence de relaxation de l'oxygène, en hertz (Hz);
- $f_{rN}$  fréquence de relaxation de l'azote, en hertz (Hz);
- $\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib,O} + \alpha_{vib,N}$  affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air, en népers par mètre (Np/m).

#### Etape 1

Déterminer la pression de vapeur d'eau de saturation (voir aussi l'IEC 61094-2:2009, F.2):

$$p_{sv}(t) = \exp(1,237\,884\,7 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,912\,131\,6 \cdot 10^{-2} \cdot T + 33,937\,110\,47 - 6,3343\,184\,5 \cdot 10^3 \cdot T^{-1})$$

**Etape 2**

Déterminer la fraction molaire de vapeur d'eau:

$$x_w = \frac{H}{100} \left( \frac{p_{sv}}{p_s} \right) \left( 1,000\,62 + 3,14 \cdot 10^{-8} \cdot p_s + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \right)$$

**Etape 3**

Déterminer les fréquences de relaxation:

$$f_{rO} = \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left[ 24 + 4,04 \cdot 10^6 x_w \left( \frac{0,2 + 10^3 x_w}{3,91 + 10^3 x_w} \right) \right]$$

$$f_{rN} = \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right) \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[ 9 + 28 \cdot 10^3 x_w \exp \left( -4,170 \left( \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \right) \right]$$

**Etape 4**

Déterminer les composantes d'absorption individuelles:

$$\alpha_{cl} + \alpha_{rot} = 18,42 \times 10^{-12} f^2 \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_{vib,O} = 4,3778 f^2 c^{-1} \left( f_{rO} + f^2 / f_{rO} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-2} \exp(-2239,1/T)$$

$$\alpha_{vib,N} = 36,6624 f^2 c^{-1} \left( f_{rN} + f^2 / f_{rN} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-2} \exp(-3352,0/T)$$

**Etape 5**

Calculer l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air  $\alpha$  en népers par mètre (Np/m):

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_{rot} + \alpha_{vib,O} + \alpha_{vib,N} = f^2 \left[ 18,42 \times 10^{-12} \left( \frac{p_s}{p_{s,r}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\ \left. + \left( \frac{T}{T_{20}} \right)^{-2} \left( \frac{4,3778}{c} \frac{\exp(-2239,1/T)}{f_{rO} + (f^2 / f_{rO})} + \frac{36,6624}{c} \frac{\exp(-3352,0/T)}{f_{rN} + (f^2 / f_{rN})} \right) \right]$$

L'exactitude des valeurs calculées de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air est estimée à  $\pm 10\%$  pour des variations des paramètres dans les pages suivantes:

Température de l'air:

-20 °C à 50 °C

Pression statique: moins de 200 kPa  
 Fraction molaire de vapeur d'eau:  $0,5 \times 10^{-3}$  à  $50 \times 10^{-3}$   
 Rapport fréquence/pression: 0,4 Hz/kPa à  $10^4$  Hz/kPa

Le Tableau B.1 donne les valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air calculées, selon l'ISO 9613-1, dans les conditions ambiantes les plus pertinentes pour des étalonnages en champ libre de réciprocité pratiqués dans un laboratoire.

Les valeurs indiquées dans le tableau, exprimées en décibels par mètre, sont égales à  $8,686 \alpha$ .

