

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2009 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00



IEC 61094-2

Edition 2.0 2009-02

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 17.140.50

ISBN 2-8318-1030-4

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
4 Reference environmental conditions	7
5 Principles of pressure 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	7
5.2 Basic expressions	8
5.3 Insert voltage technique	9
5.4 Evaluation of the acoustic transfer impedance	9
5.5 Heat-conduction correction.....	11
5.6 Capillary tube correction.....	11
5.7 Final expressions for the pressure sensitivity	12
5.7.1 Method using three microphones	12
5.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source	12
6 Factors influencing the pressure sensitivity of microphones.....	13
6.1 General.....	13
6.2 Polarizing voltage.....	13
6.3 Ground-shield reference configuration.....	13
6.4 Pressure distribution over the diaphragm	13
6.5 Dependence on environmental conditions	14
6.5.1 Static pressure	14
6.5.2 Temperature.....	14
6.5.3 Humidity	14
6.5.4 Transformation to reference environmental conditions	15
7 Calibration uncertainty components.....	15
7.1 General.....	15
7.2 Electrical transfer impedance	15
7.3 Acoustic transfer impedance	15
7.3.1 General	15
7.3.2 Coupler properties	15
7.3.3 Microphone parameters	16
7.4 Imperfection of theory.....	17
7.5 Uncertainty on pressure sensitivity level.....	18
Annex A (normative) Heat conduction and viscous losses in a closed cavity	20
Annex B (normative) Acoustic impedance of a capillary tube.....	23
Annex C (informative) Examples of cylindrical couplers for calibration of microphones	26
Annex D (informative) Environmental influence on the sensitivity of microphones	31
Annex E (informative) Methods for determining microphone parameters	34
Annex F (informative) Physical properties of humid air.....	37

Figure 1 – Equivalent circuit for evaluating the acoustic transfer impedance $Z_{a,12}$	9
Figure 2 – Equivalent circuit for evaluating $Z'_{a,12}$ when coupler dimensions are small compared with wavelength.....	10
Figure 3 – Equivalent circuit for evaluating $Z'_{a,12}$ when plane wave transmission in the coupler can be assumed.....	10
Figure C.1 – Mechanical configuration of plane-wave couplers.....	27
Figure C.2 – Mechanical configuration of large-volume couplers.....	29
Figure D.1 – Examples of static pressure coefficient of LS1P and LS2P microphones relative to the low-frequency value as a function of relative frequency f/f_0	32
Figure D.2 – General frequency dependence of that part of the temperature coefficient for LS1P and LS2P microphones caused by the variation in the impedance of the enclosed air.....	33
Table 1 – Uncertainty components.....	19
Table A.1 – Values for E_V	21
Table B.1 – Real part of $Z_{a,C}$ in gigapascal-seconds per cubic metre (GPa·s/m ³).....	24
Table B.2 – Imaginary part of $Z_{a,C}$ in gigapascal-seconds per cubic metre (GPa·s/m ³).....	25
Table C.1 – Nominal dimensions for plane-wave couplers.....	28
Table C.2 – Nominal dimensions and tolerances for large-volume couplers.....	29
Table C.3 – Experimentally determined wave-motion corrections for the air-filled large-volume coupler used with type LS1P microphones.....	30
Table F.1 – Calculated values of the quantities in Clauses F.1 to F.5 for two sets of environmental conditions.....	40
Table F.2 – Coefficients used in the equations for humid air properties.....	41

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTROACOUSTICS –
MEASUREMENT MICROPHONES –****Part 2: Primary method for pressure 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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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 61094-2 has been prepared by IEC technical committee 29: Electroacoustics.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1992. This second edition constitutes a technical revision.

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

- an update of Clause 6 to fulfil the requirements of ISO/IEC Guide 98-3;
- an improvement of the heat conduction theory in Annex A;
- a revision of Annex F: Physical properties of humid air.

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

FDIS	Report on voting
29/671/FDIS	29/676/RVD

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 of 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 maintenance result date indicated on the IEC web site 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.

ELECTROACOUSTICS – MEASUREMENT MICROPHONES –

Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique

1 Scope

This part of International Standard IEC 61094

- is applicable to laboratory standard microphones meeting the requirements of IEC 61094-1 and other types of condenser microphone having the same mechanical dimensions;
- specifies a primary method of determining the complex pressure sensitivity so as to establish a reproducible and accurate basis for the measurement of sound pressure.

All quantities are expressed in SI units.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. 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*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*¹

3 Terms and definitions

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

3.1

reciprocal microphone

linear passive microphone for which the open circuit reverse and forward transfer impedances are equal in magnitude

3.2

phase angle of pressure sensitivity of a microphone

for a given frequency, the phase angle between the open-circuit voltage and a uniform sound pressure acting on the diaphragm

NOTE Phase angle is expressed in degrees or radians (° or rad).

¹ ISO/IEC Guide 98-3:2008 is published as a reissue of the Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), 1995.

3.3

electrical transfer impedance

for a system of two acoustically coupled microphones the quotient of the open-circuit voltage of the microphone used as a receiver by the input current through the electrical terminals of the microphone used as a transmitter

NOTE 1 Electrical transfer impedance is expressed in ohms (Ω).

NOTE 2 This impedance is defined for the ground-shield configuration given in 7.2 of IEC 61094-1:2000.

3.4

acoustic transfer impedance

for a system of two acoustically coupled microphones the quotient of the sound pressure acting on the diaphragm of the microphone used as a receiver by the short-circuit volume velocity produced by the microphone used as a transmitter

NOTE Acoustic transfer impedance is expressed in pascal-seconds per cubic metre ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$).

3.5

coupler

device which, when fitted with microphones, forms a cavity of predetermined shape and dimensions acting as an acoustic coupling element between the microphones

4 Reference environmental conditions

The reference environmental conditions are:

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

5 Principles of pressure 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, of which one shall be reciprocal.

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

5.1.2 General principles using three microphones

Let two of the microphones be connected acoustically by a coupler. 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 pressure sensitivities of the two coupled microphones can be determined. Using pair-wise combinations of three microphones marked (1), (2) and (3), three such mutually independent products are available, from which an expression for the pressure 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 connected acoustically by a coupler, and the product of the pressure sensitivities of the two microphones be determined (see 5.1.2). Next, let the two microphones be presented to the same sound pressure, set up by the auxiliary sound source. The ratio of the two output voltages will then equal the ratio of the two pressure sensitivities.

Thus, from the product and the ratio of the pressure sensitivities of the two microphones, an expression for the pressure sensitivity of each of the two microphones can be derived.

NOTE In order to obtain the ratio of pressure sensitivities, a direct comparison method may be used, and the auxiliary sound source may be a third microphone having mechanical or acoustical characteristics which differ from those of the microphones being calibrated.

5.2 Basic expressions

Laboratory standard microphones and similar microphones are considered reciprocal and thus the two-port equations 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, uniformly applied, at the acoustical terminals (diaphragm) 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 ³ /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 (Ω);
$\underline{z}_{22} = \underline{Z}_a$	is the acoustic impedance of the microphone when the electrical terminals are unloaded in pascal-seconds per cubic metre (Pa·s·m ⁻³),
$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{M}_p \underline{Z}_a$	is equal to the reverse and forward transfer impedances in volt-seconds per cubic metre (V·s·m ⁻³), \underline{M}_p being the pressure sensitivity of the microphone in volts per pascal (V·Pa ⁻¹).

NOTE Underlined symbols represent complex quantities.

Equations (1) may then be rewritten as:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{U} \\ \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{p} \end{aligned} \quad (1a)$$

which constitute the equations of reciprocity for the microphone.

Let microphones (1) and (2) with the pressure sensitivities $\underline{M}_{p,1}$ and $\underline{M}_{p,2}$ be connected acoustically by a coupler. From Equations (1a) it is seen that a current \underline{i}_1 through the electrical terminals of microphone (1) will produce a short-circuit volume velocity ($\underline{p} = 0$ at the diaphragm) of $\underline{M}_{p,1} \underline{i}_1$ and thus a sound pressure $\underline{p}_2 = \underline{Z}_{a,12} \underline{M}_{p,1} \underline{i}_1$ at the acoustical terminals of microphone (2), where $\underline{Z}_{a,12}$ is the acoustic transfer impedance of the system.

The open-circuit voltage of microphone (2) will then be:

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{p,2} \cdot \underline{p}_2 = \underline{M}_{p,1} \underline{M}_{p,2} \underline{Z}_{a,12} \underline{i}_1$$

Thus the product of the pressure sensitivities is given by:

$$\frac{M_{p,1}}{Z_{a,1}} \frac{M_{p,2}}{Z_{a,2}} = \frac{1}{Z_{a,12}} \frac{U_2}{i_1} \quad (2)$$

5.3 Insert voltage technique

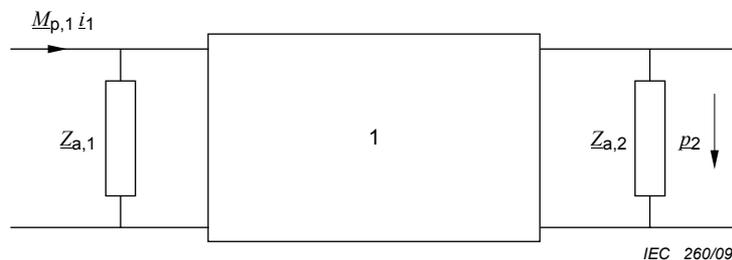
The insert voltage technique is used to determine the open-circuit voltage of a microphone when it is electrically loaded.

Let a microphone having a certain open-circuit voltage and internal impedance be connected to a 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 Evaluation of the acoustic transfer impedance

The acoustic transfer impedance $Z_{a,12} = \frac{p_2}{M_{p,1} i_1}$ can be evaluated from the equivalent circuit in Figure 1, where $Z_{a,1}$ and $Z_{a,2}$ are the acoustic impedances of microphones (1) and (2) respectively.



Key

1 Coupler

Figure 1 – Equivalent circuit for evaluating the acoustic transfer impedance $Z_{a,12}$

In several cases, $Z_{a,12}$ can be evaluated theoretically. Assume the sound pressure to be the same at any point inside the coupler (this will take place when the physical dimensions of the coupler are very small compared to the wavelength). The gas in the coupler then behaves as a pure compliance and, from the equivalent circuit in Figure 2, $Z_{a,12}$ is given by $Z_{a,12}$ (assuming adiabatic compression and expansion of the gas):

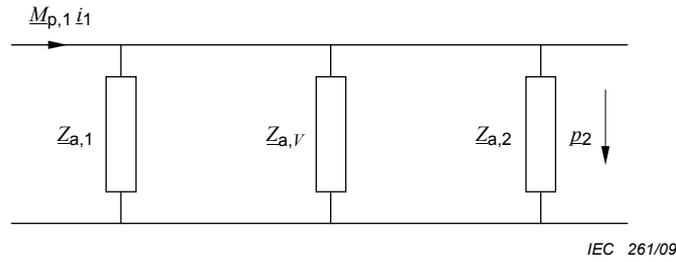


Figure 2 – Equivalent circuit for evaluating $Z'_{a,12}$ when coupler dimensions are small compared with wavelength

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,V}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}} = j\omega \left(\frac{V}{\kappa p_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_r p_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_r p_{s,r}} \right) \quad (3)$$

where

- V is the total geometrical volume of the coupler in cubic metres (m³);
- $V_{e,1}$ is the equivalent volume of microphone (1) in cubic metres (m³);
- $V_{e,2}$ is the equivalent volume of microphone (2) in cubic metres (m³);
- $Z_{a,V} = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$ is the acoustic impedance of the gas enclosed in the coupler in pascal-seconds per cubic metre (Pa·s/m³);
- ω is the angular frequency in radians per second (rad/s);
- p_s is the static pressure in pascals (Pa);
- $p_{s,r}$ is the static pressure at reference conditions in pascals (Pa);
- κ is the ratio of the specific heat capacities at measurement conditions;
- κ_r is κ at reference conditions.

Values for κ and κ_r in humid air can be derived from equations given in Annex F.

At higher frequencies, when the dimensions are not sufficiently small compared with the wavelength, the evaluation of $Z_{a,12}$ generally becomes complicated. However, if the shape of the coupler is cylindrical and the diameter the same as that of the microphone diaphragms, then, at frequencies where plane-wave transmission can be assumed, the whole system can be considered as a homogeneous transmission line (see Figure 3).

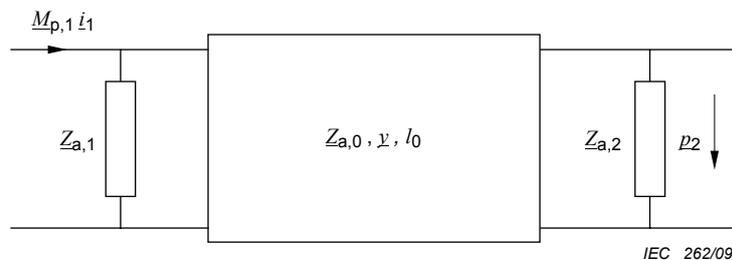


Figure 3 – Equivalent circuit for evaluating $Z'_{a,12}$ when plane wave transmission in the coupler can be assumed

$Z_{a,12}$ is then given by $Z'_{a,12}$ (assuming adiabatic compression and expansion of the gas):

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,0}} \left[\left(\frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \cosh \gamma l_0 + \left(1 + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \sinh \gamma l_0 \right] \quad (4)$$

where

$Z_{a,0}$ is the acoustic impedance of plane waves in the coupler. If losses in the coupler are neglected, then $Z_{a,0} = \rho c / S_0$;

ρ is the density of the gas enclosed in kilograms per cubic metre ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

c is the free-space speed of sound in the gas in metres per second ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

S_0 is the cross-sectional area of the coupler in square metres (m^2);

l_0 is the length of the coupler, i.e. the distance between the two diaphragms in metres (m);

$\gamma = \alpha + j\beta$ is the complex propagation coefficient in metres to power minus one (m^{-1}).

Values for ρ and c in humid air can be derived from equations given in Annex F.

The real part of γ accounts for the viscous losses and heat conduction at the cylindrical surface and the imaginary part is the angular wave number.

If losses are neglected, γ may be approximated by putting α equal to zero and β equal to ω/c in Equation (4).

Allowance shall be made for any air volume associated with the microphones that is not enclosed by the circumference of the coupler and the two diaphragms (see 7.3.3.1).

5.5 Heat-conduction correction

The evaluation of $Z'_{a,12}$ in the preceding subclause assumes adiabatic conditions in the coupler. However, in practice, the influence of heat conduction at the walls of the coupler causes departure from purely adiabatic conditions, especially for small couplers and low frequencies.

At low frequencies, where the sound pressure can be considered the same at any point and under the assumption that the walls remain at a constant temperature, the influence of the heat conduction losses can be calculated and expressed in terms of a complex correction factor Δ_H to the geometrical volume V in Equation (3). Expressions for the correction factor Δ_H are given in Annex A.

At high frequencies, wave-motion will be present inside the coupler and the sound pressure will no longer be the same at all points. For right-cylindrical couplers where the transmission line theory can be applied (see 5.4), the combined effect of heat conduction and viscous losses along the cylindrical surface can be accounted for by the complex propagation coefficient and acoustic impedance for plane-wave propagation in the coupler. The additional heat conduction at the end surfaces of the coupler, the microphone diaphragms, can be accounted for by including further components in the acoustic impedances of the microphones. Expressions for the complex propagation coefficient and acoustic impedance for plane-wave propagation are given in Annex A.

5.6 Capillary tube correction

The coupler is usually fitted with capillary tubes in order to equalize the static pressure inside and outside the coupler. Two such capillary tubes also permit the introduction of a gas other than air.

The acoustic input impedance of an open capillary tube is given by:

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t} \tanh \gamma l_C \quad (5)$$

where

$\underline{Z}_{a,t}$ is the complex acoustic wave impedance of an infinite tube in pascal-seconds per cubic metre (Pa·s·m⁻³);

l_C is the length of the tube in metres (m).

The shunting effect of the capillary tubes can be taken into account by introducing a complex correction factor $\underline{\Delta}_C$ to the acoustic transfer impedances given in Equations (3) and (4):

$$\underline{\Delta}_C = 1 + n \frac{\underline{Z}_{a,12}''}{\underline{Z}_{a,C}} \quad (6)$$

where

n is the number of identical capillary tubes used;

$\underline{Z}_{a,12}''$ is the acoustic transfer impedance $\underline{Z}_{a,12}'$ corrected for heat conduction according to 5.5.

An expression for the acoustic input impedance $\underline{Z}_{a,C}$ of an open capillary tube is given in Annex B.

5.7 Final expressions for the pressure sensitivity

5.7.1 Method using three microphones

Let the electrical transfer impedance \underline{U}_2/i_1 (see 5.2) be denoted by $\underline{Z}_{e,12}$ with similar expressions for other pairs of microphones.

Taking into account the corrections given in 5.5 and 5.6, the final expression for the modulus of the pressure sensitivity of microphone (1) is:

$$\left| \underline{M}_{p,1} \right| = \left\{ \left| \frac{\underline{Z}_{e,12} \underline{Z}_{e,31}}{\underline{Z}_{e,23}} \right| \left| \frac{\underline{Z}_{a,23}''}{\underline{Z}_{a,12}'' \underline{Z}_{a,31}''} \right| \left| \frac{\underline{\Delta}_{C,12} \underline{\Delta}_{C,31}}{\underline{\Delta}_{C,23}} \right| \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Similar expressions apply for microphones (2) and (3).

The phase angle of the pressure sensitivity for each microphone is determined by a similar procedure from the phase angle of each term in the above expression.

NOTE When complex quantities are expressed in terms of modulus and phase, the phase information should be referred to the full four-quadrant phase range, i.e. 0 - 2π rad or 0 - 360°.

5.7.2 Method using two microphones and an auxiliary sound source

If only two microphones and an auxiliary sound source are used, the final expression for the modulus of the pressure sensitivity is:

$$\left| \underline{M}_{p,1} \right| = \left| \frac{\underline{M}_{p,1}}{\underline{M}_{p,2}} \frac{\underline{Z}_{e,12}}{\underline{Z}_{a,12}''} \underline{\Delta}_C \right|^{1/2} \quad (8)$$

where the ratio of the two pressure sensitivities is measured by comparison against the auxiliary source, see 5.1.3.

6 Factors influencing the pressure sensitivity of microphones

6.1 General

The pressure sensitivity of a condenser microphone depends on polarizing voltage and environmental conditions.

The basic mode of operation of a polarized condenser 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 charging 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.

Further, the definition of the pressure 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 condenser 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 Ground-shield reference configuration

According to 3.3 of IEC 61094-1:2000, the open-circuit voltage shall be measured at the electrical terminals of the microphone when it is attached to a specified ground-shield configuration using the insert voltage technique described in 5.3 above. Specifications for ground-shield configurations for laboratory standard microphones are given in IEC 61094-1:2000.

The appropriate ground-shield configuration shall apply to both transmitter and receiver microphones during the calibration, and the shield should be connected to ground potential.

If any other arrangement is used, the results of a calibration shall be referred to the reference ground-shield 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.

6.4 Pressure distribution over the diaphragm

The definition of the pressure sensitivity assumes that the sound pressure over the diaphragm is applied uniformly. The output voltage of a microphone presented with a non-uniform pressure distribution over the surface of the diaphragm will differ from the output voltage of the microphone when presented with a uniform pressure distribution having the same mean value, because usually the microphone is more sensitive to a sound pressure at the centre of the diaphragm. This difference will vary for microphones with various different non-uniformities of tension distribution on the diaphragm.

For cylindrical couplers, as described in Annex C, both longitudinal and radial wave motions (symmetric as well as asymmetric) will be present. The radial wave motion will result in a

non-uniform pressure distribution over the diaphragm. It will be generated when the source differs from a true piston source covering the whole end surface of the coupler or when the combined microphone/coupler geometry is not a perfect right angle cylinder. In addition asymmetric radial wave motion is also generated by the transmitter microphone by imperfections in the backplate/diaphragm geometry or in the diaphragm tension and homogeneity.

It is recommended that the sound pressure distribution during a calibration should be uniform to better than $\pm 0,1$ dB over the surface of the diaphragm. However, it is difficult to control this condition in an actual calibration set-up due to the geometrical imperfection of real microphones and couplers. Although radial wave motion can never be avoided because the velocity distribution of the transmitter microphone differs from that of a true piston, couplers having the same diameter as that of the microphone diaphragm will exhibit the smallest amount of radial wave motion and be less sensitive to geometrical imperfections than couplers with larger diameters.

However, when a calibration at high frequencies with a high accuracy is necessary, it may be preferable to use more than one coupler with different dimensions to assess the true sensitivity of the microphones and to apply a theoretically based correction for the radial wave-motion effects.

6.5 Dependence on environmental conditions

6.5.1 Static pressure

The acoustic resistance and mass of the gas between the diaphragm and backplate, the compliance of the cavity behind the diaphragm and thus the pressure sensitivity of the microphone, depend on the static pressure. This dependence is a function of frequency. It can be determined for a microphone under test by making reciprocity calibrations at different static pressures.

Annex D contains information on the influence of static pressure on the pressure sensitivity of laboratory standard condenser microphones.

6.5.2 Temperature

The acoustic resistance and mass of the gas between diaphragm and backplate and thus the pressure sensitivity of the microphone, depend on the temperature. In addition the mechanical dimensions of the microphone depend on the temperature and the sensitivity of the microphone depends on the mechanical tension in the diaphragm and on the spacing between diaphragm and backplate. The total effect of these dependencies is a function of frequency. The combined dependence can be determined for a microphone under test by making reciprocity calibrations at different temperatures.

Annex D contains information on the influence of temperature on the pressure sensitivity of laboratory standard condenser microphones.

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

6.5.3 Humidity

Although the thermodynamic state of the air enclosed in the cavity behind the diaphragm of the microphone depends slightly on humidity, an influence on the sensitivity has not been observed for laboratory standard microphones, provided condensation does not take place.

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 may deteriorate under excessively humid conditions, particularly if the material is contaminated (see also 7.3.3.3). The surface resistance has a noticeable effect on the sensitivity of the microphone at low frequencies, especially on the phase response.

6.5.4 Transformation to reference environmental conditions

When reporting the results of a calibration, the pressure sensitivity should be referred to the reference environmental conditions if reliable correction data are available.

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.

7 Calibration uncertainty components

7.1 General

In addition to the factors mentioned in Clause 6 which affect the pressure 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 ground shield reference configuration, see 6.3, 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 by a voltage ratio and the calibrated series impedance.

The voltage used to excite the transmitter microphone shall be such that the effect of harmonics, from this source or generated by the microphone, on the uncertainty in the determination of the pressure sensitivity 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 pressure sensitivity.

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

NOTE 2 Cross-talk can be measured by substituting the receiver microphone with 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. The coupler and microphones should be positioned as during a calibration. Alternatively, cross-talk can be determined by setting the polarizing voltage to zero volts during a calibration. In both methods, frequency selective techniques are recommended.

