

DIN EN 61094-2

ICS 17.140.50; 33.160.50

Ersatz für
DIN EN 61094-2:1994-02

**Elektroakustik –
Messmikrofone –
Teil 2: Primärverfahren zur Druckkammer-Kalibrierung von
Laboratoriums-Normalmikrofonen nach der Reziprozitätsmethode
(IEC 61094-2:2009);
Deutsche Fassung EN 61094-2:2009**

Electroacoustics –
Measurement microphones –
Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the
reciprocity technique (IEC 61094-2:2009);
German version EN 61094-2:2009

Électroacoustique –
Microphones de mesure –
Partie 2: Méthode primaire pour l'étalonnage en pression des microphones étalons de
laboratoire par la méthode de réciprocité (CEI 61094-2:2009);
Version allemande EN 61094-2:2009

Gesamtumfang 40 Seiten

Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI
DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Nationales Vorwort

Diese Norm enthält die deutsche Fassung der europäischen Norm EN 61094-2:2009. Die dieser europäischen Norm zugrunde liegende internationale Norm IEC 61094-2:2009 ist im Technischen Komitee 29 „Electroacoustics“ der IEC (Sekretariat DS, Dänemark) unter deutscher Mitarbeit erstellt worden. Für die deutsche Mitarbeit ist der Gemeinschaftsausschuss NA 001-01-03 GA (NALS/DKE A 3) „Schallmessgeräte“ unter Federführung des NALS zuständig.

Zu den im Inhalt genannten Internationalen Normen und anderen Schriftstücken wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

IEC 61094-1 siehe DIN EN 61094-1

ISO/IEC Guide 98-3 siehe DIN V ENV 13005

Die Deutschen Normen sind in Anhang NA aufgeführt.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 61094-2:1994-02 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Abschnitt 6 wurde überarbeitet, um die Anforderungen des ISO/IEC Guide 98-3 zu erfüllen;
- b) die Theorie der Wärmeleitung in Anhang A (Hinweis auf die vollständige Lösung in der Literatur für sehr tiefe Frequenzen) und die Betrachtung der Reibungsverluste bei höheren Frequenzen wurden verfeinert;
- c) Betrachtungen zu Druck-Koeffizienten für sehr tiefe Frequenzen wurden aufgenommen;
- d) die Fit-Methode zur Bestimmung der akustischen Impedanz von Mikrofonen wurde in Anhang E einbezogen;
- e) Gleichungen und Zahlenwerte samt ihrer relativen Unsicherheit für die Eigenschaften von feuchter Luft in Anhang F wurden unter Einbeziehung neuerer Literatur ergänzt;
- f) einige Gleichungen wurden korrigiert und Zahlenwerte neu berechnet;
- g) Literaturangaben wurden aktualisiert.

Frühere Ausgaben

DIN EN 61094-2: 1994-02

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN V ENV 13005, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*

DIN EN 61094-1:2001-08, *Messmikrofone — Teil 1: Anforderungen an Laboratoriums-Normalmikrofone (IEC 61094-1:2000); Deutsche Fassung EN 61094-1:2000*

Deutsche Fassung

**Elektroakustik —
Messmikrofone —
Teil 2: Primärverfahren zur Druckkammer-Kalibrierung
von Laboratoriums-Normalmikrofonen
nach der Reziprozitätsmethode
(IEC 61094-2:2009)**

Electroacoustics —
Measurement microphones —
Part 2: Primary method
for pressure calibration
of laboratory standard microphones
by the reciprocity technique
(IEC 61094-2:2009)

Électroacoustique —
Microphones de mesure —
Partie 2: Méthode primaire
pour l'étalonnage en pression
des microphones étalons de laboratoire par la
méthode de réciprocité
(CEI 61094-2:2009)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2009-03-01 angenommen. CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäische Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