**Tableau B.1 – Valeurs de l'affaiblissement linéique de propagation du son dans l'air (en dB/m)**

<i>f</i> kHz	<i>t</i> = 21 °C, <i>p<sub>s</sub></i> = 101,325 kPa			<i>t</i> = 23 °C, <i>p<sub>s</sub></i> = 101,325 kPa			<i>t</i> = 25 °C, <i>p<sub>s</sub></i> = 101,325 kPa		
	<i>H</i> =25 %	<i>H</i> =50 %	<i>H</i> =80 %	<i>H</i> =25 %	<i>H</i> =50 %	<i>H</i> =80 %	<i>H</i> =25 %	<i>H</i> =50 %	<i>H</i> =80 %
1,0	0,005 4	0,004 8	0,005 4	0,005 4	0,005 2	0,005 9	0,005 4	0,005 7	0,006 3
1,25	0,007 5	0,005 9	0,006 3	0,007 2	0,006 2	0,006 9	0,007 0	0,006 7	0,007 6
1,6	0,011 1	0,007 5	0,007 7	0,010 4	0,007 8	0,008 3	0,009 9	0,008 2	0,009 1
2,0	0,016 2	0,009 9	0,009 3	0,014 9	0,009 9	0,009 9	0,014 0	0,010 2	0,010 7
2,5	0,024 0	0,013 4	0,011 6	0,022 0	0,013 2	0,012 1	0,020 3	0,013 2	0,012 9
3,15	0,036 5	0,019 2	0,015 3	0,033 2	0,018 4	0,015 5	0,030 4	0,018 0	0,016 1
4,0	0,056 5	0,028 7	0,021 2	0,051 4	0,027 1	0,021 0	0,046 9	0,025 9	0,021 2
5,0	0,084 6	0,042 6	0,029 9	0,077 3	0,039 7	0,029 1	0,070 6	0,037 4	0,028 7
6,3	0,126 7	0,064 9	0,044 1	0,117 0	0,060 1	0,042 1	0,107 6	0,056 1	0,040 7
8,0	0,188 2	0,101 0	0,067 3	0,176 7	0,093 3	0,063 5	0,164 5	0,086 6	0,060 5
10,0	0,264 3	0,152 7	0,101 3	0,253 9	0,141 1	0,094 9	0,240 5	0,130 8	0,089 6
12,5	0,357 8	0,229 2	0,153 5	0,353 7	0,213 1	0,143 4	0,342 9	0,198 0	0,134 7
16,0	0,477 1	0,354 1	0,243 5	0,488 5	0,332 7	0,227 5	0,488 9	0,311 5	0,213 2
20,0	0,592 9	0,513 9	0,368 2	0,626 6	0,490 1	0,345 2	0,646 8	0,464 1	0,324 0
25,0	0,712 3	0,725 6	0,551 4	0,773 7	0,706 1	0,520 7	0,822 4	0,679 4	0,491 0
31,5	0,842 1	1,001 9	0,824 4	0,933 2	0,999 8	0,787 6	1,016 6	0,982 8	0,749 1
40,0	0,994 7	1,344 5	1,219 1	1,113 6	1,379 5	1,184 7	1,232 6	1,391 5	1,141 9
50,0	1,175 8	1,713 5	1,708 3	1,315 7	1,800 7	1,693 0	1,463 6	1,861 2	1,659 4

## Annexe C (informative)

### Influence de l'environnement sur l'efficacité des microphones

#### C.1 Généralités

L'Annexe C donne des informations sur l'influence de la pression statique et de la température sur l'efficacité en champ libre des microphones de type LS1P et LS2P. A l'heure actuelle, les données correspondantes ne sont pas disponibles pour les autres types de microphones LS.

Une description exhaustive de l'influence des conditions ambiantes sur l'efficacité en pression des microphones est donnée à l'Annexe D de l'IEC 61094-2:2009. Outre cette influence, l'impédance de rayonnement et la diffraction autour du microphone dépendent aussi des conditions ambiantes.

Les détails de construction du microphone déterminent l'influence relative des conditions ambiantes. La célérité du son, la masse volumique et la viscosité de l'air sont considérées comme des fonctions linéaires de la température et/ou de la pression statique. Les coefficients de pression statique et de température obtenus sont considérés comme étant déterminés par le rapport de l'efficacité en champ libre dans les conditions de référence sur l'efficacité en champ libre à la pression statique ou la température considérée, respectivement. Ces exemples s'appliquent à l'efficacité en champ libre correspondant à une propagation acoustique le long de l'axe principal vers l'avant de la membrane.