7.3 Acoustic transfer impedance

7.3.1 General

Several factors influence the acoustic transfer impedance but the major source of uncertainty in its determination is often the microphone parameters, especially for small couplers.

7.3.2 Coupler properties

7.3.2.1 Coupler dimensions

The shape and dimensions of the coupler cavity shall be chosen in such a way that 6.4 is satisfied. As long as the greatest dimension of the coupler is small compared to the wavelength of sound in the gas, the sound pressure will be substantially uniform in the

coupler and independent of the shape. At high frequencies and for large couplers, this requirement may be met by filling the cavity with helium or hydrogen.

The uncertainty on coupler dimensions affects the acoustic transfer impedance by different amounts that vary with frequency. It also influences the heat conduction and capillary tube corrections.

Examples of couplers are given in Annex C.

NOTE 1 Cylindrical couplers used in a frequency range where the dimensions are not small compared to the wavelength should be manufactured with the utmost care so that asymmetric sound fields are not excited.

NOTE 2 The influence on a microphone of an asymmetric sound pressure distribution in the coupler may be ascertained by changing the relative position of the coupler and microphones, for instance by incrementally rotating each microphone about its axis. If such a change affects the electrical transfer impedance, this effect should be taken into account when estimating the uncertainty.

NOTE 3 If the coupler is filled with a gas other than air, care should be taken to avoid leakage of the gas to the cavity behind the diaphragm of the microphone, by sealing the contacting surface with a thin layer of grease. If diffusion of the gas into the back cavity takes place, through the diaphragm or by other means, the microphone cannot be calibrated in this way as the microphone sensitivity is altered unpredictably.

7.3.2.2 Heat conduction and viscous losses

The correction for heat conduction and viscous losses shall be calculated from the equations given in Annex A for cylindrical couplers within the range of dimensions as described in Annex C. In the calculations the total coupler volume is understood as the sum of the geometrical volume of the coupler and the front cavity volumes of the coupled microphones. Similarly the total surface area is understood as the sum of the surface area of the coupler and the surface areas of the front cavities of the coupled microphones.

7.3.2.3 Capillary tube

If capillary tubes are used, the acoustic impedance shall be calculated from the equations given in Annex B. Long, narrow capillary tubes are recommended in order to minimize the effect of uncertainty on the dimensions of the tubes. The correction factor for capillary tubes is calculated from Equation (6) in 5.6.

7.3.2.4 Physical quantities

The acoustic transfer impedance depends on certain physical quantities describing the properties of the gas enclosed in the coupler. These quantities depend on environmental conditions such as static pressure, temperature and humidity. Values of the quantities and their dependence on environmental conditions are described in Annex F for humid air.

The resulting uncertainty on the quantities is a combination of the uncertainty on the equations in Annex F and the uncertainty on the measurement of the environmental conditions.

7.3.3 Microphone parameters

7.3.3.1 Front cavity

A laboratory standard microphone has a recessed cavity in front of the diaphragm.

In Equation (3), the volume of the front cavity forms a part of the total geometrical volume V of the coupler. In Equation (4), the depths of the front cavities similarly influence the length l_0 of the coupler. Because of production tolerances the volume and depth of the front cavity shall be determined individually for each microphone under test when calibrated in plane-wave couplers (see Annex E).

It will usually be found that the measured volume of the front cavity is different from the volume calculated from the cross-sectional area S_0 of the coupler and the cavity depth. This is because the diameter of the front cavity may differ slightly from the diameter of the coupler, the cavity may have a screw thread turned on its inner wall, which makes the cavity diameter somewhat ill-defined, and there may be an additional annular air space linked to the cavity around the edge of the microphone diaphragm. The excess volume of the cavity, defined as the difference between the actual front volume and the volume calculated from the cross-sectional area S_0 of the coupler and the front cavity depth, shall be considered an additional terminating impedance when using Equation (4). This may be done by setting $Z_{a,1}$ and $Z_{a,2}$ to be the impedance of the parallel connection of the microphone impedance and the impedance due to the excess volume.

NOTE 1 This excess volume can in some instances be negative.

NOTE 2 For front cavities with an inner thread, the larger surface of the thread results in increased heat conduction that affects the acoustic transfer impedance. If this effect is neglected when calculating the acoustic transfer impedance, the corresponding uncertainty component should be increased accordingly.

7.3.3.2 Acoustic impedance

The acoustic impedance of the microphone is a function of frequency and is determined mainly by the properties of the stretched diaphragm and the air enclosed in the cavity behind the diaphragm, and by the geometry of the backplate. To a first approximation the acoustic impedance can be expressed in terms of equivalent series-connected compliance, mass and resistance. This network can alternatively be described by compliance, resonance frequency and loss factor. Compliance is often given in terms of the low frequency value of the real part of the equivalent volume of the microphone (see 6.2.2 of IEC 61094-1:2000).

At very low frequencies, heat conduction in the cavity behind the diaphragm results in an increase of the equivalent volume of the microphone which for type LS1 microphones will be up to 5 %.

The acoustic impedance Z_a of each microphone forms an important part of the acoustic transfer impedance $Z_{a,12}$ of the system and errors in the determination of Z_a influence the accuracy of the calibration in a complicated way, particularly at high frequencies.

Methods for determining the acoustic impedance are described in Annex E.

NOTE The accuracy to which the microphone parameters need to be measured in order to obtain a certain overall accuracy is related to the coupler used and the frequency.

7.3.3.3 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.

7.4 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, the sound field in the couplers, the movement of the microphone diaphragm and the geometry of the couplers when closed with the microphones. Examples where these assumptions may not be fully valid are:

- Small scale imperfections in the transmitter microphone may lead to asymmetric wave-motion which cannot be accounted for;

- Microphones may not be reciprocal. The effect of this can be minimized by combining only microphones of the same model;
- Radial wave-motion corrections, if applied, are based on idealized movements of the microphone diaphragms or on empirical data;
- The excess volume of the microphone front cavity, see 7.3.3.1, may not be dealt with correctly;
- A lumped parameter representation of the microphone acoustic impedance is only an approximation to the true impedance;
- Viscous losses along the coupler surface have been estimated by an approximate theory. In addition, the effect of viscous losses arising from an inner thread in the front cavity and surface roughness are not accounted for. This will affect the acoustic transfer impedance at high frequencies.

7.5 Uncertainty on pressure sensitivity level

The uncertainty on the pressure sensitivity level should be determined in accordance with ISO/IEC Guide 98-3. When reporting the results of a calibration the uncertainty, as function of frequency, shall be stated as the *expanded uncertainty of measurement* using a *coverage factor of $k = 2$* .

Due to the complexity of the final expression for the pressure sensitivity in Equation (7) 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 to 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 determining the microphone parameters and for coupling the microphones.

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 very small and the derived final expanded uncertainty of measurement would be essentially the same.

Table 1 – Uncertainty components

Measured quantity	Relevant subclause no.
Electrical transfer impedance	
Series impedance	7.2
Voltage ratio	7.2
Cross-talk	7.2
Inherent and ambient noise	7.2
Distortion	7.2
Frequency	7.2
Receiver ground shield	6.3
Transmitter ground shield	6.3; 7.2
Coupler properties	
Coupler length	7.3.2.1
Coupler diameter	7.3.2.1
Coupler volume	7.3.2.1; 7.3.2.2
Coupler surface area	7.3.2.1; 7.3.2.2
Unintentional coupler/microphone leakage	
Capillary tube dimensions	7.3.2.3
Static pressure	7.3.2.4
Temperature	7.3.2.4
Relative humidity	7.3.2.4
Microphone parameters	
Front cavity depth	7.3.3.1
Front cavity volume	7.3.3.1
Equivalent volume	7.3.3.2
Resonance frequency	7.3.3.2
Loss factor	7.3.3.2
Diaphragm compliance	7.3.3.2
Diaphragm mass	7.3.3.2
Diaphragm resistance	7.3.3.2
Additional heat conduction caused by front cavity thread	7.3.3.1
Polarizing voltage	6.5.3; 7.3.3.3
Imperfection of theory	
Heat conduction theory	Annex A
Adding of excess volume	7.3.3.1; 7.4
Viscosity losses	7.4
Radial wave-motion	6.4; 7.3.2.1, 7.4
Processing of results	
Rounding error	
Repeatability of measurements	
Static pressure corrections	6.5; Annex D
Temperature corrections	6.5; Annex D

Annex A (normative)

Heat conduction and viscous losses in a closed cavity

A.1 General

In a closed coupler heat conduction between the air and the walls results in a gradual transition from adiabatic to isothermal conditions. The exact nature of this transition depends upon the frequency of the calibration and the dimensions of the coupler. In addition any sound particle velocity along the coupler surfaces will result in viscous losses. The resulting sound pressure generated by the transmitter microphone, i.e. a constant volume displacement source, will change accordingly. Two approaches for determining the resulting sound pressure are given:

- A low frequency solution based on heat conduction only and applicable to large-volume couplers and plane-wave couplers in the frequency range where wave-motion can be neglected.
- A broad-band solution applicable to plane-wave couplers only, including both heat conduction and viscous losses.

Plane-wave and large-volume couplers are described in Annex C.

A.2 Low frequency solution

At low frequencies, where the sound pressure can be assumed to be the same at all points in the coupler, the effect of heat conduction can be considered as an apparent increase in the coupler volume expressed by a complex correction factor $\underline{\Delta}_H$ to the geometrical volume V in Equation (3).

The correction factor is given by:

$$\underline{\Delta}_H = \frac{\kappa}{1 + (\kappa - 1)\underline{E}_V} \quad (\text{A.1})$$

where \underline{E}_V is the complex temperature transfer function defined as the ratio of the space average of the sinusoidal temperature variation associated with the sound pressure to the sinusoidal temperature variation that would be generated if the walls of the coupler were perfectly non-conducting. Tabulated values for \underline{E}_V are found in [A.1]² as a function of parameters R and X , where:

R is the length to diameter ratio of the coupler;

$$X = f\ell^2 / (\kappa\alpha_t);$$

f is the frequency in hertz (Hz);

ℓ is the volume to surface ratio of the coupler in metres (m);

α_t is the thermal diffusivity of the enclosed gas in square metres per second ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

Tabulated values of \underline{E}_V for some values of R and X are given in Table A.1. The figures given are considered accurate to 0,000 01.

² Figures in square brackets refer to Clause A.4.

For finite cylindrical couplers within the range of dimensions as described in Annex C, the approximation described below on the complex quantity \underline{E}_V results in errors less than 0,01 dB at frequencies above 20 Hz.

$$\underline{E}_V = 1 - \underline{S} + D_1 \underline{S}^2 + (3/4)\sqrt{\pi} D_2 \underline{S}^3 \quad (\text{A.2})$$

where

$$\underline{S} = \left[-j \frac{1}{2\pi X} \right]^{1/2} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi X}}$$

$$D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi(2R+1)^2}$$

$$D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi}(2R+1)^3}$$

The modulus of \underline{E}_V , as calculated from Equation (A.2), is accurate to 0,01 % within the range $0,125 < R < 8$ and for $X > 5$.

Table A.1 – Values for \underline{E}_V

Real part of \underline{E}_V			X	Imaginary part of \underline{E}_V		
$R = 0,2$	$R = 0,5$	$R = 1$		$R = 0,2$	$R = 0,5$	$R = 1$
0,721 27	0,719 96	0,720 03	1,0	0,240 38	0,223 23	0,221 46
0,800 92	0,801 22	0,801 28	2,0	0,177 22	0,169 86	0,168 85
0,837 27	0,837 51	0,837 54	3,0	0,148 18	0,143 04	0,142 36
0,859 07	0,859 20	0,859 22	4,0	0,130 03	0,126 14	0,125 63
0,873 93	0,874 02	0,874 03	5,0	0,117 32	0,114 21	0,113 80
0,893 43	0,893 48	0,893 49	7,0	0,100 30	0,098 07	0,097 77
0,910 82	0,910 86	0,910 86	10,0	0,084 77	0,083 21	0,083 00
0,936 93	0,936 94	0,936 94	20,0	0,060 86	0,060 07	0,059 97
0,948 50	0,948 51	0,948 51	30,0	0,050 02	0,049 50	0,049 42
0,955 40	0,955 41	0,955 41	40,0	0,043 49	0,043 10	0,043 04
0,963 58	0,963 59	0,963 59	60,0	0,035 68	0,035 41	0,035 38
0,968 46	0,968 46	0,968 46	80,0	0,030 98	0,030 78	0,030 76
0,971 79	0,971 79	0,971 79	100,0	0,027 76	0,027 61	0,027 58
0,980 05	0,980 05	0,980 05	200,0	0,019 72	0,019 64	0,019 63
0,985 90	0,985 90	0,985 90	400,0	0,013 99	0,013 95	0,013 95
0,990 03	0,990 03	0,990 03	800,0	0,009 92	0,009 90	0,009 89

The first two terms in Equation (A.2) constitute an approximation that may be used for couplers that are not right circular cylinders.

When calibrations are performed at frequencies below 20 Hz using the couplers described in Annex C, the full frequency domain solution given in [A.1] shall be used, or the corresponding uncertainty component shall be increased accordingly.

A.3 Broad-band solution

At high frequencies, where viscous losses are present in addition to the thermal losses, the effect of viscosity is to reduce the effective cross-sectional area of the coupler due to the boundary layer next to the surface and at the same time to increase the effective length of the coupler due to the reduced speed of sound. At low frequencies and for the couplers described in Annex C, the two effects compensate each other while the effect of heat conduction remains. The combined effect of heat conduction and viscous losses for sound propagation in cylindrical tubes has been derived in [A.2] based on Kirchhoff's theory.

The complex expressions for the propagation coefficient and the acoustic impedance of the coupler to be used in Equation (4) are:

$$\underline{\gamma} = j \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{1-j}{\sqrt{2}} \frac{1}{a} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega \rho}} + (\kappa-1) \sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}} \right) \right) \quad (\text{A.3})$$

$$\underline{Z}_{a,0} = \frac{\rho c}{S_0} \left(1 + \frac{1-j}{\sqrt{2}} \frac{1}{a} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega \rho}} - (\kappa-1) \sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}} \right) \right) \quad (\text{A.4})$$

where

η is the viscosity of the gas in pascal-seconds (Pa·s);

a is the radius of the coupler in metres (m).

Values for c , η , ρ and α_t in humid air can be derived from equations given in Annex F.

In addition to the above losses at the cylindrical surface, heat conduction losses occur at the end surfaces. These losses can be dealt with by an admittance $1/\underline{Z}_{a,h}$ added to each microphone admittance in Equation (4), see [A.3].

$$\frac{1}{\underline{Z}_{a,h}} = \frac{S_0}{\rho c} \frac{1+j}{\sqrt{2}} (\kappa-1) \frac{1}{c} \sqrt{\alpha_t \omega} \quad (\text{A.5})$$

If a microphone has an inner thread in the front cavity the additional heat conduction caused by the thread surface can be accounted for by adding the increased surface area of the thread to the cross-sectional area S_0 in Equation (A.5), see [A.4].

Equations (A.3) – (A.4) are valid for the frequency range given by $\omega \rho a^2 > 100 \eta$. This corresponds to frequencies higher than 3 Hz and 12 Hz for plane-wave couplers as given in Table C.1 for type LS1P and LS2aP microphones respectively.

A.4 Reference documents

- [A.1] GERBER, H. *Acoustic properties of fluid-filled chambers at infrasonic frequencies in the absence of convection*, Journal of Acoustical Society of America 36, 1964, pp. 1427-1434
- [A.2] ZWIKKER, C. and KOSTEN, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter II, § 4
- [A.3] MORSE, P.M. and INGARD, K.U. *Theoretical Acoustics*, 1968. McGraw-Hill, New York. Chapters 6.4 and 9.2
- [A.4] FREDERIKSEN, E. *Reduction of Heat Conduction Error in Microphone Pressure Reciprocity Calibration*. Brüel & Kjær Technical Review, 1, 2001. pp14-23

Annex B (normative)

Acoustic impedance of a capillary tube

B.1 General

The acoustic input impedance $\underline{Z}_{a,C}$ of an open capillary tube is determined by means of the transmission line theory, see 5.6:

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t} \tanh \underline{\gamma} l_C \quad (\text{B.1})$$

The relationship between $\underline{Z}_{a,t}$ and $\underline{\gamma}$ is given by (see [B.1]³):

$$\underline{\gamma} \underline{Z}_{a,t} = j \frac{\omega \rho}{\pi a_t^2} \left[1 - \frac{2 J_1(\underline{k} a_t)}{\underline{k} a_t J_0(\underline{k} a_t)} \right]^{-1} \quad (\text{B.2})$$

and

$$\frac{\underline{\gamma}}{\underline{Z}_{a,t}} = j \omega \frac{\pi a_t^2}{\rho c^2} \left[1 + \frac{2}{B \underline{k} a_t} (\kappa - 1) \frac{J_1(B \underline{k} a_t)}{J_0(B \underline{k} a_t)} \right] \quad (\text{B.3})$$

where

- $J_0(\)$, $J_1(\)$ are the cylindrical Bessel functions of first kind, zero and first order respectively of complex argument;
- a_t is the radius of the tube in metres (m);
- $\underline{k} = (-j\omega\rho/\eta)^{1/2}$ is the complex wavenumber in metres to the power minus one (m^{-1}),
 $B = (\eta/\rho\alpha_t)^{1/2}$;
- η is the viscosity of the gas in pascal-seconds (Pa·s);
- ρ is the density of the gas in kilogram per cubic metres ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);
- α_t is the thermal diffusivity of the gas in square metres per second ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

The equations above shall be used to calculate the correction factor $\underline{\Delta}_C$ given in Equation (6).

Values for c , η , ρ and α_t in humid air can be derived from equations given in Annex F.

Alternatively, the capillary tube may be blocked along its full length by a suitable wire after assembling the coupler and microphones. In this case the correction factor $\underline{\Delta}_C$ equals 1.

The expressions given above are derived for an ideal circular tube and are sensitive to the fourth power of the radius of the tube. In practice, however, the inner sections of capillary tubes are not circular and a flow calibration of the tube may be necessary to determine the effective radius.

Tabulated values of the real and imaginary parts of $\underline{Z}_{a,C}$ at reference environmental conditions are given in Tables B.1 and B.2 for a typical range of parameters and frequency. The tables are intended to be used when testing a calculation program based upon Equations B.1 to B.3.

³ Figures in square brackets refer to Clause B.2.

In an actual calibration the equations given above should be used and the actual values of temperature, static pressure and relative humidity be applied.

Table B.1 – Real part of $Z_{a,C}$ in gigapascal-seconds per cubic metre (GPa·s/m³)

Tube dimensions in mm						
$l_c = 50$			Frequency Hz	$l_c = 100$		
$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$		$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$
3,015	1,454	0,596	20	6,034	2,911	1,193
3,016	1,455	0,596	25	6,037	2,913	1,194
3,017	1,455	0,596	31,5	6,043	2,917	1,196
3,019	1,456	0,597	40	6,052	2,923	1,199
3,021	1,458	0,598	50	6,066	2,931	1,203
3,026	1,460	0,599	63	6,088	2,946	1,210
3,033	1,464	0,601	80	6,124	2,970	1,222
3,043	1,470	0,604	100	6,178	3,006	1,240
3,060	1,480	0,609	125	6,264	3,063	1,270
3,090	1,496	0,618	160	6,416	3,168	1,323
3,134	1,521	0,632	200	6,638	3,326	1,406
3,204	1,561	0,653	250	6,985	3,589	1,547
3,322	1,628	0,688	315	7,540	4,061	1,815
3,531	1,747	0,749	400	8,355	4,940	2,378
3,868	1,940	0,848	500	9,074	6,287	3,532
4,501	2,310	1,033	630	8,677	7,339	5,629
5,805	3,109	1,433	800	6,378	5,313	4,380
8,331	4,884	2,374	1 000	4,354	3,006	1,928
12,122	9,001	5,376	1 250	3,546	2,127	1,147
9,201	7,936	6,752	1 600	4,171	2,408	1,195
4,332	3,027	1,956	2 000	6,325	4,404	2,523
2,698	1,638	0,894	2 500	4,986	3,723	2,774
2,808	1,579	0,783	3 150	4,412	2,660	1,392
5,917	3,529	1,745	4 000	5,245	4,024	3,079
5,959	4,838	3,917	5 000	5,058	3,258	1,767
3,307	1,940	1,012	6 300	4,580	2,921	1,673
6,581	5,380	4,133	8 000	4,696	3,034	1,751
4,180	2,461	1,257	10 000	4,977	3,360	1,949
3,909	2,545	1,546	12 500	4,765	3,335	2,277
4,047	2,594	1,540	16 000	4,757	3,267	2,142
4,531	2,809	1,516	20 000	4,847	3,322	2,021

NOTE The values given in this table are valid at reference environmental conditions only (see Clause 4 and Table F.2).

Table B.2 – Imaginary part of $Z_{a,c}$ in gigapascal-seconds per cubic metre (GPa·s/m³)

Tube dimensions in mm

$l_c = 50$			Frequency Hz	$l_c = 100$		
$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$		$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$
0,097	0,074	0,049	20	0,096	0,114	0,090
0,122	0,092	0,061	25	0,120	0,143	0,112
0,154	0,116	0,077	31,5	0,152	0,180	0,141
0,195	0,147	0,098	40	0,192	0,228	0,180
0,244	0,184	0,123	50	0,240	0,285	0,225
0,307	0,232	0,155	63	0,300	0,359	0,283
0,390	0,295	0,197	80	0,378	0,456	0,361
0,488	0,369	0,246	100	0,467	0,570	0,452
0,611	0,462	0,308	125	0,573	0,711	0,567
0,783	0,592	0,396	160	0,705	0,907	0,731
0,981	0,743	0,496	200	0,829	1,125	0,923
1,230	0,933	0,623	250	0,923	1,383	1,170
1,557	1,186	0,792	315	0,896	1,668	1,502
1,993	1,527	1,021	400	0,488	1,848	1,923
2,513	1,948	1,306	500	-0,676	1,418	2,203
3,192	2,533	1,711	630	-2,737	-0,771	0,932
3,992	3,354	2,325	800	-3,89	-3,149	-2,506
4,287	4,216	3,186	1 000	-3,030	-2,594	-2,129
1,347	3,171	3,733	1 250	-1,381	-1,156	-0,944
-5,328	-4,376	-3,270	1 600	0,430	0,455	0,280
-4,500	-3,769	-2,958	2 000	0,265	0,975	1,222
-1,998	-1,665	-1,281	2 500	-1,700	-1,549	-1,341
0,489	0,241	0,049	3 150	0,204	0,197	0,051
2,431	2,282	1,690	4 000	-1,070	-0,858	-0,516
-2,799	-2,427	-1,945	5 000	0,209	0,437	0,403
0,181	-0,041	-0,193	6 300	-0,071	-0,098	-0,222
-1,231	-0,589	0,227	8 000	-0,041	-0,029	-0,141
0,867	0,637	0,331	10 000	-0,053	0,152	0,209
-0,548	-0,705	-0,769	12 500	-0,281	-0,294	-0,276
-0,217	-0,406	-0,538	16 000	-0,175	-0,187	-0,226
0,426	0,341	0,134	20 000	-0,107	0,000	0,032

NOTE The values given in this table are valid at reference environmental conditions only (see Clause 4 and Table F.2).