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

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

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

CENELEC

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

Zentralsekretariat: avenue Marnix 17, B - 1050 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
4 Referenz-Umgebungsbedingungen	5
5 Grundlagen der Druckkammer-Reziprozitätskalibrierung	5
5.1 Allgemeine Grundlagen	5
5.2 Grundgleichungen	6
5.3 Ersatzspannungsverfahren	7
5.4 Berechnung der akustischen Transferimpedanz	7
5.5 Wärmeleitungskorrektur	9
5.6 Kapillarkorrektur	10
5.7 Gleichungen des Druck-Übertragungskoeffizienten	10
6 Einflussgrößen auf den Druck-Übertragungskoeffizienten eines Mikrofons	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Polarisationsspannung	11
6.3 Referenz-Abschirmkonfiguration	11
6.4 Druckverteilung auf der Membran	12
6.5 Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen	12
7 Beiträge zur Unsicherheit der Kalibrierung	13
7.1 Allgemeines	13
7.2 Elektrische Transferimpedanz	13
7.3 Akustische Transferimpedanz	14
7.4 Vereinfachungen bei den Annahmen	16
7.5 Unsicherheit des Druck-Übertragungsmaßes	16
Anhang A (normativ) Wärmeleitung und Verluste aufgrund der Viskosität in einem geschlossenen Hohlraum	18
Anhang B (normativ) Akustische Impedanz eines Kapillarröhrchens	21
Anhang C (informativ) Beispiele zylindrischer Kuppler für die Kalibrierung von Mikrofonen	24
Anhang D (informativ) Umgebungseinflüsse auf den Übertragungskoeffizienten von Mikrofonen	28
Anhang E (informativ) Verfahren zur Ermittlung von Mikrofonparametern	31
Anhang F (informativ) Eigenschaften von feuchter Luft	33
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	38

Vorwort

Der Text des Schriftstücks 29/671/FDIS, zukünftige 2. Ausgabe von IEC 61094-2, ausgearbeitet von dem IEC/TC 29 „Electroacoustics“, wurde der IEC-CENELEC-parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2009-03-01 als EN 61094-2 angenommen.

Diese Europäische Norm ersetzt EN 61094-2:1993.

Gegenüber EN 61094-2:1993 wurden in EN 61094-2:2009 die folgenden wesentlichen inhaltlichen Änderungen vorgenommen:

- Abschnitt 6 wurde überarbeitet, um die Anforderungen des ISO/IEC Guide 98-3 zu erfüllen.
- Die Theorie der Wärmeleitung in Anhang A wurde verfeinert.
- Anhang F „Eigenschaften von feuchter Luft“ wurde überarbeitet.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- | | | |
|--|-------|------------|
| — spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss | (dop) | 2009-12-01 |
| — spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen | (dow) | 2012-03-01 |

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 61094-2:2009 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der Reihe IEC 61094 von Internationalen Normen

- gilt für Laboratoriums-Normalmikrofone, die die Anforderungen von IEC 61094-1 erfüllen, und auch für andere Typen von Kondensatormikrofonen, sofern sie identische Abmessungen haben;
- legt ein Primärverfahren zur Ermittlung des komplexen Druck-Übertragungskoeffizienten fest, womit eine reproduzierbare und genaue Grundlage für Schalldruckmessungen geschaffen wird.

Alle Größen sind in SI-Einheiten angegeben.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 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 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 61094-1 und dem ISO/IEC Guide 98-3 sowie die folgenden Begriffe.

3.1
reziprokes Mikrofon
lineares passives Mikrofon, bei dem die Leerlauf-Transferimpedanzen im Vorwärts- und im Rückwärtsbetrieb dem Betrag nach gleich sind

3.2
Phasenwinkel des Druck-Übertragungskoeffizienten eines Mikrofons
bei einer bestimmten Frequenz der Phasenwinkel zwischen der Leerlaufspannung und einem gleichförmig auf die Membran einwirkenden Schalldruck

ANMERKUNG Der Phasenwinkel wird in Grad (°) oder Radiant (rad) angegeben.

3.3
elektrische Transferimpedanz
bei einem aus zwei akustisch gekoppelten Mikrofonen bestehenden System das Verhältnis der Leerlaufspannung des als Empfänger arbeitenden Mikrofons zum Eingangsstrom durch die Klemmen des als Sender arbeitenden Mikrofons

ANMERKUNG 1 Die elektrische Transferimpedanz wird in Ohm (Ω) angegeben.

ANMERKUNG 2 Diese Impedanz gilt für die Referenz-Abschirmkonfiguration nach IEC 61094-1:2000, 7.2.

1) Der ISO/IEC Guide 98-3:2008 ist eine Neuauflage des *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*, 1995.