#### C.2 Influence de la pression statique

Des exemples de coefficient de pression statique se rapportant à l'efficacité en pression des microphones sont présentés à la Figure D.1 de l'IEC 61094-2:2009. Une influence supplémentaire due à l'impédance de rayonnement modifie principalement cette figure en réduisant légèrement la fréquence de résonance. Ainsi, en l'absence de connaissances détaillées des coefficients de pression statique pour les efficacités en champ libre, les valeurs correspondantes des efficacités en pression peuvent être utilisées avec une incertitude accrue à des fréquences élevées. En général, le coefficient de pression statique dépend des détails de construction du microphone, les valeurs réelles pouvant différer considérablement pour deux microphones de construction différente, même s'ils peuvent être de même type. En conséquence, il convient de ne pas appliquer les coefficients de pression statique indiqués dans la Figure D.1 de l'IEC 61094-2:2009 aux microphones individuels.

La valeur basse fréquence du coefficient de pression statique se situe généralement entre  $-0,01$  dB/kPa et  $-0,02$  dB/kPa pour les microphones de type LS1P, et entre  $-0,003$  dB/kPa et  $-0,008$  dB/kPa pour les microphones de type LS2P.

#### C.3 Influence de la température

Des exemples de coefficient de température se rapportant à l'efficacité en pression des microphones sont présentés à la Figure D.2 de l'IEC 61094-2:2009. Pour l'efficacité en champ libre, les variations de température influencent l'efficacité en champ libre de deux manières: par l'intermédiaire de l'impédance de rayonnement supplémentaire, et par celle du facteur de diffraction  $\underline{S}(f,\theta)$  (voir la Formule (4)).

L'influence sur l'efficacité en champ libre provenant de l'impédance de rayonnement observe la même procédure qu'indiqué en C.2 ci-dessus, à savoir les coefficients de température valides pour les efficacités en pression peuvent être appliqués avec une incertitude accrue à des fréquences élevées.

L'influence de la température sur la célérité du son, c'est-à-dire sur la longueur d'onde, a également un impact sur le facteur de diffraction  $\underline{S}(f,\theta)$  (voir la Formule (4)). Cet effet dépend de l'angle d'incidence acoustique et peut prendre des valeurs importantes aux fréquences élevées pour certains angles où l'efficacité est minimale. Pour l'incidence normale du son, l'IEC TS 61094-7 décrit les différences de niveau d'efficacité en champ libre et en pression pour les microphones de type LS1P et de type LS2P et leur dépendance à la température.

La valeur basse fréquence du coefficient de température se situe généralement entre  $-0,005$  dB/K et  $+0,005$  dB/K pour les microphones de type LS1P et de type LS2P.

## **Annexe D** (informative)

### **Application de techniques de filtrage temporel pour l'élimination des réflexions et interférences acoustiques indésirables entre les microphones**

#### **D.1 Généralités**

L'application pratique de la méthode de réciprocité en champ libre peut rencontrer un certain nombre de problèmes qui ont un effet dégradant sur l'exactitude de l'efficacité en champ libre déterminée à partir de ces mesures. Ces perturbations incluent la diaphonie électrique, les réflexions des éléments mécaniques utilisés pour tenir les microphones en place et des parois, et les interférences acoustiques entre les microphones. Ces perturbations peuvent être totalement ou partiellement éliminées en filtrant le domaine temporel (techniques de filtrage temporel ou techniques de fenêtrage temporel).

Les principes de base du filtrage dans le domaine temporel appropriés pour cette partie de l'IEC 61094 sont décrits dans l'IEC 61094-8:2012, B.1, B.2 et B.3.

#### **D.2 Considérations pratiques**

##### **D.2.1 Rapport signal sur bruit**

Il est courant, en raison du rapport signal sur bruit (SNR) très faible pendant la mesure de l'impédance électrique de transfert, que des signaux purement sinusoïdaux soient utilisés pour exciter le microphone émetteur. De forts signaux d'entrée peuvent introduire des artefacts harmoniques qui affectent le niveau de la composante de la fréquence fondamentale, et qu'il convient donc d'éviter. Il est possible d'améliorer le rapport signal/bruit en appliquant un filtrage à bande étroite au moyen de filtres matériels, d'un moyennage spectral ou d'un moyennage synchrone dans le domaine temporel.