B.2 Reference document

[B.1] ZWIKKER, C. and KOSTEN, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter II, § 2-3

Annex C (informative)

Examples of cylindrical couplers for calibration of microphones

C.1 General

The coupler used in a reciprocity calibration should produce a uniform sound pressure distribution over the diaphragm of the transmitter and receiver microphones. It is particularly important that the pressure distribution over the diaphragm of the receiver microphone be as uniform as possible in order to be consistent with the definition of pressure sensitivity, see 3.4 of IEC 61094-1:2000. Due to radial wave-motion and asymmetry of diaphragm motion, this ideal condition can only be approximated. In order to extend the frequency range over which the coupler can be used (but only as regards the radial wave-motion), it is advantageous for the radial resonance frequency to be as high as possible, which calls for a coupler of small diameter. For practical reasons, the diameter of the coupler should be not less than the diameter of the diaphragms.

For a given coupler, however, it is possible to raise the resonance frequencies by introducing hydrogen or helium into the coupler instead of air (see 7.3.2). Theoretically it should then be possible to extend the upper usable frequency of the coupler by a factor equal to the ratio of the speed of sound in hydrogen (or helium) and air. It should, however, be noted that the wave velocity in the diaphragm of the microphones is almost independent of the gas in the coupler and thus not increased by the same factor as the speed of sound in the enclosed gas.

An important quantity in reciprocity calibration using a closed coupler is the acoustic transfer impedance $Z_{a,12}$ of the total system (see 5.2 and 5.4) which shall be known with a high accuracy. At frequencies where the acoustic wavelength is great compared to the dimensions of the coupler, the sound pressure distribution is uniform in the whole coupler and $Z_{a,12} = Z'_{a,12}$ is determined by the effective volume of the coupler, i.e. the geometrical volume of the coupler including the front cavity volumes and the equivalent volumes of the microphones (see Equation (3)). At frequencies where the acoustic wavelength cannot be considered great compared to the dimensions of the coupler, wave motion will exist and it is difficult to obtain a theoretical expression for the transfer impedance unless the coupler has a very simple form. Equation (4) expresses the transfer impedance $Z'_{a,12}$ of a cylindrical coupler with a diameter equal to the diameter of the diaphragms of the microphones assuming only plane waves in the coupler.

Methods for calculating the transfer impedance in other cases have been developed. In such cases, however, the wave motion correction should also be determined empirically.

Two groups of couplers are used in practice. Plane-wave couplers, where the diameter of the coupler is equal to the diameter of the diaphragms and large-volume couplers, where the coupler volume is very large compared to the microphone front volumes and equivalent volumes.

C.2 Plane-wave couplers

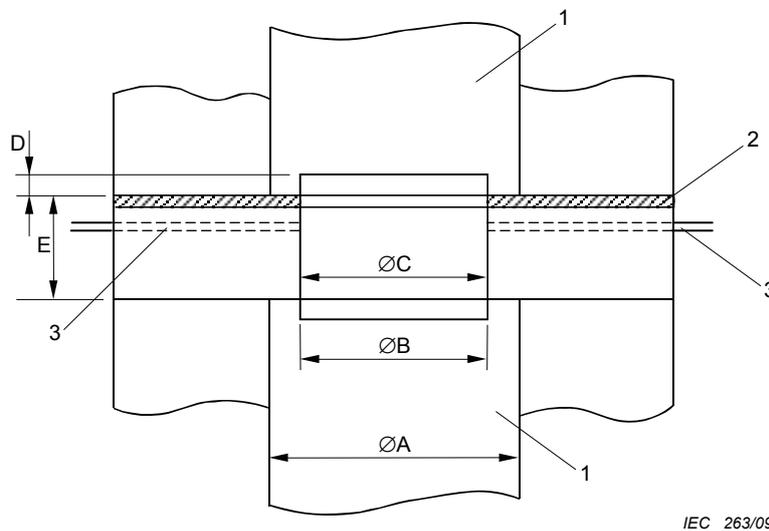
Plane-wave couplers have cavity diameters equal to the diameters of the microphone front cavities. The length of the coupler, i.e. the distance between the two diaphragms, should be long enough to ensure plane-wave transmission but not longer than a quarter of a wavelength. Coupler cavities having length to diameter ratios within the range of 0,5 to 0,75 are recommended. Such couplers will permit calibration of laboratory standard microphones of type LS1P up to about 10 kHz and type LS2P up to about 20 kHz when filled with air.

Analytical expressions can be derived for the influence of symmetric radial wave-motion for such couplers, under the assumption that the displacement function of the microphone diaphragms corresponds to idealized membrane vibrations. [C.2 - C.4]⁴

Asymmetrical radial wave-motion will usually be present in the couplers. The lowest mode of these asymmetric modes occurs in plane wave couplers around 10,6 kHz and 21,2 kHz for types LS1 and LS2 microphones respectively.

Equation (4) should be used to calculate $Z'_{a,12}$ and it is necessary to determine all the factors influencing $Z_{a,12}$ (see 7.3), in particular the acoustic impedance of the microphones, with a high accuracy.

Recommended dimensions for plane-wave couplers are given in Table C.1 and Figure C.1.



Key

- 1 Microphone
- 2 Insulator
- 3 Capillary tubes

Figure C.1 – Mechanical configuration of plane-wave couplers

⁴ Figures in square brackets refer to Clause C.4.

Table C.1 – Nominal dimensions for plane-wave couplers

Dimensions in mm

Dimensions	Laboratory standard microphones			
	Symbol	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
°A		23,77	13,2	12,15
°B		18,6	9,3	9,8
°C		18,6	9,3	9,8
D		1,95	0,5	0,7
E		3,5 – 9,5	3 – 7	3,5 – 6

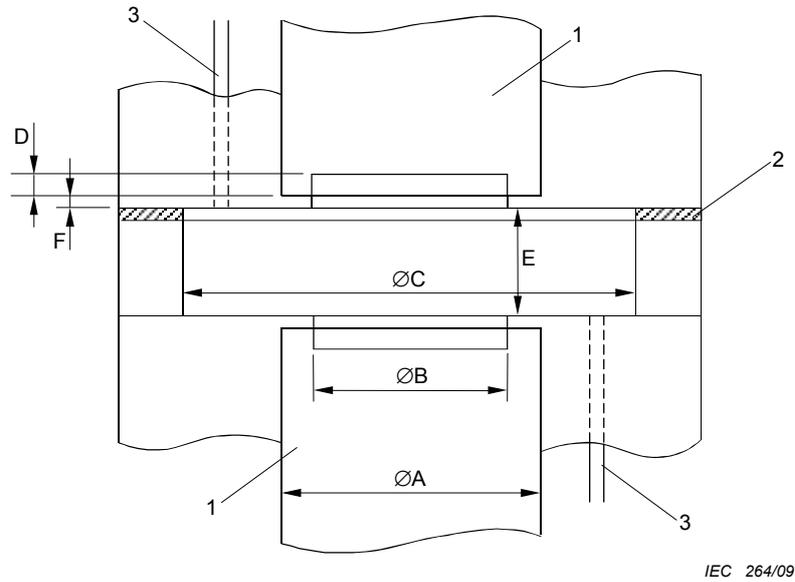
C.3 Large-volume couplers

Large-volume couplers have a larger volume than plane-wave couplers and the dimensions are so selected that the pressure decrease on the diaphragm due to the radial modes is partly cancelled by the pressure increase due to the longitudinal mode. The optimal length to diameter ratio is about 0,3 and depends upon the depth of the front cavities of the microphones.

Such couplers will permit the calibration of type LS1P up to about 2,5 kHz and of type LS2P microphones up to about 5 kHz when filled with air when using an empirically determined wave-motion correction. When a high accuracy is necessary, it is recommended to determine the wave-motion correction for the individual coupler used, since the mode pattern in the coupler is very sensitive to dimensions.

Equation (3) should be used to calculate $Z'_{a,12}$ and it is only necessary to determine the sum of the front cavity volume and the equivalent volume of the microphones.

Recommended dimensions for large-volume couplers are given in Table C.2 and Figure C.2.



Key

- 1 Microphone
- 2 Insulator
- 3 Capillary tubes

Figure C.2 – Mechanical configuration of large-volume couplers

Table C.2 – Nominal dimensions and tolerances for large-volume couplers

Dimensions in mm

Dimensions	Laboratory standard microphones		
	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
$\varnothing A$	23,77	13,2	12,15
$\varnothing B$	18,6	9,3	9,8
$\varnothing C$	$42,88 \pm 0,03$	$18,30 \pm 0,03$	$18,30 \pm 0,03$
D	1,95	0,5	0,7
E	$12,55 \pm 0,03$	$3,50 \pm 0,03$	$3,50 \pm 0,03$
F	$0,80 \pm 0,03$	$0,40 \pm 0,03$	$0,40 \pm 0,03$

Table C.3 provides representative wave-motion corrections for the large-volume coupler used with type LS1P microphones. These corrections are to be added to the pressure sensitivity level determined when the coupler is filled with air, and may be applied in cases where it is not practical to determine the wave-motion corrections for the individual coupler and microphones used during a calibration. When the coupler is filled with hydrogen, the same corrections can be used provided the frequency scale is multiplied by a factor equal to the ratio of the speed of sound propagation in the existing hydrogen concentration to the corresponding speed in air.

Table C.3 – Experimentally determined wave-motion corrections for the air-filled large-volume coupler used with type LS1P microphones

Frequency Hz	Correction dB
≤ 800	0,000
1 000	-0,002
1 250	-0,013
1 600	-0,034
2 000	-0,060
2 500	-0,087

C.4 Reference documents

- [C.1] MIURA, H. and MATSUI, E. *On the analysis of the wave motion in a coupler for the pressure calibration of laboratory standard microphones. J. Acoust. Soc. Japan* 30, 1974, pp. 639-646
- [C.2] RASMUSSEN, K. *Radial wave-motion in cylindrical plane-wave couplers. Acta Acustica*, 1, 1993, pp 145-151
- [C.3] GUIANVARC'H, C; DUROCHER, J. N.; BRUNEAU, A.; BRUNEAU, M. *Improved Formulation of the Acoustic Transfer Admittance of Cylindrical Cavities. Acta Acustica united with Acustica*, 92, 2006, pp 345-354
- [C.4] KOSOBRODOV, R. and KUZNETSOV, S. *Acoustic Transfer Impedance of Plane-Wave Couplers, Acta Acustica united with Acustica*, 92, 2006, pp 513-520

Annex D (informative)

Environmental influence on the sensitivity of microphones

D.1 General

This annex gives information on the influence of static pressure and temperature on the sensitivity of microphones.

D.2 Basic relations

The sensitivity of a condenser microphone is inversely proportional to the acoustic impedance of the microphone. In a lumped parameter representation, the impedance is given by the impedance of the diaphragm (due primarily to its mass and compliance) in series with the impedance of the enclosed air behind the diaphragm.

The impedance of the enclosed air is mainly determined by three parts:

- the thin air film between diaphragm and backplate, introducing dissipative loss and mass;
- the air in holes or slots in the backplate, introducing dissipative loss and mass;
- the air in the cavity behind the backplate, acting at low frequencies as a compliance but at high frequencies introducing additional resonances due to wave motion in the cavity.

Constructional details of the microphone determine the relative importance of the three parts.

The density and the viscosity of air are considered linear functions of temperature and/or static pressure. Consequently the resulting acoustic impedance of the microphone also depends upon the static pressure and the temperature. The static pressure and temperature coefficients of the microphone are then determined by the ratio of the acoustic impedance at reference conditions to the acoustic impedance at the relevant static pressure and temperature respectively.

D.3 Dependence on static pressure

Both the mass and the compliance of the enclosed air depend on static pressure, while the resistance can be considered independent of static pressure. The static pressure coefficient generally varies with frequency as shown in Figure D.1. For frequencies higher than about $0,5 f_0$ (f_0 being the resonance frequency of the microphone), the frequency variation depends strongly upon the wave-motion in the cavity behind the backplate. In general, the pressure coefficient depends on constructional details in the shape of backplate and back volume, and the actual values may differ considerably for two microphones of different manufacture although the microphones may belong to the same generic type, e.g. LS1P. Consequently the pressure coefficients shown on Figure D.1 should not be applied to individual microphones.

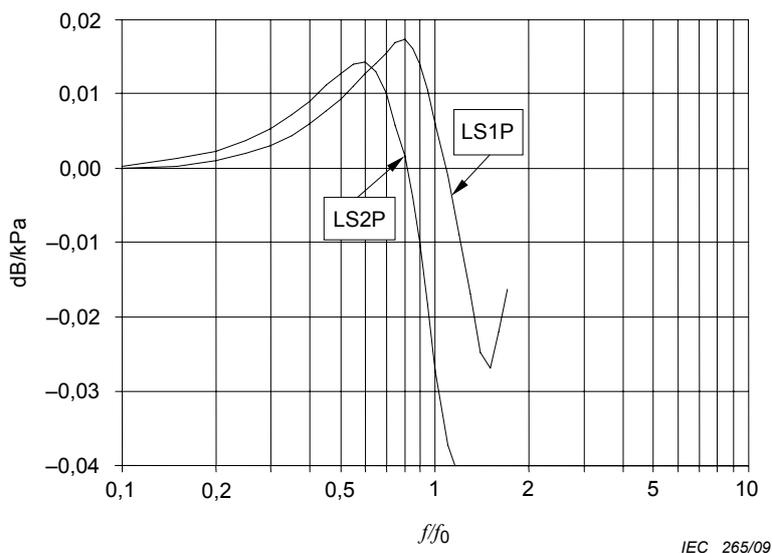


Figure D.1 – Examples of static pressure coefficient of LS1P and LS2P microphones relative to the low-frequency value as a function of relative frequency f/f_0

The low-frequency value (typically 250 Hz) of the static pressure coefficient is determined by the relationship between the compliances of the diaphragm itself and of the air enclosed behind the diaphragm. As the pressure sensitivity at low frequencies is determined by the resulting effective compliance of the diaphragm, the static pressure coefficient for individual samples of a given type of microphones is closely related to the individual sensitivity of the microphones at low frequencies.

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

At very low frequencies isothermal conditions will prevail in the cavity behind the diaphragm and thus the compliance of the cavity will increase. In addition, the influence of the static pressure equalization tube becomes significant. In the limit, the pressure sensitivity becomes independent of the static pressure. This effect becomes noticeable at frequencies below 2 Hz to 5 Hz for type LS1 and type LS2 microphones.

D.4 Dependence on temperature

Both the mass and the resistance of the enclosed air depend on temperature, while the compliance can be considered independent of temperature. The typical frequency dependence of the temperature coefficient is shown in Figure D.2.

In addition to the influence on the enclosed air, temperature variations also affect the mechanical parts of the microphone. The main effect generally will be a change in the tension of the diaphragm and thus a change in the compliance of the diaphragm and a change of the distance between diaphragm and backplate.

This results in a constant change in sensitivity in the stiffness controlled range and a slight change in resonance frequency.

The resulting temperature coefficient is a linear combination of the influence due to the variation of the impedance of the enclosed air and the influence due to the change of the mechanical tension.

The low-frequency value of the temperature coefficient generally lies in the range $\pm 0,005$ dB/K for both LS1P and LS2P microphones. The temperature coefficient shown in Figure D.2 should not be applied to individual microphones.

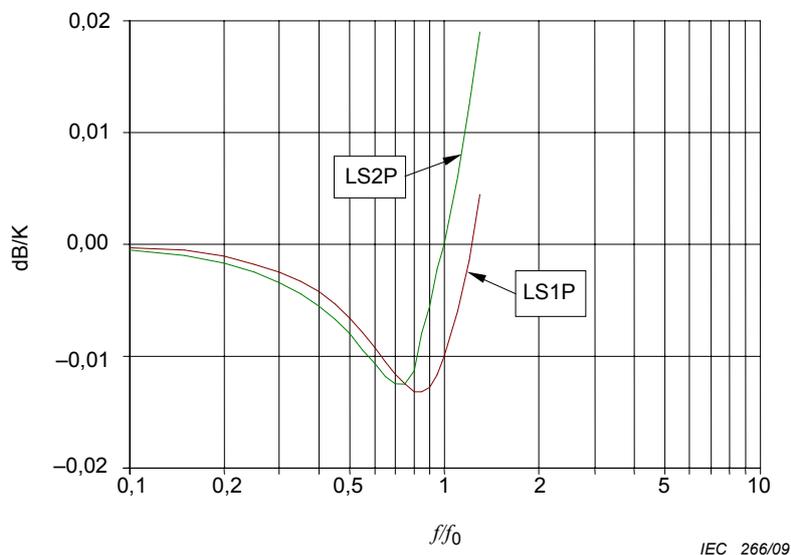


Figure D.2 – General frequency dependence of that part of the temperature coefficient for LS1P and LS2P microphones caused by the variation in the impedance of the enclosed air

D.5 Reference documents

- [D.1] RASMUSSEN, K. *The static pressure and temperature coefficients of laboratory standard microphones*. *Metrologia*, 36, 1999, pp 256-273
- [D.2] KOSOBRODOV, R and KUZNETSOV, S. *Static pressure coefficients of laboratory standard microphones in the frequency range 2 – 250 Hz*. 11th ICSV, 2004. St. Petersburg, Russia, pp 1441 – 1448

Annex E (informative)

Methods for determining microphone parameters

E.1 General

This annex gives information on methods for determining the microphone parameters which influence the acoustic transfer impedance. The parameters are depth and volume of the front cavity, and acoustic impedance of the microphone.

E.2 Front cavity depth

The depth of the front cavity is determined by optical methods. A contour plot across a diameter of the diaphragm and outer rim can be obtained by an interferometric scanning technique, for example using a laser beam. Such measurements should be performed across at least two diameters perpendicular to each other. An alternative method is based on the use of a depth-focusing microscope to measure the distance between points on the top of the microphone rim and points on the microphone diaphragm. A number of readings distributed over the diaphragm and the top of the rim should be taken.

E.3 Front cavity volume and equivalent volume

The front cavity volume together with the equivalent volume is determined by acoustical methods. As far as practicable such determinations should be performed under reference environmental conditions.

The microphone under test is inserted into one port of a three-port coupler. Two other condenser microphones are fitted - one used as a transmitter and the other as a receiver. The electrical transfer impedance between the two microphones is measured, while the coupler is terminated in turn by the microphone under test and a number of cavities of known volume covering the range of actual microphone front cavity volumes. By interpolation between the measured transfer impedances, the volume of the front cavity together with the equivalent volume of the microphone is determined.

Alternatively the microphone under test may be used as the receiver microphone. This will generally result in a higher signal-to-noise ratio, when measuring the electrical transfer impedance. In this case a number of different couplers of known volume may be used or the changes of volume can be obtained by inserting a number of small, calibrated rings between the coupler and the microphone under test. The internal diameters of the rings should be equal to those of the microphone front cavity.

It is important to notice that, by both methods, the volume determined includes the equivalent volume of the acoustic impedance of the diaphragm (see IEC 61094-1).

The methods described above can be used only at low frequencies, where the coupler behaves as a simple compliance. Using the second method, it may be necessary to compensate for the differences in heat conduction and capillary tube corrections when the coupler volume is changed and the effects of degraded signal-to-noise ratio may need to be considered.

E.4 Acoustic impedance of the microphone

The acoustic impedance can be expressed directly as a complex impedance or as a complex equivalent volume, see IEC 61094-1. On the assumption that the microphone can be represented by an electro-acoustic two-port network as described by the reciprocity equations (1a), a lumped parameter representation is possible. Such lumped parameter representation will generally be of sufficient accuracy for the evaluation of \underline{Z}_a (see 5.4) in the frequency range up to about 1,3 times the resonance frequency of the microphone.

The equivalent lumped parameters representing the acoustic impedance of the microphone may be the acoustic mass m_a , acoustic compliance c_a and acoustic resistance r_a , or the resonance frequency f_0 , equivalent volume at low frequencies V_{eq} , and loss factor d of the diaphragm. The resonance frequency is the frequency at which the imaginary part of the acoustic impedance \underline{Z}_a is zero. The asymptotic low frequency value of \underline{Z}_a determines the compliance and the equivalent volume. The real part of \underline{Z}_a at resonance determines the acoustic resistance and loss factor. The acoustic mass is calculated from the resonance frequency and the acoustic compliance. The relations between these parameters are:

$$(2\pi f_0)^2 = (m_a \cdot c_a)^{-1} \quad V_{eq} = c_a \cdot \gamma_{ref} \cdot p_{s,ref} \quad d = r_a / (2\pi f_0 \cdot m_a) = r_a \cdot 2\pi f_0 \cdot c_a$$

The acoustic impedance can be obtained by an indirect method based upon measurement of the electrical admittance \underline{Y} of the microphone. During the electrical admittance measurements the microphone is acoustically terminated with a closed quarter-wavelength tube ($\underline{p} = 0$ in Equation (1a)) and the acoustic impedance of the microphone is then calculated by iteration from:

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{e,0} - \underline{Y}^{-1}}{\underline{M}_p^2} \quad (\text{E.1})$$

$\underline{Z}_{e,0}$, the electrical impedance with the diaphragm blocked, may be determined from measurements made at frequencies sufficiently high (100 kHz to 200 kHz) that the diaphragm inertia effectively prevents motion ($\underline{q} = 0$ in Equation (1a)).

The lumped parameters representing the acoustic impedance can also be determined by acoustical methods. At resonance the phase difference between the sound pressure acting on the diaphragm and the open-circuit voltage will be 90°. This frequency can be estimated by exciting the diaphragm with an electrostatic actuator while terminating the diaphragm with a closed quarter-wavelength tube. Under the same conditions the loss factor can be determined as the ratio of the sensitivities at resonance and at low frequencies.

A third method is based upon datafitting. As the sensitivity of the microphone does not depend on the coupler used during the calibration, calibrations can be performed using a number of plane-wave couplers, say four, of different length (see C.1). For each microphone the sum of front cavity volume and equivalent volume is corrected until the same sensitivity is obtained for all couplers in the low- and mid- frequency range. This is the same technique as described in E.3. Incorrect values of the three lumped parameters describing the acoustic impedance of the microphone result in systematic changes at high frequencies related to the length of the coupler. The nature of the changes is different for the three parameters. Losses have very little influence on the calculated sensitivities around the resonance frequency while a wrong resonance frequency shows a maximum influence. A wrong equivalent volume mainly influences the calculated responses above the resonance frequency. If the complex microphone sensitivity is determined, a 90° phase response is found at the resonance frequency.

Similarly the loss factor can be determined as the ratio of the sensitivities at resonance and the asymptotic value at low frequencies. However, the asymptotic value at low frequencies

has to be estimated from the low frequency response ignoring the slight increase in the sensitivity at low frequencies caused by heat conduction in the back cavity of the microphone. It is essential for a successful data-fitting that a correction for radial wave-motion is applied and that other systematic errors like cross-talk have been eliminated before the data-fitting is performed.

Annex F (informative)

Physical properties of humid air

F.1 General

Certain quantities, describing the properties of the enclosed gas in the coupler, enter the expressions for calculating the sensitivity of the microphones, see Equations (3) and (4) and Annexes A and B. These quantities depend on one or more of the measured environmental variables, static pressure, temperature and humidity.

A large number of investigations have been published in the literature where reference values for the quantities can be found for specified environmental conditions, i.e. for standard dry air at 0 °C and at a static pressure of 101,325 kPa. The calculation procedures for the properties of air under actual environmental conditions described in this annex, are based upon procedures recommended by other international bodies and the latest results reported in the literature that has found general international acceptance.

The equations 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 in percent (%);

and the quantities to be calculated are:

ρ density of air in kilograms per cubic metre ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

c speed of sound at actual frequency in metres per second ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

κ ratio of specific heats;

η viscosity of air in pascal-seconds (Pa·s);

α_t thermal diffusivity of air in square metres per second ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

The calculation procedures take into account that humid air is not an ideal gas and most of the quantities are described by a polynomial where the relevant constants are given in Table F.2. In order to derive the above-mentioned quantities some additional quantities and constants are used:

$T = T_0 + t$, the thermodynamic temperature in kelvin (K);

$T_0 = 273,15 \text{ K}$ (0 °C);

$T_{20} = 293,15 \text{ K}$ (20 °C);

$p_{s,r} = 101\,325 \text{ Pa}$;

$p_{sv}(t)$ saturation water vapor pressure in pascals (Pa);

c_0 zero-frequency speed of sound in metres per second ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

x_w mole fraction of water vapor in air;

x_c mole fraction of carbon dioxide in air;

$f(p_s, t)$ enhancement factor;

Z compressibility factor for humid air;

k_a thermal conductivity in $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

C_p specific heat capacity at constant pressure in $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

f_{rO}	relaxation frequency of oxygen in hertz (Hz);
f_{rN}	relaxation frequency of nitrogen in hertz (Hz);
α_{vO}	attenuation coefficient for vibrational relaxation in oxygen in metre to the power minus one (m^{-1});
α_{vN}	attenuation coefficient for vibrational relaxation in nitrogen in metre to the power minus one (m^{-1}).

The equations used for the calculations are considered valid for environmental conditions within the ranges:

temperature	15 °C – 27 °C
static pressure	60 kPa – 110 kPa
relative humidity	10 % – 90 %

The uncertainties quoted on the equations are standard uncertainties.

F.2 Density of humid air

The density of humid air is calculated by the ‘CIPM-2007 equation’ as recommended by the 96th CIPM meeting, see [F.1]⁵:

$$\rho = [3,483\,740 + 1,4446(x_c - 0,000\,4)] \times 10^{-3} \frac{p_s}{ZT} (1 - 0,378\,0 x_w) \quad (F.1)$$

where

$$Z = 1 - \frac{p_s}{T} \left[a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (a_3 + a_4 t) x_w + (a_5 + a_6 t) x_w^2 \right] + \frac{p_s^2}{T^2} (a_7 + a_8 x_w^2)$$

$$x_w = \frac{H}{100} \frac{p_{sv}(t)}{p_s} f(p_s, t)$$

$$p_{sv}(t) = \exp(a_0 T^2 + a_1 T + a_2 + a_3 T^{-1})$$

$$f(p_s, t) = a_0 + a_1 p_s + a_2 t^2$$

The composition of standard air is based upon a carbon dioxide mole fraction of 0,000 314. It is generally accepted that under laboratory conditions a higher value is found and in the absence of actual measurements a value of $x_c = 0,000\,4$ is recommended.

The relative uncertainty on the equation itself is estimated to 22×10^{-6} .

F.3 Speed of sound in air

In the absence of dispersion, the speed of sound is given by the zero-frequency speed of sound, see [F.2]:

$$c_0 = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (a_3 + a_4 t + a_5 t^2) x_w + (a_6 + a_7 t + a_8 t^2) p_s + (a_9 + a_{10} t + a_{11} t^2) x_c + a_{12} x_w^2 + a_{13} p_s^2 + a_{14} x_c^2 + a_{15} x_w p_s x_c \quad (F.2)$$

The relative uncertainty on the zero-frequency speed of sound is estimated to 3×10^{-4} .

⁵ Figures in square brackets refer to Clause F.8.

NOTE The speed of sound depends slightly on frequency due to dispersion as a result of relaxation effects among the constituents of air. In the frequency range relevant for this standard, the influence of dispersion on the speed of sound is less than the relative uncertainty on the zero-frequency speed of sound given by (F.2). The speed of sound at the actual measurement frequency can be calculated from the expression, see [F.4]:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} - \sum_n \frac{\alpha_{vn}}{2\pi f_{vn}}$$

where α_v and f_v are the attenuation coefficient and relaxation frequency, respectively, for vibrational relaxation effects. n denotes the component (nitrogen or oxygen) of air. These values are calculated from [F.6].

The equation may be rewritten into a more convenient form:

$$c = c_0 \left[1 + \sum_n \frac{c \cdot \alpha_{vn}}{2\pi f_{vn}} \right],$$

where the product $c \cdot \alpha_{vn}$ is independent of the speed of sound, c .

F.4 Ratio of specific heats of air

The ratio of specific heats is calculated from, see [F.2]:

$$\begin{aligned} \kappa = & a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (a_3 + a_4 t + a_5 t^2) x_w + (a_6 + a_7 t + a_8 t^2) p_s \\ & + (a_9 + a_{10} t + a_{11} t^2) x_c + a_{12} x_w^2 + a_{13} p_s^2 + a_{14} x_c^2 + a_{15} x_w p_s x_c \end{aligned} \quad (\text{F.3})$$

The relative uncertainty on the ratio of specific heats is estimated to $3,2 \times 10^{-4}$.

F.5 Viscosity of air

The viscosity of air is calculated from, see [F.5]:

$$\eta = (a_0 + a_1 T + (a_2 + a_3 T) x_w + a_4 T^2 + a_5 x_w^2) \times 10^{-8} \quad (\text{F.4})$$

F.6 Thermal diffusivity of air

The basic definition of the thermal diffusivity of air is:

$$\alpha_t = \frac{k_a}{\rho C_p} \quad (\text{F.5})$$

where

$$\begin{aligned} k_a = & 4186,8 \times [a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + (a_3 + a_4 T) x_w] \times 10^{-8} \\ C_p = & 4186,8 \times [a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + (a_4 + a_5 T + a_6 T^2) x_w + (a_7 + a_8 T + a_9 T^2) x_w^2] \end{aligned}$$

F.7 Examples

Table F.1 gives the values of the quantities given in Clauses F.1 to F.5 for two sets of environmental variables. The values in the table are intended for testing programs used to calculate these quantities and thus the figures are shown with more decimals than relevant in practice. Table F.2 lists the various coefficients necessary to calculate these quantities.

Table F.1 – Calculated values of the quantities in Clauses F.1 to F.5 for two sets of environmental conditions

Environmental conditions	Density of air ρ kg·m ⁻³	Speed of sound c_0 m·s ⁻¹	Ratio of specific heats κ	Viscosity of air η Pa·s	Thermal diffusivity of air α_t m ² ·s ⁻¹
$t = 23\text{ °C}$ $p_s = 101\,325\text{ Pa}$ $H = 50\%$	1,186 084 8	345,866 52	1,400 757 3	1,826 566×10 ⁻⁵	2,115 317×10 ⁻⁵
$t = 20\text{ °C}$ $p_s = 80\,000\text{ Pa}$ $H = 65\%$	0,944 158 9	344,382 67	1,400 026 6	1,811 295×10 ⁻⁵	2,627 024×10 ⁻⁵

Table F.2 – Coefficients used in the equations for humid air properties

Coefficients	Saturation water vapor pressure	Enhancement factor	Compressibility factor	Zero-frequency speed of sound	Ratio of specific heats	Viscosity	Thermal conductivity	Specific heat capacity at constant pressure
Symbol	p_{sv}	$f(p_s, t)$	Z	c_0	κ	η	k_a	C_p
a_0	$1,237\ 884\ 7 \times 10^{-5}$	1,000 62	$1,581\ 23 \times 10^{-6}$	331,502 4	1,400 822	84,986	60,054	0,251 625
a_1	$-1,912\ 131\ 6 \times 10^{-2}$	$3,14 \times 10^{-8}$	$-2,933\ 1 \times 10^{-8}$	0,603 055	$-1,75 \times 10^{-5}$	7,0	1,846	$-9,252\ 5 \times 10^{-5}$
a_2	33,937 110 47	$5,6 \times 10^{-7}$	$1,104\ 3 \times 10^{-10}$	-0,000 528	$-1,73 \times 10^{-7}$	113,157	$2,06 \times 10^{-6}$	$2,133\ 4 \times 10^{-7}$
a_3	$-6,343\ 164\ 5 \times 10^3$		$5,707 \times 10^{-6}$	51,471 935	-0,087 362 9	-1	40	$-1,004\ 3 \times 10^{-10}$
a_4			$-2,051 \times 10^{-8}$	0,149 5874	-0,000 166 5	$-3,750\ 1 \times 10^{-3}$	$-1,775 \times 10^{-4}$	0,124 77
a_5			$1,989\ 8 \times 10^{-4}$	-0,000 782	$-3,26 \times 10^{-6}$	-100,015		$-2,283 \times 10^{-5}$
a_6			$-2,376 \times 10^{-6}$	$-1,82 \times 10^{-7}$	$2,047 \times 10^{-8}$			$1,267 \times 10^{-7}$
a_7			$1,83 \times 10^{-11}$	$3,73 \times 10^{-8}$	$-1,26 \times 10^{-10}$			0,011 16
a_8			$-0,765 \times 10^{-8}$	$-2,93 \times 10^{-10}$	$5,939 \times 10^{-14}$			$4,61 \times 10^{-6}$
a_9				-85,209 31	-0,119 971 7			$1,74 \times 10^{-8}$
a_{10}				-0,228 525	-0,000 869 3			
a_{11}				$5,91 \times 10^{-5}$	$1,979 \times 10^{-6}$			
a_{12}				-2,835 149	-0,011 04			
a_{13}				$-2,15 \times 10^{-13}$	$-3,478 \times 10^{-16}$			
a_{14}				29,179 762	0,045 061 6			
a_{15}				0,000 486	$1,82 \times 10^{-6}$			

F.8 Reference documents

- [F.1] PICARD, A; DAVIS, R.S.; GLASER, A.M. and FUJII, K. *Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)*. Metrologia 2008, 45, pp 149-155
 - [F.2] CRAMER, O. *Variation of the specific heat ratio and the speed of sound with temperature, pressure, humidity and CO₂ concentration*. J. Acoust. Soc. Am., 93, 1993, pp 2510-2516
 - [F.3] WONG, G.S.K. Comment on *Variation of the specific heat ratio and the speed of sound with temperature, pressure, humidity and CO₂ concentration*. J. Acoust. Soc. Am., 93, 1993, pp 2510-2516". J. Acoust. Soc. Am., 97, pp 3177-3179, 1995
 - [F.4] HOWELL, G.P. and MORFEY, C.L. *Frequency dependence of the speed of sound in air*. J. Acoust. Soc. Am., 82, 1987 pp 375-377
 - [F.5] ZUCKERWAR, A.J. and MEREDITH, R.W. *Low-frequency absorption of sound in air*, J. Acoust. Soc. Am., 78, 1985 pp 946-955
 - [F.6] ISO 9613-1:1993, *Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*
-

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	46
1 Domaine d'application	48
2 Références normatives.....	48
3 Termes et définitions	48
4 Conditions ambiantes de référence.....	49
5 Principes de l'étalonnage en pression par réciprocity	49
5.1 Principe général	49
5.1.1 Généralités.....	49
5.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones	49
5.1.3 Principes généraux de la méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire.....	49
5.2 Expressions de base	50
5.3 Technique de la tension insérée.....	51
5.4 Evaluation de l'impédance acoustique de transfert	51
5.5 Correction de conduction thermique	53
5.6 Correction de tube capillaire.....	54
5.7 Expressions finales de l'efficacité en pression.....	54
5.7.1 Méthode utilisant trois microphones.....	54
5.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire	55
6 Grandeurs d'influence sur l'efficacité en pression	55
6.1 Généralités.....	55
6.2 Tension de polarisation	55
6.3 Configuration de référence du blindage	55
6.4 Distribution de la pression sur la membrane	56
6.5 Influence des conditions d'environnement	56
6.5.1 Pression statique.....	56
6.5.2 Température.....	56
6.5.3 Humidité.....	57
6.5.4 Migration vers les conditions ambiantes de référence.....	57
7 Composantes d'incertitude d'étalonnage	57
7.1 Généralités.....	57
7.2 Impédance électrique de transfert	57
7.3 Impédance acoustique de transfert.....	58
7.3.1 Généralités.....	58
7.3.2 Propriétés des coupleurs	58
7.3.3 Paramètres des microphones	59
7.4 Imperfection de la théorie.....	60
7.5 Incertitude sur le niveau d'efficacité en pression	60
Annexe A (normative) Conduction thermique et pertes par viscosité dans une cavité close.....	63
Annexe B (normative) Impédance acoustique d'un tube capillaire	67
Annexe C (informative) Exemples de coupleurs cylindriques pour l'étalonnage des microphones	70
Annexe D (informative) Influence de l'environnement sur l'efficacité des microphones.....	75
Annexe E (informative) Méthodes de détermination des paramètres des microphones.....	78
Annexe F (informative) Propriétés physiques de l'air humide	81

Figure 1 – Circuit équivalent pour évaluer l'impédance acoustique de transfert $Z_{a,12}$	51
Figure 2 – Circuit équivalent pour évaluer $Z'_{a,12}$ quand les dimensions du coupleur sont petites par rapport à la longueur d'onde.....	52
Figure 3 – Circuit équivalent pour évaluer $Z''_{a,12}$ quand on suppose une transmission en ondes planes dans le coupleur.....	52
Figure C.1 – Configuration mécanique des coupleurs en ondes planes.....	71
Figure C.2 – Configuration mécanique des coupleurs de grands volumes.....	73
Figure D.1 – Exemples de variation du coefficient de pression statique des microphones de type LS1P et LS2P par rapport à la valeur en basse fréquence en fonction de la fréquence relative f/f_0	76
Figure D.2 – Variation générale, en fonction de la fréquence, de la composante du coefficient de température provoquée par les variations de l'impédance acoustique de l'air enfermé dans la cavité arrière, pour les microphones LS1P et LS2P.....	77
Tableau 1 – Composantes d'incertitude	61
Tableau A.1 – Valeurs pour E_V	64
Tableau B.1 – Partie réelle de $Z_{a,C}$ en gigapascal-seconde par mètre cube (GPa·s/m ³).....	68
Tableau B.2 – Partie imaginaire de $Z_{a,C}$ en gigapascal-seconde par mètre cube (GPa·s/m ³).....	69
Tableau C.1 – Dimensions nominales pour les coupleurs en ondes planes.....	72
Tableau C.2 – Dimensions nominales et tolérances pour les coupleurs de grands volumes.....	73
Tableau C.3 – Corrections de propagation déterminées expérimentalement pour le coupleur de grand volume rempli d'air utilisé avec les microphones de type LS1P.....	74
Tableau F.1 – Valeurs calculées des grandeurs mentionnées dans les Articles F.1 à F.5 pour deux ensembles de conditions environnementales.....	84
Tableau F.2 – Coefficients utilisés dans les équations pour les propriétés de l'air humide.....	85

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉLECTROACOUSTIQUE – MICROPHONES DE MESURE –

Partie 2: Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme Internationale CEI 61094-2 a été préparée par le comité d'étude 29 de la CEI: Electroacoustique.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition publiée en 1992. Cette deuxième édition constitue une révision technique.

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

- une mise à jour de l'Article 6 afin d'être en conformité avec les exigences du Guide ISO/CEI 98-3;
- une amélioration de la théorie de la conduction thermique en Annexe A;
- une révision de l'Annexe F: Propriétés physiques de l'air humide.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
29/671/FDIS	29/676/RVD

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 de l'ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61094, présentées sous le titre général *Electroacoustique – Microphones de mesure* peut être consultée sur le site Web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI 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.

ÉLECTROACOUSTIQUE – MICROPHONES DE MESURE –

Partie 2: Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de laboratoire par la méthode de réciprocité

1 Domaine d'application

La présente partie de la Norme internationale CEI 61094

- est applicable aux microphones étalons de laboratoire répondant aux prescriptions de la CEI 61094-1 et aux autres types de microphones à condensateur présentant les mêmes dimensions mécaniques;
- spécifie une méthode primaire de détermination de l'efficacité en pression complexe de manière à établir une base reproductible et exacte pour la mesure de la pression acoustique.

Toutes les grandeurs sont exprimées en unités SI.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. 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).

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

Guide ISO/CEI 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*¹

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 61094-1 et dans le Guide ISO/CEI 98-3 ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1

microphone réciproque

microphone linéaire passif pour lequel l'impédance de transfert inverse, entrée en circuit ouvert et l'impédance de transfert direct, sortie en circuit ouvert sont égales en valeur module

3.2

argument de l'efficacité en pression d'un microphone

pour une fréquence donnée, l'angle de phase entre la tension à circuit ouvert et une pression acoustique uniforme agissant sur la membrane

NOTE L'argument est exprimé en degrés ou en radians (° ou rad).

¹ Le Guide ISO/CEI 98-3:2008 est publié en tant que nouvelle édition du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM), 1995.

3.3**impédance électrique de transfert**

pour un système formé de deux microphones couplés acoustiquement, le quotient de la tension à circuit ouvert du microphone utilisé en récepteur par le courant traversant le microphone utilisé en émetteur

NOTE 1 L'impédance électrique de transfert est exprimée en ohm (Ω).

NOTE 2 Cette impédance est définie pour la configuration de référence du blindage donnée en 7.2 de la CEI 61094-1:2000.

3.4**impédance acoustique de transfert**

pour un système formé de deux microphones couplés acoustiquement, le quotient de la pression acoustique agissant sur la membrane du microphone utilisé en récepteur par le flux de vitesse en court-circuit produit par le microphone utilisé en émetteur

NOTE L'impédance acoustique de transfert est exprimée en pascal-seconde par mètre cube ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$).

3.5**coupleur**

dispositif qui, adapté aux microphones, constitue une cavité de forme et dimensions déterminées agissant comme élément de couplage acoustique entre les deux microphones

4 Conditions ambiantes de référence

Les conditions ambiantes de référence sont:

— température	23,0 °C
— pression statique	101,325 kPa
— taux d'humidité relative	50 %

5 Principes de l'étalonnage en pression par réciprocité**5.1 Principe général****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, l'un d'entre eux devant être réciproque.

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

5.1.2 Principes généraux de la méthode utilisant trois microphones

Considérons deux microphones couplés acoustiquement au moyen d'un coupleur. En utilisant l'un d'entre eux comme source sonore et l'autre comme récepteur, on mesure l'impédance électrique de transfert. Quand l'impédance acoustique de transfert du système est connue, le produit des efficacités en pression des deux microphones couplés peut être déterminé. En effectuant des combinaisons deux à deux des trois microphones notés (1), (2) et (3), on obtient trois produits mutuellement indépendants, à partir desquels on peut déduire l'expression de l'efficacité en pression de chacun des trois microphones.

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 par un coupleur et le produit des efficacités en pression des deux microphones est déterminé (voir 5.1.2).

Ensuite, les deux microphones sont soumis à la même pression acoustique produite par la source sonore auxiliaire. Le rapport des deux tensions de sortie est alors égal au rapport des efficacités en pression. Ainsi, à partir du produit et du rapport des efficacités en pression des deux microphones, on peut déduire une expression de l'efficacité en pression de chacun d'eux.

NOTE Pour obtenir le rapport des efficacités en pression, une méthode de comparaison directe peut être utilisée et la source sonore auxiliaire peut être un troisième microphone dont les caractéristiques mécaniques ou acoustiques diffèrent de celles des microphones étalonnés.

5.2 Expressions de base

Les microphones étalons de laboratoire et les microphones similaires sont considérés comme réciproques. Dans ces conditions, les équations du réseau électroacoustique à deux accès formé par les 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 uniformément appliquée aux bornes acoustiques (membrane) du microphone en pascal (Pa);
- \underline{U} est la tension aux bornes électriques du microphone en volt (V);
- \underline{q} est le flux de vitesse à travers les bornes acoustiques (membrane) du microphone en mètre cube par seconde (m³/s);
- \underline{i} est le courant à travers les bornes électriques du microphone en ampère (A);
- $\underline{z}_{11} = \underline{Z}_e$ est l'impédance électrique du microphone quand la membrane est bloquée en ohms (Ω);
- $\underline{z}_{22} = \underline{Z}_a$ est l'impédance acoustique du microphone quand il n'est pas chargé électriquement en pascal-seconde par mètre cube (Pa·s·m⁻³);
- $\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{M}_p \underline{Z}_a$ est égale aux impédances de transferts inverse et directe en volt-seconde par mètre cube (V·s·m⁻³), \underline{M}_p étant l'efficacité en pression du microphone en volt par pascal (V·Pa⁻¹).

NOTE Les symboles soulignés représentent des grandeurs complexes.

Les équations (1) peuvent être réécrites sous la forme:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{U} \\ \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + \underline{Z}_a \underline{q} &= \underline{p} \end{aligned} \quad (1a)$$

qui constituent les équations de réciprocité du microphone.

On associe acoustiquement au moyen d'un coupleur les microphones (1) et (2) dont les efficacités en pression sont $\underline{M}_{p,1}$ et $\underline{M}_{p,2}$. A partir des équations (1a) on voit qu'un courant \underline{i}_1 traversant les bornes électriques du microphone (1) produit un flux de vitesse en court-circuit acoustique ($\underline{p} = 0$ sur la membrane) égal à $\underline{M}_{p,1} \underline{i}_1$ et donc une pression acoustique $\underline{p}_2 = \underline{Z}_{a,12} \underline{M}_{p,1} \underline{i}_1$ aux bornes acoustiques du microphone (2), où $\underline{Z}_{a,12}$ est l'impédance acoustique de transfert du système.