Le rapport signal sur bruit dépend de la fréquence. A des fréquences faibles et très élevées, l'efficacité des microphones en tant qu'émetteurs acoustiques est très faible, le rapport signal sur bruit obtenu étant faible. Cela exige des temps d'intégration longs et peu pratique pour obtenir une bande passante de filtrage suffisamment étroite. Des rapports signal sur bruit acceptables sont généralement obtenus dans la plage de fréquences comprise 0,1 fois et 3 fois la fréquence de résonance des microphones.

Cela présente une limitation de la plage de fréquences dans laquelle l'exactitude des mesures de l'impédance électrique de transfert est acceptable, quel que soit le type de signal utilisé.

##### **D.2.2 Réflexions des parois et de l'équipement de mesure**

Le moment où les réflexions des parois et autres éléments mécaniques de l'équipement de mesure atteignent les microphones aide à définir de quelle longueur il convient que la réponse impulsionnelle totale soit pour séparer entièrement les réflexions précoces et tardives de la réponse impulsionnelle directe. Outre les considérations de conception pratiques qui définissent la position des éléments potentiellement réfléchissants dans le montage de mesure, le choix du matériau absorbant utilisé dans les salles de mesure a une influence sur la sélection des paramètres de mesure.

Une convolution circulaire peut se produire lorsque la fonction de transfert est mesurée dans le domaine fréquentiel, puis transformée dans le domaine temporel. Par conséquent, en cas de réponses impulsionnelles de longueur insuffisante ou, inversement, si l'écart entre les fréquences n'est pas assez faible, les réflexions secondaires ou tertiaires en retard sont écartées au niveau du microphone récepteur, lesquelles se replient alors sur la réponse

impulsionnelle obtenue et affectent très probablement les résultats finaux. Ceci est particulièrement critique dans les petites salles. Le problème peut être réduit le plus possible

- en réduisant le pas fréquentiel, et en augmentant ainsi la longueur de la réponse impulsionnelle (ceci améliore également l'échantillonnage des réflexions et autres perturbations), et
- en recouvrant les parois de la salle de mesure d'un matériau absorbant qui réduit d'au moins 30 dB l'amplitude de l'onde incidente.

La convolution circulaire ne se produit pas en cas de balayages fournissant un "zero-padding" suffisant. Toutefois, il est important de s'assurer que la réponse impulsionnelle est suffisamment longue pour inclure toutes les réflexions.

### **D.3 Limitations en fréquence**

#### **D.3.1 Généralités**

Des balayages en signaux sinusoïdaux peuvent être utilisés pour mesurer la réponse en fréquence dans une plage de fréquences limitée qui peut inclure les basses fréquences, et jusqu'à une limite de fréquence indiquée par l'instrument utilisé. Les mesures basées sur des sons purs ou des signaux à large bande, comme le bruit pseudo-aléatoire, peuvent également démarrer à basses fréquences et jusqu'à une limite de fréquence élevée dictée par l'instrument. En raison des limitations signal sur bruit abordées en D.2.1, les difficultés pratiques liées à l'intégration de mesures basses fréquences peuvent l'emporter sur les avantages.

De plus, la nature de chaque méthode de mesure exige de traiter différemment les limitations à basses fréquences.

#### **D.3.2 Mesures basées sur les balayages en fréquence**

Les signaux de balayage peuvent être conçus pour avoir une teneur en fréquences confinée dans une bande de fréquences limitée. Le traitement des signaux entraînant la détermination de la réponse impulsionnelle repose sur la déconvolution de la réponse mesurée avec le filtre inverse, la conception du signal pouvant bénéficier des considérations suivantes.

- Le filtre inverse amplifie ces composantes de fréquence en dehors de la plage de fréquences concernée. Ceci peut potentiellement masquer la réponse impulsionnelle récupérée si le rapport signal sur bruit (SNR) en dehors des fréquences concernées n'est pas suffisamment élevé pour contrecarrer l'amplification fournie par le filtre inverse.
- Toute discontinuité dans le signal d'excitation entraîne des artefacts sous forme de bruit impulsif. Ceci est particulièrement important lors de la conception du début et de la fin du signal d'excitation. Réduire le début et la fin du signal d'excitation avec une fenêtre temporelle peut éviter ce genre de problème.
- Si la sélectivité temps-fréquence représentée par les signaux de balayage doit être entièrement exploitée, en particulier pour l'analyse de distorsion, il est important d'appliquer le processus de déconvolution comme convolution linéaire. Pour effectuer ceci dans le domaine fréquentiel au moyen des algorithmes de transformée de Fourier discrète (DFT) ou de transformée de Fourier rapide (FFT), des zéros doivent être ajoutés à la fin des signaux temporels (cette procédure est souvent appelée "zero-padding") de manière à ce qu'il n'y ait pas d'effet d'enveloppement lors de l'exécution de la convolution.