La tension à circuit ouvert du microphone (2) sera alors;

$$\underline{U}_2 = \underline{M}_{p,2} \cdot \underline{p}_2 = \underline{M}_{p,1} \underline{M}_{p,2} \underline{Z}_{a,12} \underline{i}_1$$

Ainsi le produit des efficacités en pression est donné par;

$$\frac{M_{p,1} M_{p,2}}{Z_{a,12}} = \frac{1}{i_1} \frac{U_2}{i_1} \quad (2)$$

5.3 Technique de la tension insérée

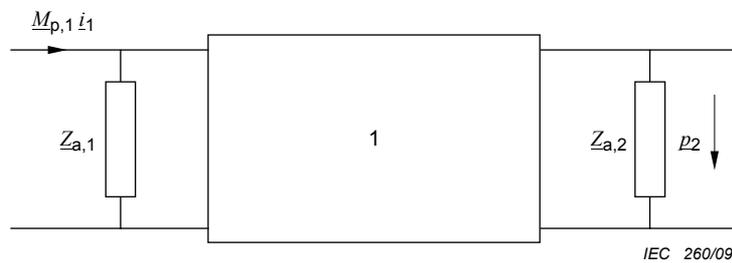
La technique de la tension insérée est utilisée pour déterminer la tension à circuit ouvert d'un microphone quand il est chargé électriquement.

Considérons un microphone ayant une tension à circuit ouvert et une impédance interne données, fermé sur une impédance de charge. Pour mesurer sa tension à 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.

On applique alternativement la pression acoustique et une tension d'étalonnage de même fréquence. On ajuste la tension d'étalonnage de façon qu'elle produise la même chute de tension aux bornes de l'impédance de charge que la pression acoustique, la tension à circuit ouvert est alors égale en module à la tension d'étalonnage.

5.4 Evaluation de l'impédance acoustique de transfert

L'impédance acoustique de transfert $Z_{a,12} = \frac{p_2}{(M_{p,1} i_1)}$ peut être évaluée à partir du circuit équivalent de la Figure 1 où $Z_{a,1}$ et $Z_{a,2}$ sont les impédances acoustiques respectivement des microphones (1) et (2).



Légende

1 Coupleur

Figure 1 – Circuit équivalent pour évaluer l'impédance acoustique de transfert $Z_{a,12}$

Dans plusieurs cas, $Z_{a,12}$ peut être évalué théoriquement. Supposons que la pression acoustique soit la même en n'importe quel point de la cavité (cela est réalisé lorsque les dimensions mécaniques du coupleur sont très petites par rapport à la longueur d'onde). Le gaz dans le coupleur se comporte comme une élasticité pure et, à partir du circuit équivalent de la Figure 2, $Z_{a,12}$ est donné par $Z'_{a,12}$ (en supposant une compression et une expansion adiabatique du gaz):

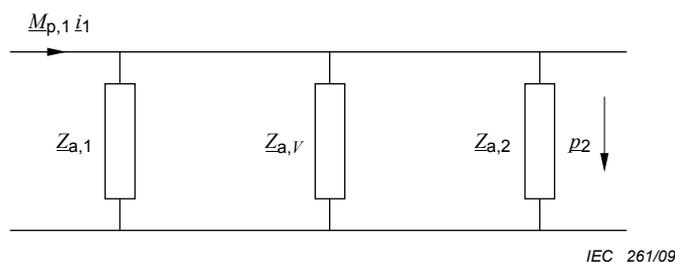


Figure 2 – Circuit équivalent pour évaluer $Z'_{a,12}$ quand les dimensions du coupleur sont petites par rapport à la longueur d'onde

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,V}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}} = j\omega \left(\frac{V}{\kappa p_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_r p_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_r p_{s,r}} \right) \quad (3)$$

où

- V est le volume géométrique total du coupleur en mètre cube (m^3);
- $V_{e,1}$ est le volume équivalent du microphone (1) en mètre cube (m^3);
- $V_{e,2}$ est le volume équivalent du microphone (2) en mètre cube (m^3);
- $Z_{a,V} = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$ est l'impédance acoustique du gaz à l'intérieur du coupleur en pascal-seconde par mètre cube ($Pa \cdot s/m^3$);
- ω est la pulsation en radian par seconde (rad/s);
- p_s est la pression statique en pascal (Pa);
- $p_{s,r}$ est la pression statique dans les conditions de référence en pascal (Pa);
- κ est le rapport des capacités thermiques massiques dans les conditions de mesure;
- κ_r est la valeur de κ dans les conditions de référence.

Les valeurs de κ et de κ_r pour l'air humide peuvent être déduites des équations données dans l'Annexe F.

Aux fréquences plus élevées, lorsque les dimensions ne sont plus suffisamment petites par rapport à la longueur d'onde, l'évaluation de $Z_{a,12}$ devient en général complexe. Toutefois, si le coupleur est de forme cylindrique et possède un diamètre égal à celui des membranes des microphones, on peut alors, aux fréquences où l'on peut admettre l'existence d'une transmission en ondes planes, considérer le système complet comme ligne de transmission homogène (voir Figure 3).

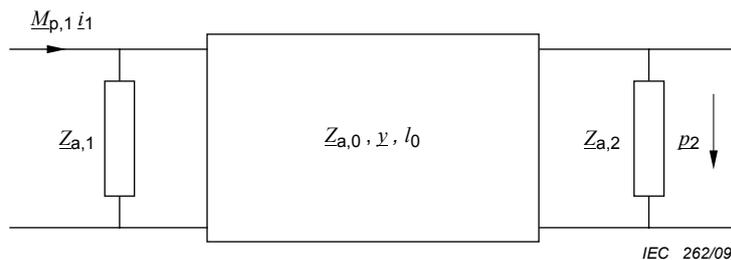


Figure 3 – Circuit équivalent pour évaluer $Z'_{a,12}$ quand on suppose une transmission en ondes planes dans le coupleur

$\underline{Z}_{a,12}$ est donné par $\underline{Z}'_{a,12}$ (en supposant une compression et une expansion adiabatique du gaz):

$$\frac{1}{\underline{Z}'_{a,12}} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,0}} \left[\left(\frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}} + \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,2}} \right) \cosh \underline{\gamma} l_0 + \left(1 + \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,1}} \frac{\underline{Z}_{a,0}}{\underline{Z}_{a,2}} \right) \sinh \underline{\gamma} l_0 \right] \quad (4)$$

où

$\underline{Z}_{a,0}$ est l'impédance acoustique des ondes planes dans le coupleur. Si on néglige les pertes dans le coupleur, alors $\underline{Z}_{a,0} = \rho c / S_0$;

ρ est la masse volumique du gaz à l'intérieur du coupleur en kilogramme par mètre cube ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

c est la célérité du son en espace libre dans le gaz en mètre par seconde ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

S_0 est l'aire de la section droite du coupleur en mètre carré (m^2);

l_0 est la longueur du coupleur, c'est-à-dire la distance entre les deux membranes en mètre (m);

$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$ est la constante de propagation complexe en mètre à la puissance moins un (m^{-1}).

Les valeurs de ρ et c pour l'air humide peuvent être déduites des équations données dans l'annexe F.

La partie réelle de $\underline{\gamma}$ prend en compte les pertes par viscosité et la conduction thermique sur les parois du cylindre et la partie imaginaire est le nombre d'onde.

Si les pertes sont négligées, $\underline{\gamma}$ peut être approximé en faisant α égal zéro et β égal à ωc dans l'équation (4).

Il y a lieu de tenir compte de tout volume d'air associé aux microphones qui n'est pas compris dans le volume limité par les parois du coupleur et les deux membranes (voir 7.3.3.1).

5.5 Correction de conduction thermique

L'évaluation de $\underline{Z}'_{a,12}$ au paragraphe précédent suppose un comportement adiabatique dans le coupleur. Cependant, dans la pratique, l'influence de la conduction thermique au niveau des parois du coupleur entraîne des écarts par rapport aux conditions purement adiabatiques, spécialement pour les coupleurs de petites dimensions et aux fréquences basses.

Aux fréquences basses, où la pression acoustique peut être considérée comme la même en tous les points et sous l'hypothèse que les parois restent à température constante, l'influence des pertes par conduction thermique peut être calculée et exprimée sous la forme d'un facteur de correction complexe $\underline{\Delta}_H$ appliqué au volume géométrique V dans l'équation (3). Des expressions du facteur de correction $\underline{\Delta}_H$ sont données dans l'Annexe A.

Aux fréquences élevées, des phénomènes de propagation seront présents dans le coupleur et la pression acoustique ne sera plus la même dans tous les points. Pour des coupleurs ayant la forme de cylindre droit pour lesquels la théorie des lignes de transmission peut être appliquée (voir 5.4), l'effet combiné de la conduction thermique et des pertes visqueuses le long des parois du cylindre peut être pris en compte par un coefficient de propagation complexe et une impédance acoustique correspondant à la propagation des ondes planes dans le coupleur. La perte thermique supplémentaire sur les bases du coupleur, c'est-à-dire les membranes des microphones, peut être prise en compte en ajoutant des composants supplémentaires à l'impédance acoustique des microphones. Des expressions du coefficient de propagation complexe et de l'impédance acoustique pour une propagation en ondes planes sont données dans l'Annexe A.

5.6 Correction de tube capillaire

Le coupleur est généralement muni de tubes capillaires destinés à l'égalisation des pressions statiques entre l'intérieur et l'extérieur du coupleur. Deux tubes capillaires permettent également l'introduction d'un gaz autre que l'air.

L'impédance acoustique à l'entrée d'un tube capillaire ouvert est donnée par:

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t} \tanh \gamma l_C \quad (5)$$

où

$\underline{Z}_{a,t}$ est l'impédance complexe des ondes acoustiques d'un tube infini en pascal-seconde par mètre cube ($\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$);

l_C est la longueur du tube en mètre (m).

L'effet de shunt des tubes capillaires peut être pris en compte en introduisant un facteur correctif complexe $\underline{\Delta}_C$ appliqué aux impédances acoustiques de transfert données par les équations (3) et (4):

$$\underline{\Delta}_C = 1 + n \frac{\underline{Z}_{a,12}''}{\underline{Z}_{a,C}} \quad (6)$$

où

n est le nombre de tubes capillaires identiques utilisés;

$\underline{Z}_{a,12}''$ est l'impédance acoustique de transfert $\underline{Z}_{a,12}'$ corrigée de la conduction thermique conformément au paragraphe 5.5.

Une expression de l'impédance acoustique d'entrée $\underline{Z}_{a,C}$ d'un tube capillaire ouvert est donnée dans l'Annexe B.

5.7 Expressions finales de l'efficacité en pression

5.7.1 Méthode utilisant trois microphones

L'impédance électrique de transfert $\underline{U}_2/\underline{i}_1$ (voir 5.2) est notée $\underline{Z}_{e,12}$ avec des expressions similaires pour les autres couples de microphones.

En tenant compte des corrections données en 5.5 et 5.6, l'expression finale du module de l'efficacité en pression du microphone (1) est:

$$|M_{p,1}| = \left\{ \left| \frac{\underline{Z}_{e,12} \underline{Z}_{e,31}}{\underline{Z}_{e,23}} \right| \left| \frac{\underline{Z}_{a,23}''}{\underline{Z}_{a,12}'' \underline{Z}_{a,31}''} \right| \left| \frac{\underline{\Delta}_{C,12} \underline{\Delta}_{C,31}}{\underline{\Delta}_{C,23}} \right| \right\}^{1/2} \quad (7)$$

Des expressions similaires s'appliquent aux microphones (2) et (3).

L'argument de l'efficacité en pression de chaque microphone est déterminé par une procédure similaire à partir de l'argument de chaque terme de l'expression ci-dessus.

NOTE Quand des grandeurs complexes sont exprimées sous la forme d'un module et d'une phase, il convient que l'information sur la phase se réfère à l'étendue complète de la phase sur les quatre quadrants, c'est-à-dire 0 - 2π rad ou 0 - 360°.

5.7.2 Méthode utilisant deux microphones et une source sonore auxiliaire

Si seulement deux microphones et une source sonore auxiliaire sont utilisés, l'expression finale du module de l'efficacité en pression est:

$$\left| \frac{M_{p,1}}{M_{p,2}} \right| = \left| \frac{\frac{M_{p,1}}{M_{p,2}} \frac{Z_{e,12}}{Z_{a,12}} \Delta_C}{1} \right|^{1/2} \quad (8)$$

où le rapport des deux efficacités en pression est mesuré par comparaison à la source auxiliaire, voir 5.1.3.

6 Grandeurs d'influence sur l'efficacité en pression

6.1 Généralités

L'efficacité en pression d'un microphone à condensateur dépend de la tension de polarisation et des conditions d'environnement.

Le mode de fonctionnement fondamental d'un microphone polarisé suppose que la charge électrique sur le microphone soit gardée constante à toutes les fréquences. Cette condition ne peut pas être maintenue aux très basses fréquences et le produit de la capacitance du microphone par la résistance de polarisation détermine la constante de temps de la charge du microphone. Alors que l'efficacité à circuit ouvert du microphone, obtenue par la technique de la tension insérée, peut être déterminée correctement, la tension de sortie d'un préamplificateur associé au microphone décroîtra aux fréquences basses selon cette constante de temps.

De plus, la définition de l'efficacité en pression implique que certaines prescriptions soient remplies lors des mesures. Pendant l'étalonnage, il est essentiel que ces conditions soient suffisamment bien satisfaites pour que les composantes d'incertitude qui en résultent soient petites.

6.2 Tension de polarisation

L'efficacité d'un microphone à condensateur est approximativement proportionnelle à la tension de polarisation; aussi la tension de polarisation effectivement utilisée pendant l'étalonnage doit être indiquée.

Pour être conforme à la CEI 61094-1, une tension de polarisation de 200,0 V est recommandée.

6.3 Configuration de référence du blindage

En accord avec le paragraphe 3.3 de la CEI 61094-1:2000, la tension à circuit ouvert doit être mesurée aux bornes électriques du microphone quand il est fixé sur un support comportant la configuration de référence du blindage, en utilisant la technique de la tension insérée décrite en 5.3 ci-dessus. Les spécifications de la configuration de référence du blindage pour les microphones étalons de laboratoire sont données dans la CEI 61094-1:2000.

La configuration appropriée de référence du blindage doit être appliquée aux deux microphones couplés, émetteur et récepteur, pendant l'étalonnage, et le blindage doit être connecté au potentiel de la masse.

Si une autre configuration est utilisée, les résultats de l'étalonnage doivent se référer à la configuration de référence du blindage.

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

6.4 Distribution de la pression sur la membrane

La définition de l'efficacité en pression suppose que la pression acoustique est appliquée uniformément sur la membrane. La tension de sortie d'un microphone pour une distribution de pression non uniforme sur la surface de la membrane sera différente de la tension de sortie du microphone pour une distribution de pression uniforme de même valeur moyenne, car habituellement le microphone est plus sensible à la pression acoustique appliquée au centre de la membrane. Cette différence variera pour des microphones présentant des non-uniformités différentes de la distribution de la tension de la membrane.

Pour des coupleurs cylindriques, comme ceux qui sont décrits dans l'Annexe C, il existe à la fois un mode longitudinal et un mode radial de propagation (aussi bien symétrique qu'asymétrique). A cause de la propagation radiale, une pression acoustique non uniforme sera appliquée sur la membrane. Ce mode de propagation sera excité quand le fonctionnement de la source est différent de celui d'un véritable piston couvrant entièrement la base du coupleur ou quand l'ensemble microphone-coupleur ne forme pas un cylindre droit parfait. De plus, un mode radial asymétrique de propagation est aussi produit par le microphone émetteur à cause d'imperfections dans la géométrie de l'ensemble membrane/plaque arrière ou dans la tension de la membrane et son homogénéité.

Pendant un étalonnage, il est recommandé que la distribution de pression acoustique sur la surface de la membrane soit uniforme à mieux que $\pm 0,1$ dB près. Toutefois, il est difficile de maîtriser cette condition sur une installation réelle à cause de l'imperfection géométrique des microphones et des coupleurs. Bien que le mode de propagation radial ne puisse jamais être évité puisque la distribution des vitesses de la membrane du microphone émetteur diffère de celle d'un véritable piston, les coupleurs ayant le même diamètre que celui de la membrane du microphone présenteront la plus petite proportion de mode radial et se montreront moins sensibles aux imperfections géométriques que les coupleurs de plus grands diamètres.

Cependant, lorsqu'il est nécessaire d'effectuer un étalonnage de grande exactitude aux fréquences élevées, il peut être préférable d'utiliser plusieurs coupleurs de différentes dimensions pour évaluer l'efficacité réelle des microphones et pour appliquer une correction établie théoriquement concernant les effets de la propagation radiale.

6.5 Influence des conditions d'environnement

6.5.1 Pression statique

La résistance et la masse acoustiques du gaz situé entre la membrane et la plaque arrière, l'élasticité de la cavité située derrière la membrane et par conséquent l'efficacité en pression d'un microphone, dépendent de la pression statique. Cette dépendance est fonction de la fréquence. Elle peut être déterminée pour le microphone en essai en effectuant des étalonnages par réciprocité à différentes pressions statiques.

L'Annexe D contient des informations concernant l'influence de la pression statique sur l'efficacité en pression des microphones étalons de laboratoire à condensateur.

6.5.2 Température

La résistance acoustique et la masse du gaz situé entre la membrane et la plaque arrière et par conséquent l'efficacité en pression d'un microphone dépendent de la température. De plus, les dimensions géométriques du microphone dépendent de la température et l'efficacité du microphone dépend de la tension mécanique de la membrane et de la distance entre la membrane et la plaque arrière. L'effet total de ces causes est fonction de la fréquence. La dépendance combinée peut être déterminée pour le microphone en essai en effectuant des étalonnages par réciprocité à différentes températures.

L'Annexe D contient des informations concernant l'influence des variations de température sur l'efficacité en pression des microphones étalons de laboratoire à condensateur.

NOTE Si un microphone est exposé à des variations de température excessives, son efficacité peut être modifiée de manière permanente.

6.5.3 Humidité

Bien que l'état thermodynamique de l'air enfermé dans la cavité située à l'arrière de la membrane du microphone dépende légèrement de l'humidité, aucune influence sur l'efficacité n'a jamais été observée pour les microphones étalons de laboratoire, à condition qu'il n'y ait pas de condensation.

NOTE Certaines conditions peuvent influencer la stabilité de la tension de polarisation et de la charge électrique de la plaque arrière et donc influencer sur la sensibilité. Par exemple, la résistance de surface du matériau isolant entre la plaque arrière et le boîtier du microphone peut être dégradée dans des conditions d'humidité excessives, particulièrement si le matériau est contaminé (voir aussi 7.3.3.3). La résistance de surface a un effet notable sur l'efficacité du microphone aux basses fréquences, spécialement sur la réponse en phase.

6.5.4 Migration vers les conditions ambiantes de référence

Pour donner les résultats d'un étalonnage, il est recommandé que l'efficacité en pression soit ramenée dans les conditions ambiantes de référence si l'on dispose de données fiables concernant les corrections.

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

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

7 Composantes d'incertitude d'étalonnage

7.1 Généralités

En plus des facteurs qui affectent l'efficacité en pression mentionnés à l'Article 6, des composantes d'incertitude supplémentaires sont introduites par la méthode, l'équipement et le niveau de précaution pris au moment de l'étalonnage. Les facteurs qui affectent l'étalonnage réalisé selon un processus connu doivent être mesurés ou calculés avec un niveau d'exactitude aussi élevé que possible, de façon à minimiser leur influence sur l'incertitude totale qui en résulte.

7.2 Impédance électrique de transfert

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour mesurer l'impédance électrique de transfert avec l'exactitude nécessaire et aucune préférence n'est donnée à l'une d'elles.

Le courant traversant le microphone émetteur est habituellement déterminé en mesurant la tension aux bornes d'une impédance étalonnée placée en série avec le microphone émetteur. Afin de garantir une détermination correcte du courant, la configuration de référence du blindage, voir 6.3, doit être appliquée au microphone émetteur. L'étalonnage de l'impédance en série doit prendre en compte l'ensemble des capacités des câbles ainsi que les impédances de charge présentes lors de la mesure de la tension aux bornes de l'impédance. Cette méthode permet de déterminer l'impédance électrique de transfert au moyen d'un rapport de tension et d'une impédance en série étalonnée.

La tension utilisée pour exciter le microphone émetteur doit être telle que les harmoniques provenant de la source elle-même, ou engendrés par le microphone, aient un effet sur l'incertitude de la détermination de l'efficacité en pression qui soit petit en comparaison de l'incertitude aléatoire.

Le bruit ou toute autre cause d'interférence telle que la diaphonie, qu'elle soit d'origine acoustique ou autre, ne doit pas affecter indûment la détermination de l'efficacité en pression.

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

NOTE 2 La diaphonie peut être mesurée en remplaçant le microphone récepteur par un microphone factice présentant la même capacité et géométrie externe que le microphone récepteur et en déterminant ensuite la différence qui en résulte dans l'impédance électrique de transfert. Il convient de placer le coupleur et les microphones comme pendant un étalonnage. Autrement, la diaphonie peut être déterminée en réglant la tension de polarisation à zéro pendant l'étalonnage. Dans les deux méthodes, des techniques sélectives en fréquence sont recommandées.

7.3 Impédance acoustique de transfert

7.3.1 Généralités

Plusieurs facteurs influent sur l'impédance acoustique de transfert mais la plus grande source d'incertitude dans sa détermination provient souvent des paramètres des microphones, en particulier pour les coupleurs de petites dimensions.

7.3.2 Propriétés des coupleurs

7.3.2.1 Dimensions des coupleurs

La forme et les dimensions des cavités de couplage doivent être choisies de sorte que 6.4 soit satisfait. Tant que la plus grande dimension du coupleur est petite par comparaison à la longueur d'onde du son dans le gaz, la pression acoustique sera pratiquement uniforme dans le coupleur et indépendante de sa forme. Aux fréquences élevées et pour les grands coupleurs, cette prescription peut être satisfaite en remplissant la cavité avec de l'hélium ou de l'hydrogène.

L'incertitude sur les dimensions du coupleur affecte l'impédance acoustique de transfert de quantités différentes variant avec la fréquence. Elle influe également sur les corrections de conduction thermique des parois et de fuite capillaire.

Des exemples de coupleurs sont donnés dans l'Annexe C.

NOTE 1 Il convient de construire les coupleurs cylindriques utilisés dans une gamme de fréquences où les dimensions ne sont pas petites en comparaison de la longueur d'onde avec les plus grandes précautions de façon que des modes acoustiques asymétriques ne soient pas excités.

NOTE 2 L'influence d'une distribution de pression acoustique asymétrique peut être mise en évidence en changeant les positions relatives du coupleur et des microphones, par exemple en faisant tourner chaque microphone autour de son axe d'un incrément donné. Si un tel changement modifie l'impédance électrique de transfert, il convient que cet effet soit pris en compte lors de l'estimation de l'incertitude.

NOTE 3 Si le coupleur est rempli avec un autre gaz que l'air, il convient que des précautions soient prises pour éviter une diffusion du gaz dans la cavité située à l'arrière de la membrane du microphone, en assurant l'étanchéité de la surface de contact au moyen d'une fine couche de graisse. Si une diffusion du gaz a lieu dans la cavité arrière, au travers de la membrane ou d'une autre manière, le microphone ne peut pas être étalonné par cette méthode puisque son efficacité est modifiée de manière imprévisible.

7.3.2.2 Pertes par conduction thermique et viscosité

La correction pour les pertes provenant de la conduction thermique et de la viscosité doit être calculée à partir des équations données dans l'Annexe A pour des coupleurs cylindriques dont les dimensions sont à l'intérieur des domaines donnés dans l'Annexe C. Dans les calculs, le volume total du coupleur est compris comme la somme du volume géométrique du coupleur et des volumes des cavités frontales des microphones couplés. De même, l'aire de la surface totale est comprise comme la somme de l'aire des parois du coupleur et de l'aire des parois des cavités frontales des microphones couplés.

7.3.2.3 Tube capillaire

Si des tubes capillaires sont utilisés, l'impédance acoustique doit être calculée à partir des équations données dans l'Annexe B. Des tubes capillaires longs et étroits sont recommandés afin de minimiser l'effet de l'incertitude sur les dimensions des tubes. Le facteur de correction pour les tubes capillaires est calculé à partir de l'équation (6) de 5.6.

7.3.2.4 Grandeurs physiques

L'impédance acoustique de transfert dépend de certaines grandeurs physiques décrivant les propriétés du gaz enfermé dans le coupleur. Ces grandeurs dépendent des conditions d'environnement telles que la pression statique, la température et l'humidité. Les valeurs des grandeurs physiques et leurs variations en fonction des conditions d'environnement sont données dans l'Annexe F pour l'air humide.

L'incertitude résultante sur ces grandeurs est une combinaison des incertitudes sur les équations données dans l'Annexe F et de l'incertitude sur la mesure des conditions d'environnement.

7.3.3 Paramètres des microphones

7.3.3.1 Cavité frontale

Un microphone étalon de laboratoire à condensateur possède, en avant de la membrane, une cavité frontale.

Dans l'équation (3), le volume de la cavité frontale constitue une partie du volume géométrique total V du coupleur. Dans l'équation (4), les profondeurs des cavités frontales influent de manière similaire sur la longueur l_0 du coupleur. A cause des tolérances de fabrication, le volume et la profondeur de la cavité frontale doivent être déterminés individuellement pour chaque microphone étalonné quand on utilise un coupleur d'étalonnage en ondes planes (voir Annexe E).

On observe généralement que le volume mesuré pour la cavité frontale est différent du volume calculé à partir de l'aire de la section droite S_0 du coupleur et de la profondeur de la cavité frontale. Cela est dû au fait que le diamètre de la cavité frontale peut légèrement différer du diamètre du coupleur, que la cavité frontale peut avoir un taraudage pratiqué sur sa paroi interne qui fait que le diamètre de cette cavité est mal défini et qu'il peut y avoir un espace d'air annulaire supplémentaire, relié à la cavité et localisé à la périphérie de la membrane du microphone. Le volume excédentaire de la cavité, défini comme la différence entre le volume réel de la cavité frontale et le volume calculé à partir de l'aire de la section droite S_0 du coupleur et la profondeur de la cavité, doit être considéré comme une impédance terminale additionnelle dans l'utilisation de l'équation (4). Ceci peut être fait en posant $Z_{a,1}$ et $Z_{a,2}$ comme étant l'impédance équivalente du montage en parallèle de l'impédance acoustique du microphone et de l'impédance due au volume excédentaire.

NOTE 1 Dans certains cas, le volume excédentaire peut être négatif.

NOTE 2 Pour les cavités frontales possédant un taraudage interne, la surface plus grande qui en résulte produit une augmentation de la conduction thermique qui modifie l'impédance acoustique de transfert. Si cet effet est négligé dans le calcul de l'impédance acoustique de transfert, il convient d'augmenter en conséquence la composante d'incertitude correspondante.

7.3.3.2 Impédance acoustique

L'impédance acoustique du microphone est fonction de la fréquence et est principalement déterminée par les propriétés de la membrane tendue, de l'air enfermé dans la cavité située derrière la membrane et de la géométrie de la plaque arrière. En première approximation, l'impédance acoustique peut être exprimée sous forme d'un circuit série composé d'une élasticité, d'une masse et d'une résistance. Ce circuit peut aussi être décrit par une élasticité, une fréquence de résonance et un facteur de perte. L'élasticité est souvent donnée sous forme de la partie réelle en basse fréquence du volume équivalent du microphone (voir 6.2.2 de la CEI 61094-1:2000).

Aux très basses fréquences, la conduction thermique dans la cavité située derrière la membrane provoque une augmentation du volume équivalent du microphone qui peut atteindre 5 % pour les microphones du type LS1.

L'impédance acoustique Z_a de chaque microphone constitue une partie importante de l'impédance acoustique de transfert $Z_{a,12}$ du système et des erreurs dans la détermination de

Z_a influent d'une manière compliquée sur l'exactitude de l'étalonnage, particulièrement aux fréquences élevées.

Des méthodes de détermination de l'impédance acoustique sont décrites dans l'Annexe E.

NOTE L'exactitude avec laquelle il est nécessaire de mesurer les paramètres des microphones dans le but d'obtenir une incertitude globale fixée dépend du coupleur utilisé et de la fréquence.

7.3.3.3 Tension de polarisation

Dans le but de déterminer la tension de polarisation, on peut prévoir un dispositif pour mesurer cette tension directement aux bornes du microphone. Cela est important quand la tension de polarisation est délivrée par une source possédant une impédance élevée, à cause de la résistance d'isolement finie du microphone. D'une autre manière, on peut mesurer la résistance d'isolement du microphone 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 à la sortie basse impédance de la source de tension de polarisation soient valables.

7.4 Imperfection de la théorie

La mise en pratique du théorème de réciprocité et l'expression de l'impédance acoustique de transfert sont basées sur des hypothèses de comportement idéal des microphones, du champ acoustique dans le coupleur, du mouvement des membranes du microphone et de la géométrie des coupleurs une fois fermés par les microphones. Des exemples de cas où ces hypothèses ne sont pas entièrement respectées sont les suivantes:

- Des imperfections à petite échelle dans le microphone émetteur peuvent conduire à des propagations de modes asymétriques qui ne peuvent pas être pris en compte;
- Les microphones peuvent ne pas être réciproques. Cet effet peut être réduit en ne combinant que des microphones de même modèle;
- Les corrections de propagation des modes radiaux, si elles sont appliquées, sont basées sur des mouvements idéaux des membranes des microphones ou sur des données empiriques;
- Le volume excédentaire de la cavité frontale du microphone (voir 7.3.3.1) peut ne pas être appliqué correctement;
- Une représentation de l'impédance acoustique d'un microphone à l'aide d'un modèle à constantes localisées n'est qu'une approximation de l'impédance réelle;
- Les pertes par viscosité le long des parois du coupleur ont été estimées à l'aide d'une théorie approchée. De plus, les effets des pertes provenant du taraudage interne de la cavité frontale et de la rugosité des surfaces ne sont pas pris en compte. Ceci affectera l'impédance acoustique de transfert aux fréquences élevées.

7.5 Incertitude sur le niveau d'efficacité en pression

Il convient que l'incertitude sur le niveau d'efficacité en pression soit déterminée en accord avec le Guide ISO/CEI 98-3. Quand on exprime les résultats d'un étalonnage, il convient que l'incertitude – en fonction de la fréquence – soit donnée comme une *incertitude de mesure élargie* en utilisant un *facteur d'élargissement* $k = 2$.

A cause de la complexité de l'expression finale de l'efficacité en pression dans l'équation (7), l'analyse de l'incertitude de l'impédance acoustique de transfert est habituellement effectuée en recommençant les calculs après avoir modifié une à une les différentes composantes en y ajoutant l'incertitude associée. La différence des résultats par rapport à des composantes inchangées est alors utilisée pour déterminer l'incertitude-type relative à ces composantes.

Le Tableau 1 recense une liste de composantes affectant l'incertitude d'un étalonnage. Pour un système d'étalonnage donné, toutes ces composantes peuvent ne pas être pertinentes puisque des méthodes différentes sont utilisées pour mesurer l'impédance électrique de transfert, pour déterminer les paramètres des microphones et pour le couplage des microphones.

Tableau 1 – Composantes d'incertitude

Grandeur mesurée	Paragraphe concerné
Impédance électrique de transfert	
Impédance en série	7.2
Rapport de tension	7.2
Diaphonie	7.2
Bruit propre et bruit ambiant	7.2
Distorsion	7.2
Fréquence	7.2
Blindage du récepteur	6.3
Blindage de l'émetteur	6.3; 7.2
Propriétés des coupleurs	
Longueur du coupleur	7.3.2.1
Diamètre du coupleur	7.3.2.1
Volume du coupleur	7.3.2.1; 7.3.2.2
Surface des parois du coupleur	7.3.2.1; 7.3.2.2
Fuite fortuite entre le coupleur et le microphone	
Dimensions du tube capillaire	7.3.2.3
Pression statique	7.3.2.4
Température	7.3.2.4
Humidité relative	7.3.2.4
Paramètres du microphone	
Profondeur de la cavité frontale	7.3.3.1
Volume de la cavité frontale	7.3.3.1
Volume équivalent	7.3.3.2
Fréquence de résonance	7.3.3.2
Facteur de perte	7.3.3.2
Elasticité de la membrane	7.3.3.2
Masse de la membrane	7.3.3.2
Résistance de la membrane	7.3.3.2
Conduction thermique additionnelle due au taraudage de la cavité frontale	7.3.3.1
Tension de polarisation	6.5.3; 7.3.3.3
Imperfection de la théorie	
Théorie de la conduction thermique	Annexe A
Addition du volume excédentaire	7.3.3.1; 7.4
Pertes par viscosité	7.4
Mode de propagation radial	6.4; 7.3.2.1, 7.4
Traitement des résultats	
Erreur d'arrondissement	
Répétabilité des mesures	
Correction de pression statique	6.5; Annexe D
Corrections de température	6.5; Annexe D

Les composantes d'incertitudes données dans le Tableau 1 sont généralement fonction de la fréquence et doivent être données sous forme d'incertitude type. Il convient que les composantes d'incertitude soient exprimées à partir des équations entre grandeurs mais une forme logarithmique est également acceptable puisque les valeurs sont très petites et que l'incertitude élargie obtenue par l'une ou l'autre méthode sera essentiellement la même.

Annexe A (normative)

Conduction thermique et pertes par viscosité dans une cavité close

A.1 Généralités

Dans une cavité close, la conduction thermique entre les parois et l'air a pour conséquence un passage graduel des conditions adiabatiques aux conditions isothermes. La nature exacte de cette transition dépend de la fréquence d'étalonnage et des dimensions du coupleur. En outre, des pertes par viscosité proviennent de la vitesse des particules le long des parois du coupleur. La pression acoustique produite par le microphone émetteur, c'est-à-dire par une source ayant un flux de vitesse constant, changera en conséquence. Deux approches pour déterminer la pression acoustique résultante sont données:

- Une solution basse fréquence basée sur la seule conduction thermique applicable aux coupleurs de grand volume et aux coupleurs en ondes planes dans le domaine de fréquences où la propagation des ondes peut être négligée.
- Une solution large bande applicable uniquement aux coupleurs en ondes planes prenant en compte à la fois la conduction thermique et les pertes par viscosité.

Des coupleurs en ondes planes et des coupleurs de grand volume sont décrits dans l'Annexe C.

A.2 Solution basse fréquence

Aux basses fréquences, où on peut faire l'hypothèse que la pression acoustique est la même en tous les points de la cavité, l'effet peut être considéré comme un accroissement apparent du volume du coupleur exprimé par un facteur correctif complexe Δ_H à appliquer au volume géométrique V dans l'équation (3).

Le facteur correctif est donné par:

$$\Delta_H = \frac{\kappa}{1 + (\kappa - 1) \underline{E}_V} \quad (\text{A.1})$$

où \underline{E}_V est la fonction de transfert complexe de température définie comme le rapport de la moyenne spatiale de la variation sinusoïdale de température associée à la pression acoustique à la variation sinusoïdale de température qui serait produite si les parois du coupleur étaient parfaitement isolantes. On trouve dans [A.1]² des valeurs tabulées de \underline{E}_V en fonction des paramètres R et X , où:

R est le rapport de la longueur du coupleur à son diamètre;

$$X = fl^2 / (\kappa \alpha_t);$$

f est la fréquence en hertz (Hz);

l est le rapport du volume du coupleur à sa surface en mètre (m);

α_t est la diffusivité thermique du gaz à l'intérieur de la cavité en mètre carré par seconde ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Des valeurs de \underline{E}_V pour quelques valeurs de R et de X sont données dans le Tableau A.1. Les valeurs données sont considérées comme exactes à 0,000 01 près.

² Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article A.4.

Pour des coupleurs cylindriques dont les dimensions sont à l'intérieur des domaines décrits dans l'Annexe C, l'approximation de la quantité complexe \underline{E}_V donnée ci-dessous entraînera des erreurs inférieures à 0,01 dB aux fréquences supérieures à 20 Hz.

$$\underline{E}_V = 1 - \underline{S} + D_1 \underline{S}^2 + (3/4)\sqrt{\pi} D_2 \underline{S}^3 \tag{A.2}$$

où

$$\underline{S} = \left[-j \frac{1}{2\pi X} \right]^{1/2} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi X}}$$

$$D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi(2R+1)^2}$$

$$D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi}(2R+1)^3}$$

Le module de \underline{E}_V , calculé à partir de l'équation (A.2) est exact à 0,01 % près pour $0,125 < R < 8$ et pour $X > 5$.

Tableau A.1 – Valeurs pour \underline{E}_V

Partie réelle de \underline{E}_V			X	Partie imaginaire de \underline{E}_V		
R = 0,2	R = 0,5	R = 1		R = 0,2	R = 0,5	R = 1
0,721 27	0,719 96	0,720 03	1,0	0,240 38	0,223 23	0,221 46
0,800 92	0,801 22	0,801 28	2,0	0,177 22	0,169 86	0,168 85
0,837 27	0,837 51	0,837 54	3,0	0,148 18	0,143 04	0,142 36
0,859 07	0,859 20	0,859 22	4,0	0,130 03	0,126 14	0,125 63
0,873 93	0,874 02	0,874 03	5,0	0,117 32	0,114 21	0,113 80
0,893 43	0,893 48	0,893 49	7,0	0,100 30	0,098 07	0,097 77
0,910 82	0,910 86	0,910 86	10,0	0,084 77	0,083 21	0,083 00
0,936 93	0,936 94	0,936 94	20,0	0,060 86	0,060 07	0,059 97
0,948 50	0,948 51	0,948 51	30,0	0,050 02	0,049 50	0,049 42
0,955 40	0,955 41	0,955 41	40,0	0,043 49	0,043 10	0,043 04
0,963 58	0,963 59	0,963 59	60,0	0,035 68	0,035 41	0,035 38
0,968 46	0,968 46	0,968 46	80,0	0,030 98	0,030 78	0,030 76
0,971 79	0,971 79	0,971 79	100,0	0,027 76	0,027 61	0,027 58
0,980 05	0,980 05	0,980 05	200,0	0,019 72	0,019 64	0,019 63
0,985 90	0,985 90	0,985 90	400,0	0,013 99	0,013 95	0,013 95
0,990 03	0,990 03	0,990 03	800,0	0,009 92	0,009 90	0,009 89

Les deux premiers termes de l'équation (A.2) constituent une approximation qui peut être utilisée pour des coupleurs qui ne sont pas des cylindres droits à base circulaire.

Quand des étalonnages sont effectués à des fréquences inférieures à 20 Hz avec les coupleurs décrits dans l'Annexe C, la solution valable pour tout le domaine des fréquences donnée en [A.1] doit être utilisée ou bien la composante d'incertitude correspondante doit être augmentée en conséquence.

A.3 Solution large bande

Aux fréquences élevées, quand les pertes par viscosité sont présentes en plus des pertes thermiques, l'effet de la viscosité est de réduire l'aire de la section droite effective du coupleur à cause de la couche limite au voisinage de la surface et, dans le même temps, d'augmenter la longueur effective du coupleur à cause de la diminution de la célérité du son. Aux basses fréquences et pour les coupleurs décrits à l'Annexe C, ces deux derniers effets se compensent alors que la conduction thermique reste. Les effets combinés de la conduction thermique et des pertes par viscosité pour la propagation du son dans des tubes cylindriques sont déduits de [A.2] basée sur la théorie de Kirchhoff.

Les expressions complexes du coefficient de propagation et de l'impédance acoustique d'un coupleur à utiliser dans l'équation (4) sont:

$$\underline{\gamma} = j \frac{\omega}{c} \left(1 + \frac{1-j}{\sqrt{2}} \frac{1}{a} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega \rho}} + (\kappa-1) \sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}} \right) \right) \quad (\text{A.3})$$

$$\underline{Z}_{a,0} = \frac{\rho c}{S_0} \left(1 + \frac{1-j}{\sqrt{2}} \frac{1}{a} \left(\sqrt{\frac{\eta}{\omega \rho}} - (\kappa-1) \sqrt{\frac{\alpha_t}{\omega}} \right) \right) \quad (\text{A.4})$$

où

η est la viscosité du gaz en pascal-seconde (Pa·s);

a est le rayon du coupleur en mètre (m).

Des valeurs de c , η , ρ et α_t pour l'air humide peuvent être tirées des équations données dans l'Annexe F.

En plus des pertes sur les parois cylindriques envisagées ci-dessus, des pertes thermiques apparaissent sur les surfaces des bases. Ces pertes peuvent être prises en compte au moyen d'une admittance $1/\underline{Z}_{a,h}$ ajoutée à l'admittance de chaque microphone dans l'équation (4), voir [A.3].

$$\frac{1}{\underline{Z}_{a,h}} = \frac{S_0}{\rho c} \frac{1+j}{\sqrt{2}} (\kappa-1) \frac{1}{c} \sqrt{\alpha_t \omega} \quad (\text{A.5})$$

Si un microphone comporte un taraudage interne de la cavité frontale, la conduction thermique supplémentaire due à la surface du taraudage peut être prise en compte en ajoutant la surface du taraudage à l'aire de la section droite S_0 dans l'équation (A.5), voir [A.4].

Les équations (A.3) – (A.4) sont valides dans le domaine de fréquences donné par $\omega \rho a^2 > 100 \eta$. Ceci correspond à des fréquences supérieures à 3 Hz et 12 Hz pour les cavités en ondes planes données dans le Tableau C.1 pour des microphones de type LS1P et LS2aP respectivement.

A.4 Documents de référence

- [A.1] GERBER, H. *Acoustic properties of fluid-filled chambers at infrasonic frequencies in the absence of convection*, Journal of Acoustical Society of America 36, 1964, pp. 1427-1434
- [A.2] ZWIKKER, C. and KOSTEN, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter II, § 4

- [A.3] MORSE, P.M. and INGARD, K.U. *Theoretical Acoustics*, 1968. McGraw-Hill, New York. Chapters 6.4 and 9.2
- [A.4] FREDERIKSEN, E. *Reduction of Heat Conduction Error in Microphone Pressure Reciprocity Calibration*. Brüel & Kjær Technical Review, 1, 2001. pp14-23

Annexe B (normative)

Impédance acoustique d'un tube capillaire

B.1 Généralités

L'impédance acoustique $\underline{Z}_{a,C}$ à l'entrée d'un tube capillaire ouvert est déterminée par la théorie des lignes de transmission, voir 5.6:

$$\underline{Z}_{a,C} = \underline{Z}_{a,t} \tanh \underline{\gamma} l_C \quad (\text{B.1})$$

Entre $\underline{Z}_{a,t}$ et $\underline{\gamma}$, il existe les relations (voir [B.1]³):

$$\underline{\gamma} \underline{Z}_{a,t} = j \frac{\omega \rho}{\pi a_t^2} \left[1 - \frac{2 J_1(\underline{k} a_t)}{\underline{k} a_t J_0(\underline{k} a_t)} \right]^{-1} \quad (\text{B.2})$$

et

$$\frac{\underline{\gamma}}{\underline{Z}_{a,t}} = j \omega \frac{\pi a_t^2}{\rho c^2} \left[1 + \frac{2}{B \underline{k} a_t} (\kappa - 1) \frac{J_1(B \underline{k} a_t)}{J_0(B \underline{k} a_t)} \right] \quad (\text{B.3})$$

où

$J_0(\)$, $J_1(\)$ sont les fonctions de Bessel de première espèce à argument complexe d'ordres 0 et 1 respectivement;

a_t est le rayon du tube en mètre (m);

$\underline{k} = (-j\omega\rho/\eta)^{1/2}$ est le nombre d'onde complexe en mètre à la puissance moins un (m^{-1}),
 $B = (\eta/\rho\alpha_t)^{1/2}$;

η est la viscosité du gaz en pascal-seconde (Pa·s);

ρ est la masse volumique du gaz en kilogramme par mètre cube ($kg \cdot m^{-3}$);

α_t est la diffusivité thermique du gaz en mètre carré par seconde ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Les équations ci-dessus doivent être utilisées pour calculer le facteur correctif Δ_C de l'équation (6).

Les valeurs de c , η , ρ et α_t pour de l'air humide peuvent être calculées à partir des équations de l'Annexe F.

On peut également obturer le tube capillaire sur toute sa longueur par un fil approprié après assemblage des microphones sur le coupleur. Dans ce cas, le facteur correctif Δ_C est égal à 1.

Les expressions données ci-dessus sont calculées pour un tube ayant une section circulaire parfaite et sont fonction de la puissance quatre du rayon du tube. Toutefois dans la pratique, la section intérieure des tubes capillaires n'est pas circulaire et une mesure de débit du tube peut être nécessaire pour connaître le rayon effectif.

³ Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article B.2.

Des valeurs tabulées de la partie réelle et de la partie imaginaire de $Z_{a,C}$, calculées pour les conditions ambiantes de référence, sont données dans les Tableaux B.1 et B.2 en fonction de la fréquence pour des valeurs typiques des paramètres. Les tableaux sont destinés à être utilisés dans le but de vérifier un programme de calcul basé sur les équations B.1 à B.3. Dans un étalonnage réel, il convient d'utiliser les équations ci-dessus en utilisant les valeurs réelles de la température, de la pression statique et d'humidité relative.