#### **D.3.3 Mesures basées sur les sons purs**

Lorsque la réponse en fréquence est mesurée avec des sons purs, les points de début et de fin de la plage de fréquences mesurée peuvent être choisis de manière arbitraire. En raison de la présence de diaphonie, de bruit de fond et de faibles capacités d'émission des microphones, il est impossible (ou trop chronophage) d'effectuer des mesures à des

fréquences inférieures à un huitième de la fréquence de résonance pour les microphones LS1 et LS2.

Il convient de sélectionner la fréquence de mesure la plus élevée de manière à obtenir une représentation plus réaliste de la réponse impulsionnelle directe entre les microphones. Ceci a généralement lieu lorsque la fréquence la plus élevée mesurée est supérieure à 2 à 3 fois la fréquence de résonance des microphones.

## D.4 Génération des portions manquantes de la réponse en fréquence avant la transformation en domaine temporel.

### D.4.1 Généralités

Pour transformer le domaine fréquentiel en domaine temporel et obtenir une représentation de la réponse impulsionnelle sans artefact, l'impédance de transfert à des fréquences comprises entre  $-\infty$  et  $+\infty$  (ou entre 0 et  $+\infty$  lorsqu'une réponse en fréquence positive est utilisée) doit être mesurée. Cela ne peut pas être effectué en pratique, et une mesure sera réalisée dans des limites de fréquence bien définies,  $(f_{\min}, f_{\max})$ , comme indiqué ci-dessus. Une représentation moins précise mais encore fiable peut être obtenue à l'aide de deux procédures: remplissage des plages de fréquences manquantes avec les valeurs de réponse en fréquence déterminées de manière théorique et application d'un filtre de fréquences passe-bas ou d'un filtre de fréquences passe-bande avant la transformation vers le domaine temporel.

En principe, la réponse en fréquence mesurée peut être représentée comme la multiplication de la réponse en fréquence infinie et un filtre de fréquence passe-bande rectangulaire. Toutefois, il n'est pas recommandé d'utiliser cette approche, car un tel filtre comporte des lobes latéraux faiblement atténués qui peuvent contaminer la réponse impulsionnelle avec des composantes parasites.

### D.4.2 Fréquences manquantes au-dessous de la fréquence de mesure minimale

L'impédance électrique de transfert entre  $f = 0$  et  $f = f_{\min}$  peut être générée à l'aide d'une expression obtenue à partir de la réorganisation de la Formule (7):

$$\frac{U_2}{i_1} = j \frac{\rho f}{2d_{12}} M_{f,1} M_{f,2} e^{-jkd_{12}} e^{-\alpha d_{m12}} \quad (\text{D.1})$$

A basses fréquences jusqu'à environ un quart de la fréquence de résonance, l'efficacité en champ libre peut être calculée avec la Formule (4). A ces fréquences, la charge de l'impédance de rayonnement peut être négligée, et l'efficacité en champ libre peut être calculée à partir du produit de l'efficacité en pression et du facteur de diffraction. De plus, à ces fréquences, l'absorption de l'air peut également être négligée dans la Formule (D.1).

L'efficacité en pression peut être déterminée de manière expérimentale à partir des mesures de l'excitateur électrostatique ou de l'étalonnage par réciprocité. Toutefois, il est essentiel de noter que, dans un étalonnage en champ libre, le tube d'équilibrage des pressions du microphone est exposé au champ acoustique. L'efficacité en pression peut également être déterminée de manière analytique à partir de modèles de paramètres localisés.