Tableau B.1 – Partie réelle de $Z_{a,C}$ en gigapascal-seconde par mètre cube (GPa·s/m³)

Dimensions du tube en mm						
$l_C = 50$			Fréquence Hz	$l_C = 100$		
$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$		$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$
3,015	1,454	0,596	20	6,034	2,911	1,193
3,016	1,455	0,596	25	6,037	2,913	1,194
3,017	1,455	0,596	31,5	6,043	2,917	1,196
3,019	1,456	0,597	40	6,052	2,923	1,199
3,021	1,458	0,598	50	6,066	2,931	1,203
3,026	1,460	0,599	63	6,088	2,946	1,210
3,033	1,464	0,601	80	6,124	2,970	1,222
3,043	1,470	0,604	100	6,178	3,006	1,240
3,060	1,480	0,609	125	6,264	3,063	1,270
3,090	1,496	0,618	160	6,416	3,168	1,323
3,134	1,521	0,632	200	6,638	3,326	1,406
3,204	1,561	0,653	250	6,985	3,589	1,547
3,322	1,628	0,688	315	7,540	4,061	1,815
3,531	1,747	0,749	400	8,355	4,940	2,378
3,868	1,940	0,848	500	9,074	6,287	3,532
4,501	2,310	1,033	630	8,677	7,339	5,629
5,805	3,109	1,433	800	6,378	5,313	4,380
8,331	4,884	2,374	1 000	4,354	3,006	1,928
12,122	9,001	5,376	1 250	3,546	2,127	1,147
9,201	7,936	6,752	1 600	4,171	2,408	1,195
4,332	3,027	1,956	2 000	6,325	4,404	2,523
2,698	1,638	0,894	2 500	4,986	3,723	2,774
2,808	1,579	0,783	3 150	4,412	2,660	1,392
5,917	3,529	1,745	4 000	5,245	4,024	3,079
5,959	4,838	3,917	5 000	5,058	3,258	1,767
3,307	1,940	1,012	6 300	4,580	2,921	1,673
6,581	5,380	4,133	8 000	4,696	3,034	1,751
4,180	2,461	1,257	10 000	4,977	3,360	1,949
3,909	2,545	1,546	12 500	4,765	3,335	2,277
4,047	2,594	1,540	16 000	4,757	3,267	2,142
4,531	2,809	1,516	20 000	4,847	3,322	2,021

NOTE Les valeurs données dans ce tableau ne sont valides que dans les conditions ambiantes de référence (voir l'Article 4 et Tableau F.2).

Tableau B.2 – Partie imaginaire de $Z_{a,c}$ en gigapascal-seconde par mètre cube (GPa·s/m³)

Dimensions du tube en mm

$l_c = 50$			Fréquence Hz	$l_c = 100$		
$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$		$a_t = 0,1667$	$a_t = 0,20$	$a_t = 0,25$
0,097	0,074	0,049	20	0,096	0,114	0,090
0,122	0,092	0,061	25	0,120	0,143	0,112
0,154	0,116	0,077	31,5	0,152	0,180	0,141
0,195	0,147	0,098	40	0,192	0,228	0,180
0,244	0,184	0,123	50	0,240	0,285	0,225
0,307	0,232	0,155	63	0,300	0,359	0,283
0,390	0,295	0,197	80	0,378	0,456	0,361
0,488	0,369	0,246	100	0,467	0,570	0,452
0,611	0,462	0,308	125	0,573	0,711	0,567
0,783	0,592	0,396	160	0,705	0,907	0,731
0,981	0,743	0,496	200	0,829	1,125	0,923
1,230	0,933	0,623	250	0,923	1,383	1,170
1,557	1,186	0,792	315	0,896	1,668	1,502
1,993	1,527	1,021	400	0,488	1,848	1,923
2,513	1,948	1,306	500	-0,676	1,418	2,203
3,192	2,533	1,711	630	-2,737	-0,771	0,932
3,992	3,354	2,325	800	-3,89	-3,149	-2,506
4,287	4,216	3,186	1 000	-3,030	-2,594	-2,129
1,347	3,171	3,733	1 250	-1,381	-1,156	-0,944
-5,328	-4,376	-3,270	1 600	0,430	0,455	0,280
-4,500	-3,769	-2,958	2 000	0,265	0,975	1,222
-1,998	-1,665	-1,281	2 500	-1,700	-1,549	-1,341
0,489	0,241	0,049	3 150	0,204	0,197	0,051
2,431	2,282	1,690	4 000	-1,070	-0,858	-0,516
-2,799	-2,427	-1,945	5 000	0,209	0,437	0,403
0,181	-0,041	-0,193	6 300	-0,071	-0,098	-0,222
-1,231	-0,589	0,227	8 000	-0,041	-0,029	-0,141
0,867	0,637	0,331	10 000	-0,053	0,152	0,209
-0,548	-0,705	-0,769	12 500	-0,281	-0,294	-0,276
-0,217	-0,406	-0,538	16 000	-0,175	-0,187	-0,226
0,426	0,341	0,134	20 000	-0,107	0,000	0,032

NOTE Les valeurs données dans ce tableau ne sont valides que dans les conditions ambiantes de référence (voir l'Article 4 et Tableau F.2).

B.2 Document de référence

- [B.1] ZWIKKER, C. and KOSTEN, C.W. *Sound Absorbing Materials*, 1949. Elsevier, Amsterdam. Chapter II, § 2-3

Annexe C (informative)

Exemples de coupleurs cylindriques pour l'étalonnage des microphones

C.1 Généralités

Le coupleur utilisé dans un étalonnage par réciprocité devrait produire une distribution de pression acoustique uniforme sur les membranes des microphones émetteur et récepteur. Il est particulièrement important que la distribution de pression sur la membrane du microphone récepteur soit aussi uniforme que possible afin de satisfaire à la définition de l'efficacité en pression, voir 3.4 de la CEI 61094-1:2000. En raison de la propagation d'ondes radiales et de l'asymétrie du mouvement de la membrane, cette condition idéale ne peut qu'être approchée. Dans le but d'étendre la gamme de fréquences où le coupleur peut être utilisé (en ne considérant que le mode radial), il est avantageux d'avoir une fréquence de résonance radiale aussi élevée que possible, ce qui entraîne des coupleurs de petit diamètre. Pour des raisons pratiques, il n'est pas indiqué de choisir un diamètre du coupleur inférieur au diamètre des membranes.

Pour un coupleur donné, il est cependant possible d'élever la fréquence de résonance en introduisant dans le coupleur de l'hydrogène ou de l'hélium à la place de l'air (voir 7.3.2). Théoriquement, il est alors possible de multiplier la fréquence supérieure d'utilisation du coupleur par un facteur égal au rapport de la célérité du son dans l'hydrogène (ou l'hélium) à la célérité du son dans l'air. Il faut cependant noter que la célérité de propagation dans la membrane est presque indépendante du gaz du coupleur et n'augmente pas dans le même rapport que la célérité du son dans le gaz remplissant le coupleur.

Une grandeur importante dans un étalonnage par réciprocité utilisant des coupleurs clos est l'impédance acoustique de transfert $Z_{a,12}$ du système complet (voir 5.2 et 5.4) qui doit être connue avec une grande exactitude. Aux fréquences où la longueur d'onde acoustique est grande par rapport aux dimensions du coupleur, la distribution de pression acoustique est uniforme dans tout le coupleur et $Z_{a,12} = Z'_{a,12}$ est déterminée par le volume effectif du coupleur, c'est-à-dire par le volume géométrique du coupleur auquel on ajoute les volumes des cavités frontales et les volumes équivalents des microphones (voir l'équation (3)). Aux fréquences où la longueur d'onde acoustique ne peut plus être considérée comme grande par rapport aux dimensions du coupleur, il y aura propagation et il est difficile d'obtenir une expression théorique pour l'impédance de transfert sauf dans le cas où le coupleur a une forme très simple. L'équation (4) donne l'impédance de transfert $Z_{a,12}$ d'un coupleur cylindrique dont le diamètre est égal au diamètre des membranes des microphones en supposant uniquement des ondes planes dans le coupleur.

Des méthodes de calcul d'impédance de transfert dans d'autres cas ont été développées. Toutefois, dans de tels cas il y a lieu de déterminer également la correction de propagation de façon empirique.

Deux groupes de coupleurs sont utilisés dans la pratique. Des coupleurs en ondes planes dont le diamètre est égal au diamètre des membranes et des coupleurs de grands volumes dont le volume est très grand par rapport aux volumes frontaux et aux volumes équivalents des microphones.

C.2 Coupleurs en ondes planes

Les coupleurs en ondes planes ont un diamètre de cavité égal aux diamètres des cavités frontales des microphones. La longueur des coupleurs, c'est-à-dire la distance entre les membranes, doit être suffisante pour assurer une transmission en ondes planes, mais pas plus grande que le quart de la longueur d'onde. Des cavités de couplage dont le rapport entre

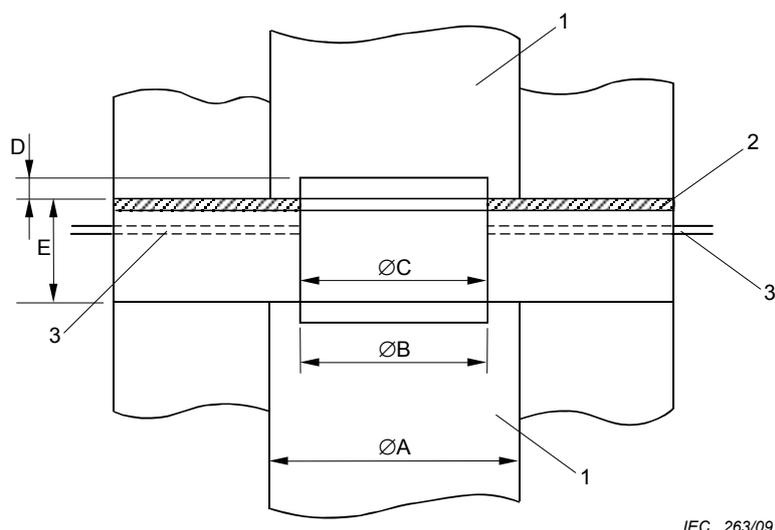
la longueur et le diamètre est compris entre 0,5 et 0,75 sont recommandées. De tels coupleurs permettent l'étalonnage des microphones étalons de laboratoire de type LS1P jusqu'à environ 10 kHz et de type LS2P jusqu'à environ 20 kHz quand ils sont remplis d'air.

Des expressions analytiques peuvent être établies pour déterminer l'influence des modes radiaux symétriques de tels coupleurs, avec l'hypothèse que la fonction de déplacement des membranes des microphones correspondent aux vibrations d'une membrane idéale. [C.2 - C.4]⁴

Un mode radial de propagation asymétrique existe dans les coupleurs. Le mode le plus bas de ces modes asymétriques apparaît dans les coupleurs en ondes planes autour de 10,6 kHz et 21,2 kHz pour les microphones de type LS1 et LS2 respectivement.

Il convient d'utiliser l'équation (4) pour calculer $Z'_{a,12}$ et il est nécessaire de déterminer tous les facteurs influençant $Z_{a,12}$ (voir 7.3), particulièrement l'impédance acoustique des microphones, avec une grande exactitude.

Des dimensions recommandées pour des coupleurs en ondes planes sont données au Tableau C.1 et à la Figure C.1.



IEC 263/09

Légende

- 1 Microphone
- 2 Isolant
- 3 Tubes capillaires

Figure C.1 – Configuration mécanique des coupleurs en ondes planes

⁴ Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article C.4.

Tableau C.1 – Dimensions nominales pour les coupleurs en ondes planes

Dimensions en mm

Dimensions	Microphones étalons de laboratoire		
	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
∅A	23,77	13,2	12,15
∅B	18,6	9,3	9,8
∅C	18,6	9,3	9,8
D	1,95	0,5	0,7
E	3,5 – 9,5	3 – 7	3,5 – 6

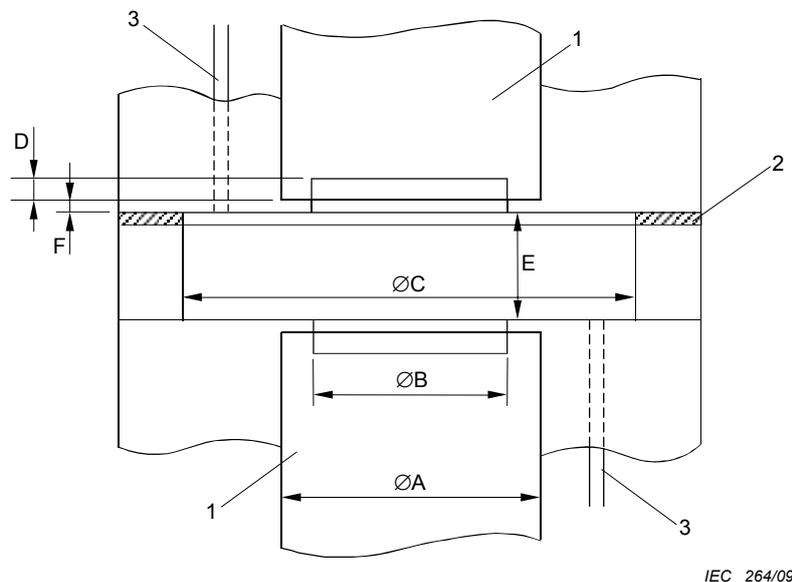
C.3 Coupleurs de grands volumes

Les coupleurs de grands volumes ont un volume plus grand que les coupleurs en ondes planes et les dimensions sont choisies pour qu'une diminution de pression sur la membrane due au mode de propagation radiale soit partiellement compensée par l'accroissement de pression dû au mode de propagation longitudinal. Le rapport optimal entre la longueur et le diamètre est de l'ordre de 0,3 et dépend de la profondeur des cavités frontales des microphones.

De tels coupleurs permettent l'étalonnage des microphones étalons de laboratoire de type LS1P jusqu'à environ 2,5 kHz et de type LS2P jusqu'à environ 5 kHz quand ils sont remplis d'air en utilisant une correction de propagation déterminée empiriquement. Quand une grande exactitude est nécessaire, il est recommandé de déterminer la correction de propagation individuellement pour chaque coupleur utilisé puisque le mode de propagation dans le coupleur est très sensible aux dimensions.

Il convient d'utiliser l'équation (3) pour calculer $Z'_{a,12}$ et il est seulement nécessaire de déterminer la somme du volume de la cavité frontale et du volume équivalent des microphones.

Des dimensions recommandées pour des coupleurs de grands volumes sont données au Tableau C.2 et à la Figure C.2.



IEC 264/09

Légende

- 1 Microphone
- 2 Isolant
- 3 Tubes capillaires

Figure C.2 – Configuration mécanique des coupleurs de grands volumes

Tableau C.2 – Dimensions nominales et tolérances pour les coupleurs de grands volumes

Dimensions en mm

Dimensions	Microphones étalons de laboratoire		
	Type LS1P	Type LS2aP	Type LS2bP
ØA	23,77	13,2	12,15
ØB	18,6	9,3	9,8
ØC	42,88 ± 0,03	18,30 ± 0,03	18,30 ± 0,03
D	1,95	0,5	0,7
E	12,55 ± 0,03	3,50 ± 0,03	3,50 ± 0,03
F	0,80 ± 0,03	0,40 ± 0,03	0,40 ± 0,03

Le Tableau C.3 indique les corrections de propagation pour le coupleur de grand volume utilisé avec les microphones de type LS1P. Ces corrections sont à ajouter au niveau d'efficacité en pression déterminé quand le coupleur est rempli d'air et peuvent être utilisées dans le cas où il n'est pas pratique de déterminer les corrections de propagation pour le coupleur particulier et les microphones utilisés lors d'un étalonnage. Lorsque le coupleur est rempli d'hydrogène, les mêmes corrections peuvent être utilisées à condition que l'échelle des fréquences soit multipliée par un facteur égal au rapport entre la célérité du son dans le mélange ayant la concentration existante en hydrogène et la célérité du son dans l'air.

Tableau C.3 – Corrections de propagation déterminées expérimentalement pour le coupleur de grand volume rempli d'air utilisé avec les microphones de type LS1P

Fréquence Hz	Correction dB
≤ 800	0,000
1 000	-0,002
1 250	-0,013
1 600	-0,034
2 000	-0,060
2 500	-0,087

C.4 Documents de référence

- [C.1] MIURA, H. and MATSUI, E. *On the analysis of the wave motion in a coupler for the pressure calibration of laboratory standard microphones. J. Acoust. Soc. Japan* 30, 1974, pp. 639-646
- [C.2] RASMUSSEN, K. *Radial wave-motion in cylindrical plane-wave couplers. Acta Acustica*, 1, 1993, pp 145-151
- [C.3] GUIANVARC'H, C; DUROCHER, J. N.; BRUNEAU, A.; BRUNEAU, M. *Improved Formulation of the Acoustic Transfer Admittance of Cylindrical Cavities. Acta Acustica united with Acustica*, 92, 2006, pp 345-354
- [C.4] KOSOBRODOV, R. and KUZNETSOV, S. *Acoustic Transfer Impedance of Plane-Wave Couplers, Acta Acustica united with Acustica*, 92, 2006, pp 513-520

Annexe D (informative)

Influence de l'environnement sur l'efficacité des microphones

D.1 Généralités

Cette annexe donne des informations sur l'influence de la pression statique et de la température sur l'efficacité des microphones.

D.2 Relations de base

L'efficacité d'un microphone à condensateur est en principe inversement proportionnelle à l'impédance acoustique du microphone. Dans une représentation à paramètres localisés, l'impédance est donnée par un circuit série formé de l'impédance de la membrane (due principalement à sa masse et à son élasticité) et de l'impédance de l'air enfermé derrière la membrane.

Cette dernière impédance est principalement déterminée par trois éléments:

- le film d'air compris entre la membrane et la plaque arrière introduisant une perte et une masse;
- l'air situé dans les trous ou les fentes de la plaque arrière introduisant une perte et une masse;
- l'air situé dans la cavité derrière la plaque arrière agissant aux fréquences basses comme une élasticité mais introduisant aux fréquences élevées des résonances supplémentaires dues aux propagations dans la cavité.

Les détails de construction du microphone déterminent l'importance relative de ces trois composantes.

La masse volumique et la viscosité de l'air sont considérées comme des fonctions linéaires de la température et/ou de la pression statique. En conséquence, l'impédance acoustique du microphone dépend aussi de la pression statique et de la température. Les coefficients de pression statique et de température qui en résultent pour le microphone sont alors déterminés respectivement par le rapport de l'impédance acoustique dans les conditions ambiantes de référence à l'impédance acoustique à la pression statique et à la température considérées.

D.3 Influence de la pression statique

La masse et l'élasticité de l'air enfermé dans la cavité arrière dépendent toutes les deux de la pression statique alors que la résistance peut être considérée comme indépendante de la pression statique. Le coefficient de pression statique varie généralement en fonction de la fréquence comme indiqué sur la Figure D.1. Pour des fréquences supérieures à environ $0,5 f_0$ (f_0 étant la fréquence de résonance du microphone), la variation en fonction de la fréquence dépend fortement de la propagation dans la cavité située derrière la plaque arrière. En général, le coefficient de variation en pression dépend des détails de construction dans la forme de la plaque arrière et de la cavité arrière et les valeurs réelles peuvent différer considérablement pour deux microphones de fabrications différentes bien que ces microphones puissent appartenir au même type, par exemple LS1P. En conséquence, il n'y a pas lieu d'appliquer les valeurs des coefficients de pression donnés par la Figure D.1 à des microphones particuliers.

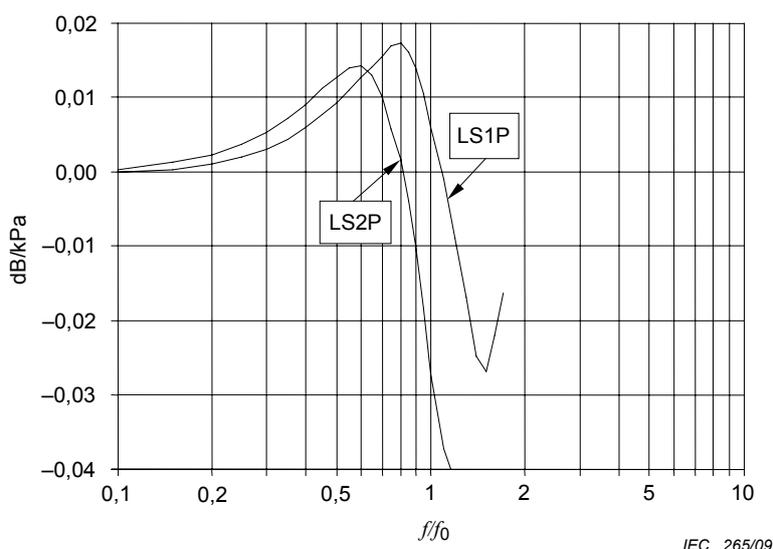


Figure D.1 – Exemples de variation du coefficient de pression statique des microphones de type LS1P et LS2P par rapport à la valeur en basse fréquence en fonction de la fréquence relative f/f_0

La valeur en basse fréquence (typiquement 250 Hz) du coefficient de pression statique est déterminée par la relation entre les élasticités de la membrane elle-même et de l'air enfermé dans la cavité à l'arrière de la membrane. Puisque l'efficacité en pression est déterminée par l'élasticité effective de la membrane qui en résulte, le coefficient de pression statique pour des échantillons particuliers d'un type donné de microphones est étroitement lié à l'efficacité individuelle des microphones aux basses fréquences.

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

Aux très basses fréquences, les conditions isothermes seront prépondérantes dans la cavité située derrière la membrane et par conséquent, l'élasticité de la cavité augmentera. De plus, l'influence du tube d'égalisation des pressions statiques devient significative. A la limite, l'efficacité en pression devient indépendante de la pression statique. Cet effet devient notable aux fréquences en dessous de 2 Hz à 5 Hz pour les microphones de types LS1 et LS2.

D.4 Influence de la température

La masse et la résistance de l'air enfermé dans la cavité arrière dépendent toutes les deux de la température alors que l'élasticité peut être considérée comme indépendante de la température. La variation du coefficient de température en fonction de la fréquence qui en résulte est montrée sur la Figure D.2.

En plus de l'influence sur l'air enfermé dans la cavité arrière, les variations de température affectent aussi les composants mécaniques du microphone. L'effet principal sera généralement une modification de la tension de la membrane et une modification de son élasticité, donc une modification de la distance entre la membrane et la plaque arrière.

Il en résulte une variation de l'efficacité constante dans la gamme de fréquence où l'élasticité est prépondérante et une légère modification de la fréquence de résonance.

Le coefficient de température résultant est une combinaison linéaire de l'influence due à la variation de l'impédance de l'air enfermé dans la cavité arrière et de l'influence due à la modification de la tension mécanique.

La valeur en basse fréquence du coefficient de température se situe généralement entre $\pm 0,005$ dB/K pour les deux types de microphones LS1P et LS2P. Il n'y a pas lieu d'appliquer les valeurs du coefficient de température données par la Figure D.2 à des microphones particuliers.

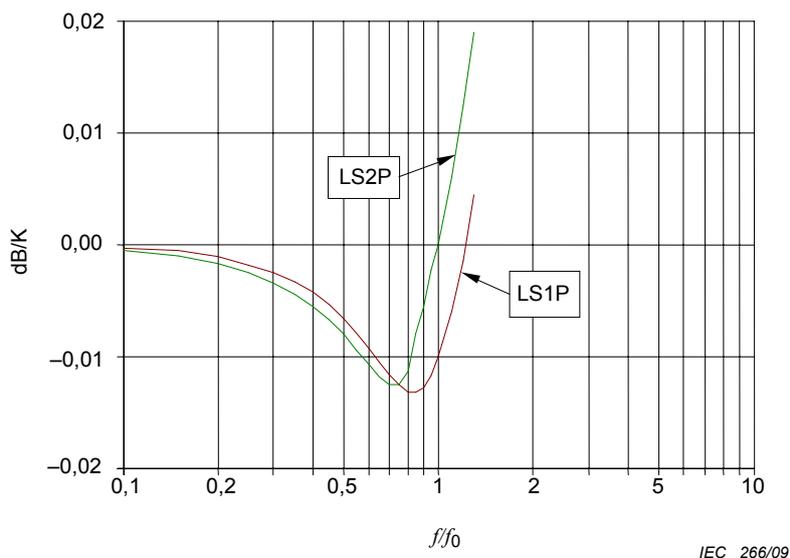


Figure D.2 – Variation générale, en fonction de la fréquence, de la composante du coefficient de température provoquée par les variations de l'impédance acoustique de l'air enfermé dans la cavité arrière, pour les microphones LS1P et LS2P

D.5 Documents de référence

- [D.1] RASMUSSEN, K. *The static pressure and temperature coefficients of laboratory standard microphones*. *Metrologia*, 36, 1999, pp 256-273
- [D.2] KOSOBRODOV, R and KUZNETSOV, S. *Static pressure coefficients of laboratory standard microphones in the frequency range 2 – 250 Hz*. 11th ICSV, 2004. St. Petersburg, Russia, pp 1441 – 1448

Annexe E (informative)

Méthodes de détermination des paramètres des microphones

E.1 Généralités

Cette annexe donne des renseignements concernant des méthodes de détermination des paramètres des microphones qui influent sur l'impédance acoustique de transfert. Ces paramètres sont la profondeur et le volume de la cavité frontale et l'impédance acoustique du microphone.

E.2 Profondeur de la cavité frontale

La profondeur de la cavité frontale est déterminée par des méthodes optiques. Un profil de la profondeur entre la membrane et une bague extérieure peut être obtenu par une technique interférométrique de balayage suivant un diamètre, par exemple en utilisant un faisceau laser. Il y a lieu d'effectuer de telles mesures au moins sur deux diamètres perpendiculaires. Une autre méthode est basée sur l'utilisation d'un microscope de profondeur destiné à mesurer la distance entre des points situés sur le sommet de la bague du microphone et des points situés sur la membrane. Il y a lieu d'effectuer plusieurs mesures réparties sur la membrane et sur le sommet de la bague.

E.3 Volume de la cavité frontale et volume équivalent

Le volume de la cavité frontale aussi bien que le volume équivalent du microphone sont déterminés par des méthodes acoustiques. Il convient que de telles déterminations soient mises en oeuvre autant que possible dans les conditions d'environnement de référence.

Le microphone mesuré est placé sur l'une des voies d'un coupleur à trois voies acoustiques. Deux autres microphones à condensateur sont utilisés, l'un comme émetteur et l'autre comme récepteur. L'impédance électrique de transfert entre ces deux microphones est mesurée alors que le coupleur est fermé successivement par le microphone mesuré et par un certain nombre de cavités de volumes connus couvrant l'étendue des volumes frontaux rencontrés pour les microphones. L'ensemble du volume frontal de la cavité et du volume équivalent du microphone est déterminé par interpolation à partir des valeurs d'impédance électrique de transfert ainsi mesurées.

Une autre méthode consiste à utiliser le microphone testé comme microphone récepteur. Il en résultera généralement un rapport signal sur bruit plus grand quand on mesure l'impédance électrique de transfert. Dans ce cas, différents coupleurs de volumes connus peuvent être utilisés ou des variations de volume peuvent être obtenues en insérant un certain nombre de petites bagues étalonnées entre le coupleur et le microphone mesuré. Il convient que le diamètre intérieur de ces bagues soit égal au diamètre de la cavité frontale du microphone.

Il est important de noter qu'avec les deux méthodes le volume mesuré comprend le volume équivalent correspondant à l'impédance acoustique de la membrane (voir CEI 61094-1).

Les méthodes décrites ci-dessus peuvent être utilisées seulement aux basses fréquences quand le coupleur se comporte comme une élasticité pure. En utilisant la deuxième méthode, il peut être nécessaire de corriger des différences de conduction thermique et de fuite capillaire puisque le volume du coupleur est modifié et de prendre en compte les effets dus à la dégradation du rapport signal sur bruit.

E.4 Impédance acoustique du microphone

L'impédance acoustique peut être exprimée directement par une impédance complexe ou sous forme d'un volume équivalent complexe, voir CEI 61094-1. Moyennant l'hypothèse que le microphone puisse être représenté par un quadripôle électroacoustique comme décrit dans les équations de réciprocité (1a), une représentation par des constantes localisées est possible. Une telle représentation à l'aide de paramètres localisés conduira généralement à une exactitude suffisante pour l'évaluation de \underline{Z}_a (voir 5.4) dans un domaine de fréquence allant jusqu'à environ 1,3 fois la fréquence de résonance du microphone.

Les paramètres équivalents localisés représentant l'impédance acoustique du microphone peuvent être la masse acoustique m_a , l'élasticité acoustique c_a et la résistance acoustique r_a , ou bien la fréquence de résonance f_0 , le volume équivalent en basse fréquence V_{eq} , et le facteur de perte d de la membrane. La fréquence de résonance est la fréquence pour laquelle la partie imaginaire de l'impédance acoustique \underline{Z}_a est nulle. La valeur asymptotique en basse fréquence de \underline{Z}_a détermine l'élasticité et le volume équivalent. A la résonance, la partie réelle de \underline{Z}_a détermine la résistance et le facteur de perte. La masse acoustique est calculée à partir de la fréquence de résonance et de l'élasticité acoustique. Les expressions entre ces paramètres sont:

$$(2\pi f_0)^2 = (m_a \cdot c_a)^{-1} \quad V_{eq} = c_a \cdot \gamma_{ref} \cdot p_{s,ref} \quad d = r_a / (2\pi f_0 \cdot m_a) = r_a \cdot 2\pi f_0 \cdot c_a$$

L'impédance acoustique peut être obtenue par une méthode indirecte basée sur la mesure de l'admittance électrique \underline{Y} du microphone. Pendant les mesures de l'admittance électrique, le microphone est acoustiquement chargé par un tube fermé de longueur égale au quart de la longueur d'onde ($\underline{p} = 0$ dans l'équation (1a)) et l'impédance acoustique du microphone est alors calculée par itération à partir de:

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{e,0} - \underline{Y}^{-1}}{\underline{M}_p^2} \quad (\text{E.1})$$

L'impédance électrique $\underline{Z}_{e,0}$ correspondant à la membrane bloquée peut être déterminée à partir de mesures faites à des fréquences suffisamment élevées (100 kHz à 200 kHz) pour que l'inertie de la membrane évite tout mouvement ($\underline{q} = 0$ dans l'équation (1a)).

Les paramètres localisés représentant l'impédance acoustique du microphone peuvent aussi être déterminés par des méthodes acoustiques. A la résonance, la différence de phase entre la pression acoustique appliquée sur la membrane et la tension de sortie à circuit ouvert sera de 90°. Cette fréquence peut être estimée en excitant la membrane, chargée par un tube fermé de longueur égale au quart de la longueur d'onde, avec un excitateur électrostatique. Dans les mêmes conditions, le facteur de perte peut être déterminé par le rapport entre l'efficacité à la fréquence de résonance et l'efficacité aux fréquences basses.

Une troisième méthode pouvant être utilisée est basée sur un ajustement des données. Comme l'efficacité des microphones ne dépend pas du coupleur utilisé pour l'étalonnage, des étalonnages peuvent être effectués en utilisant un certain nombre de coupleurs en ondes planes, par exemple quatre, de longueurs différentes (voir C.1). Pour chaque microphone, la somme du volume de la cavité frontale et du volume équivalent est ajustée jusqu'à ce que la même efficacité soit obtenue pour tous les coupleurs pour un domaine couvrant les fréquences basses et moyennes. Il s'agit de la même technique que celle décrite en E.3. Des valeurs incorrectes des paramètres localisés décrivant l'impédance du microphone provoquent des variations aux fréquences élevées, dépendant systématiquement de la longueur des coupleurs. La nature des variations est différente pour les trois paramètres. Les pertes ont une très petite influence sur l'efficacité calculée autour de la fréquence de résonance. Alors qu'une fréquence de résonance erronée a une influence maximale. Un volume équivalent erroné influe principalement sur l'efficacité calculée au-dessus de la

fréquence de résonance. Si l'efficacité complexe du microphone est déterminée, la réponse en phase à 90° est trouvée à la fréquence de résonance.

De la même manière, le facteur de perte peut être déterminé comme le rapport de l'efficacité à la fréquence de résonance et de la valeur asymptotique de l'efficacité aux basses fréquences. Cependant, la valeur asymptotique aux basses fréquences doit être estimée à partir de la réponse en basse fréquence en ignorant la légère augmentation de l'efficacité en basse fréquence provoquée par la conduction thermique dans la cavité arrière du microphone. Pour que l'ajustement soit couronné de succès, il est essentiel que les corrections dues à la propagation radiale soient appliquées et que les autres erreurs systématiques, telles que la diaphonie aient été éliminées avant la mise en œuvre de l'ajustement.

Annexe F (informative)

Propriétés physiques de l'air humide

F.1 Généralités

Certaines grandeurs décrivant les propriétés du gaz remplissant le coupleur entrent dans les expressions de calcul de l'efficacité des microphones (voir les équations (3) et (4) et les annexes A et B). Ces grandeurs dépendent d'une ou de plusieurs des variables mesurant les conditions environnementales, pression statique, température et humidité.

Un grand nombre de recherches ont été publiées dans la littérature où des valeurs de référence des grandeurs peuvent être trouvées pour des conditions environnementales spécifiées, par exemple pour de l'air sec à 0 °C et une pression statique de 101,325 kPa. Les procédures de calcul pour les propriétés de l'air dans les conditions environnementales réelles décrites dans cette annexe sont basées sur les procédures recommandées par d'autres organisations internationales et les derniers résultats publiés dans la littérature et ayant fait l'objet d'une acceptation internationale générale.

Les équations données dans cette annexe sont basées sur les variables environnementales mesurées:

- t température en degrés Celsius (°C);
- p_s pression statique en pascals (Pa);
- H taux d'humidité relative en pourcent (%);

et les grandeurs à calculer sont :

- ρ masse volumique de l'air en kilogramme par mètre cube ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- c célérité du son à la fréquence réelle en mètre par seconde ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- κ rapport des capacités thermiques massiques;
- η viscosité de l'air en pascal-seconde (Pa·s);
- α_t diffusivité thermique de l'air en mètre carré par seconde ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

Les procédures de calcul prennent en compte le fait que l'air humide n'est pas un gaz parfait et la plupart des grandeurs sont décrites par des polynômes dont les constantes pertinentes sont données dans le Tableau F.2. Afin d'établir les expressions des grandeurs ci-dessus, les grandeurs supplémentaires suivantes sont utilisées:

- $T = T_0 + t$, température thermodynamique en kelvin (K);
- $T_0 = 273,15 \text{ K}$ (0 °C);
- $T_{20} = 293,15 \text{ K}$ (20 °C);
- $p_{s,r} = 101\,325 \text{ Pa}$;
- $p_{sv}(t)$ pression de vapeur saturante de l'eau en pascals (Pa);
- c_0 célérité du son dans l'air à fréquence nulle en mètre par seconde ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),
- x_w fraction molaire de la vapeur d'eau dans l'air;
- x_c fraction molaire du dioxyde de carbone dans l'air;
- $f(p_s, t)$ facteur d'augmentation;
- Z facteur de compressibilité de l'air humide;
- k_a conductivité thermique en $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

- C_p capacité thermique massique à pression constante en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$;
- f_{rO} fréquence de relaxation de l'oxygène en hertz (Hz);
- f_{rN} fréquence de relaxation de l'azote en hertz (Hz);
- α_{VO} coefficient d'atténuation pour la relaxation vibrationnelle de l'oxygène en mètre à la puissance moins un (m^{-1});
- α_{VN} coefficient d'atténuation pour la relaxation vibrationnelle de l'azote en mètre à la puissance moins un (m^{-1}).

Les équations utilisées pour les calculs sont considérées comme valides dans les domaines suivants de conditions ambiantes:

température	15 °C – 27 °C
pression statique	60 kPa – 110 kPa
taux d'humidité relative	10 % – 90 %

Les incertitudes mentionnées pour les équations sont exprimées sous formes d'incertitudes types.

F.2 Masse volumique de l'air humide

La masse volumique de l'air est calculée par 'l'équation CIPM-2007' recommandée par la 96^{ème} réunion du CIPM, voir [F.1]⁵:

$$\rho = [3,483\,740 + 1,4446(x_c - 0,000\,4)] \times 10^{-3} \frac{p_s}{ZT} (1 - 0,378\,0x_w) \quad (F.1)$$

où

$$Z = 1 - \frac{p_s}{T} \left[a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + (a_3 + a_4 t)x_w + (a_5 + a_6 t)x_w^2 \right] + \frac{p_s^2}{T^2} (a_7 + a_8 x_w^2)$$

$$x_w = \frac{H}{100} \frac{p_{sv}(t)}{p_s} f(p_s, t)$$

$$p_{sv}(t) = \exp(a_0 T^2 + a_1 T + a_2 + a_3 T^{-1})$$

$$f(p_s, t) = a_0 + a_1 p_s + a_2 t^2$$

La composition de l'air standard est basée sur une fraction molaire de dioxyde de carbone de 0,000 314. Il est généralement accepté que, dans des conditions de laboratoire, une valeur plus élevée soit trouvée et qu'en l'absence de mesure réelle, une valeur de $x_c = 0,000\,4$ est recommandée.

L'incertitude relative due à l'équation elle-même est estimée à 22×10^{-6} .

F.3 Célérité du son dans l'air

En l'absence de dispersion, la célérité du son dans l'air pour une fréquence nulle est donnée par la relation, voir [F.2]:

⁵ Les chiffres entre crochets renvoient à l'Article F.8.

$$c_0 = a_0 + a_1t + a_2t^2 + (a_3 + a_4t + a_5t^2)x_w + (a_6 + a_7t + a_8t^2)p_s + (a_9 + a_{10}t + a_{11}t^2)x_c + a_{12}x_w^2 + a_{13}p_s^2 + a_{14}x_c^2 + a_{15}x_w p_s x_c \quad (\text{F.2})$$

L'incertitude relative sur la célérité du son pour une fréquence nulle est estimée à 3×10^{-4} .

NOTE La célérité du son dans l'air dépend légèrement de la fréquence à cause de la dispersion résultant des effets de relaxation parmi les composants de l'air. Dans le domaine de fréquences utilisé dans la présente norme, l'influence de la dispersion sur la célérité du son est inférieure à l'incertitude relative sur la célérité du son pour une fréquence nulle donnée par (F.2). La célérité du son dans l'air à la fréquence réelle des mesures peut être calculée à partir de l'expression, voir [F.4]:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_0} - \sum_n \frac{\alpha_{vn}}{2\pi f_{vn}}$$

où α_v et f_v sont respectivement le coefficient d'atténuation et la fréquence de relaxation pour les effets de relation vibrationnels. La composante de l'air (azote ou oxygène) est symbolisée par l'indice n . Ces valeurs sont calculées à partir de la référence [F.6].

L'équation peut être réécrite sous une forme plus pratique:

$$c = c_0 \left[1 + \sum_n \frac{c \cdot \alpha_{vn}}{2\pi f_{vn}} \right],$$

où le produit $c \cdot \alpha_{vn}$ est indépendant de la célérité du son c .

F.4 Rapport des capacités thermiques massiques de l'air

Le rapport des capacités thermiques massiques est calculé à partir de, voir [F.2]:

$$\kappa = a_0 + a_1t + a_2t^2 + (a_3 + a_4t + a_5t^2)x_w + (a_6 + a_7t + a_8t^2)p_s + (a_9 + a_{10}t + a_{11}t^2)x_c + a_{12}x_w^2 + a_{13}p_s^2 + a_{14}x_c^2 + a_{15}x_w p_s x_c \quad (\text{F.3})$$

L'incertitude relative sur le rapport des capacités thermiques massiques est estimée à $3,2 \times 10^{-4}$.

F.5 Viscosité de l'air

La viscosité de l'air est calculée à partir de, voir [F.5]:

$$\eta = (a_0 + a_1T + (a_2 + a_3T)x_w + a_4T^2 + a_5x_w^2) \times 10^{-8} \quad (\text{F.4})$$

F.6 Diffusivité thermique de l'air

La relation de définition de la diffusivité thermique de l'air est

$$\alpha_t = \frac{k_a}{\rho C_p} \quad (\text{F.5})$$

où

$$k_a = 4186,8 \times [a_0 + a_1T + a_2T^2 + (a_3 + a_4T)x_w] \times 10^{-8}$$

$$C_p = 4186,8 \times [a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + (a_4 + a_5T + a_6T^2)x_w + (a_7 + a_8T + a_9T^2)x_w^2]$$

F.7 Exemples

Le Tableau F.1 donne les valeurs des grandeurs mentionnées dans les Articles F.1 à F.5 pour deux ensembles de données de grandeurs environnementales. Le but des valeurs de ce tableau est de tester les programmes utilisés pour calculer ces grandeurs. En conséquence, les valeurs sont écrites avec plus de décimales que l'utilisation pratique l'exige. Le Tableau F.2 liste les divers coefficients nécessaires pour calculer ces grandeurs.

Tableau F.1 – Valeurs calculées des grandeurs mentionnées dans les Articles F.1 à F.5 pour deux ensembles de conditions environnementales

Conditions environnementales	Masse volumique de l'air ρ kg·m ⁻³	Célérité du son c_0 m·s ⁻¹	Rapport des capacités thermiques massiques κ	Viscosité de l'air η Pa·s	Diffusivité thermique de l'air α_t m ² ·s ⁻¹
$t = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_s = 101\,325 \text{ Pa}$ $H = 50 \text{ \%}$	1,186 084 8	345,866 52	1,400 757 3	$1,826\,566 \times 10^{-5}$	$2,115\,317 \times 10^{-5}$
$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $p_s = 80\,000 \text{ Pa}$ $H = 65 \text{ \%}$	0,944 158 9	344,382 67	1,400 026 6	$1,811\,295 \times 10^{-5}$	$2,627\,024 \times 10^{-5}$

Tableau F.2 – Coefficients utilisés dans les équations pour les propriétés de l'air humide

Coefficients	Pression de vapeur saturante de l'eau	Facteur d'augmentation	Facteur de compressibilité	Célérité du son à fréquence nulle	Rapport des capacités thermiques massiques	Viscosité	Conductivité thermique	Capacité thermique massique à pression constante
Symbole	p_{sv}	$f(p_{sv}, t)$	Z	c_0	κ	η	k_a	C_p
a_0	1,237 884 7 × 10 ⁻⁵	1,000 62	1,581 23 × 10 ⁻⁶	331,502 4	1,400 822	84,986	60,054	0,251 625
a_1	-1,912 131 6 × 10 ⁻²	3,14 × 10 ⁻⁸	-2,933 1 × 10 ⁻⁸	0,603 055	-1,75 × 10 ⁻⁵	7,0	1,846	-9,252 5 × 10 ⁻⁵
a_2	33,937 110 47	5,6 × 10 ⁻⁷	1,104 3 × 10 ⁻¹⁰	-0,000 528	-1,73 × 10 ⁻⁷	7,0	2,06 × 10 ⁻⁶	2,133 4 × 10 ⁻⁷
a_3	-6,343 164 5 × 10 ³		5,707 × 10 ⁻⁶	51,471 935	-0,087 362 9	-1	40	-1,004 3 × 10 ⁻¹⁰
a_4			-2,051 × 10 ⁻⁸	0,149 5874	-0,000 166 5	-3,750 1 × 10 ⁻³	-1,775 × 10 ⁻⁴	0,124 77
a_5			1,989 8 × 10 ⁻⁴	-0,000 782	-3,26 × 10 ⁻⁶	-100,015		-2,283 × 10 ⁻⁵
a_6			-2,376 × 10 ⁻⁶	-1,82 × 10 ⁻⁷	2,047 × 10 ⁻⁸			1,267 × 10 ⁻⁷
a_7			1,83 × 10 ⁻¹¹	3,73 × 10 ⁻⁸	-1,26 × 10 ⁻¹⁰			0,011 16
a_8			-0,765 × 10 ⁻⁸	-2,93 × 10 ⁻¹⁰	5,939 × 10 ⁻¹⁴			4,61 × 10 ⁻⁶
a_9				-85,209 31	-0,119 971 7			1,74 × 10 ⁻⁸
a_{10}				-0,228 525	-0,000 869 3			
a_{11}				5,91 × 10 ⁻⁵	1,979 × 10 ⁻⁶			
a_{12}				-2,835 149	-0,011 04			
a_{13}				-2,15 × 10 ⁻¹³	-3,478 × 10 ⁻¹⁶			
a_{14}				29,179 762	0,045 061 6			
a_{15}				0,000 486	1,82 × 10 ⁻⁶			

F.8 Documents de référence

- [F.1] PICARD, A; DAVIS, R.S.; GLASER, A.M. and FUJII, K. *Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)*. Metrologia 2008, 45, pp 149-155
 - [F.2] CRAMER, O. *Variation of the specific heat ratio and the speed of sound with temperature, pressure, humidity and CO₂ concentration*. J. Acoust. Soc. Am., 93, 1993, pp 2510-2516
 - [F.3] WONG, G.S.K. Comment on *Variation of the specific heat ratio and the speed of sound with temperature, pressure, humidity and CO₂ concentration*. J. Acoust. Soc. Am., 93, 1993, pp 2510-2516". J. Acoust. Soc. Am., 97, pp 3177-3179, 1995
 - [F.4] HOWELL, G.P. and MORFEY, C.L. *Frequency dependence of the speed of sound in air*. J. Acoust. Soc. Am., 82, 1987 pp 375-377
 - [F.5] ZUCKERWAR, A.J. and MEREDITH, R.W. *Low-frequency absorption of sound in air*, J. Acoust. Soc. Am., 78, 1985 pp 946-955
 - [F.6] ISO 9613-1:1993, *Acoustique – Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre – Partie 1: Calcul de l'absorption atmosphérique*
-

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

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
www.iec.ch