Le facteur de diffraction peut être déterminé soit de manière numérique par la méthode des éléments de frontière, la méthode des éléments finis ou par toute autre formulation intégrale, soit de manière expérimentale à partir des mesures dans un grand tube à onde stationnaire.

NOTE Pour éviter toute discontinuité importante entre les impédances de transfert calculées et mesurées, une transition en douceur peut être obtenue en définissant une plage de fréquences de chevauchement dans laquelle la réponse en fréquence est calculée sous forme de moyenne glissante progressive.

#### **D.4.3 Fréquences manquantes au-dessus de la fréquence de mesure maximale**

En pratique, les données haute fréquence ne peuvent pas être déterminées à partir de la Formule (D.1) en raison des nombreuses complexités liées au comportement du microphone: résonances dans la cavité arrière, pertes visqueuses, etc. Une approche simplifiée peut consister à considérer le microphone comme un système à un seul degré de liberté, dont l'efficacité chute de 12 dB par octave au-dessus de sa fréquence de résonance. Une approche simple et pratique consiste à extrapoler la réponse en fréquence complexe à l'aide des quelques derniers points de mesure dans lesquels la réponse en fréquence mesurée diminue doucement.

#### **D.4.4 Filtrage de la réponse en fréquence étendue**

Une mesure supplémentaire pour accélérer l'affaiblissement de la réponse en fréquence à des fréquences élevées consiste à appliquer un filtre de fréquences passe-bas. Il convient qu'un filtre passe-bas conçu à cet effet comporte des lobes secondaires fortement atténués (au moins 80 dB), une ondulation minimale (0,01 dB maximum) et une phase linéaire. Il est également recommandé que la fréquence de coupure du filtre soit dans la plage de fréquences extrapolée.

NOTE Un filtre passe-bande aux propriétés similaires à celles du filtre passe-bas peut également être utilisé.

## Bibliographie

S'applique à l'Annexe A:

WAGNER, R.P., and NEDZELNITSKY, V. Determination of acoustic center correction values for type LS2aP microphones at normal incidence, *J. Acoust. Soc. Am.* **104**, 1998, 192-203

BARRERA-FIGUEROA, S., RASMUSSEN, K., and JACOBSEN, F. The acoustic center of laboratory standard microphones, *J. Acoust. Soc. Am.* **120**, 2006, 2668-2675

RODRIGUES, D., DUROCHER, J.-N., BRUNEAU, M., and BRUNEAU A.-M., A new method for the determination of the acoustic center of acoustic transducers, *Acta Acustica united with Acustica* **96**, 2010, 300-305

S'applique à l'Annexe D:

Une bibliographie générale relative aux méthodes de filtrage temporel appliquées à l'étalonnage du microphone est présentée dans l'IEC 61094-8. La bibliographie ci-dessous complète ces ouvrages de référence liés à l'application de techniques de filtrage temporel à l'étalonnage de réciprocité en champ libre.

IEC 61094-8:2012, *Microphones de mesure – Partie 8: Méthodes pour la détermination de l'efficacité en champ libre par comparaison des microphones étalons de travail*

LAMBERT, J.-M., and DUROCHER, J.-N., *Analyse des perturbations acoustiques lors de l'étalonnage en champ libre des microphones étalons à condensateurs dits d'un pouce par la technique de la réciprocité*, Laboratoire National d'Essais, 1989

VORLÄNDER, M., and BIETZ, H. Novel broad band reciprocity technique for simultaneous free-field and diffuse-field microphone calibration, *Acustica* **80**, 1994, 365-377

BARRERA-FIGUEROA, S., RASMUSSEN, K., and JACOBSEN, F. A time-selective technique for free-field reciprocity calibration of condenser microphones, *J. Acoust. Soc. Am.* **114**, 2003, 1467-1476

KWON, H.S., SUH, S.J., and SUH, J.G. Frequency Windowing Technique for Reducing Multi-Path Noise in Free-Field Reciprocity Microphone Calibration Method, *Key Engineering Materials* **321-323**, 2006, 1245-1248

---





INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

3, rue de Varembé  
PO Box 131  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11  
Fax: + 41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)