3.4

akustische Transferimpedanz

bei einem aus zwei akustisch gekoppelten Mikrofonen bestehenden System das Verhältnis des Schalldrucks, der auf die Membran des als Empfänger arbeitenden Mikrofons wirkt, zum Kurzschluss-Volumenstrom, der durch das als Sender arbeitende Mikrofon erzeugt wird

ANMERKUNG Die akustische Transferimpedanz wird in Pascalsekunde je Kubikmeter ($\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$) angegeben.

3.5

Kuppler

Vorrichtung, die, wenn Mikrofone an sie angeschlossen sind, einen Hohlraum vorbestimmter Form und Abmessungen bildet und damit als akustisches Verbindungselement zwischen den Mikrofonen wirkt

4 Referenz-Umgebungsbedingungen

Die Referenz-Umgebungsbedingungen sind wie folgt festgelegt:

- Temperatur: 23,0 °C
- Luftdruck: 101,325 kPa
- relative Luftfeuchte: 50 %.

5 Grundlagen der Druckkammer-Reziprozitätskalibrierung

5.1 Allgemeine Grundlagen

5.1.1 Allgemeines

Eine Reziprozitätskalibrierung von Mikrofonen kann mit drei Mikrofonen, von denen zwei reziprok sein müssen, oder mit einer Hilfsschallquelle und zwei Mikrofonen, von denen eines reziprok sein muss, durchgeführt werden.

ANMERKUNG Wenn ein Mikrofon nicht reziprok ist, kann es nur als Schallempfänger verwendet werden.

5.1.2 Allgemeine Grundlagen bei Verwendung von drei Mikrofonen

Zwei der Mikrofone werden mittels eines Kupplers akustisch miteinander verbunden. Bei Verwendung eines Mikrofons als Schallsender und des anderen als Schallempfänger wird die elektrische Transferimpedanz gemessen. Sofern die akustische Transferimpedanz des Systems bekannt ist, lässt sich das Produkt der Druck-Übertragungskoeffizienten der beiden gekoppelten Mikrofone ermitteln. Indem die drei Mikrofone (1), (2) und (3) paarweise kombiniert werden, ergeben sich drei voneinander unabhängige Produkte, aus denen ein Ausdruck für den Druck-Übertragungskoeffizienten eines jeden der drei Mikrofone abgeleitet werden kann.

5.1.3 Allgemeine Grundlagen bei der Verwendung von zwei Mikrofonen und einer Hilfsschallquelle

Zunächst werden die beiden Mikrofone mittels eines Kupplers akustisch miteinander verbunden und das Produkt der Druck-Übertragungskoeffizienten nach 5.1.2 ermittelt. Danach werden die beiden Mikrofone dem gleichen, von der Hilfsschallquelle erzeugten Schalldruck ausgesetzt. Das Verhältnis der zwei Ausgangsspannungen ist dann gleich dem Verhältnis der beiden Druck-Übertragungskoeffizienten. Aus dem Produkt und dem Verhältnis der Druck-Übertragungskoeffizienten der beiden Mikrofone kann ein Ausdruck für den Druck-Übertragungskoeffizienten eines jeden der beiden Mikrofone abgeleitet werden.

ANMERKUNG Um das Verhältnis der Druck-Übertragungskoeffizienten zu erhalten, darf ein Verfahren mit direktem Vergleich angewandt werden. Die Hilfsschallquelle darf ein drittes Mikrofon mit anderen mechanischen oder akustischen Eigenschaften als denjenigen der zu kalibrierenden Mikrofone sein.

5.2 Grundgleichungen

Laboratoriums-Normalmikrofone und ähnliche Mikrofone werden als reziprok angesehen. Folglich können ihre Zweitor-Gleichungen (Vierpol-Gleichungen) wie folgt geschrieben werden:

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

Dabei ist

$\underline{p}$	der gleichförmig an den akustischen Klemmen (Membran) des Mikrofons wirkende Schalldruck in Pa;
$\underline{U}$	die Signalspannung in V an den elektrischen Klemmen des Mikrofons;
$\underline{q}$	der Volumenstrom in m ³ /s an den akustischen Klemmen (Membran) des Mikrofons;
$\underline{i}$	der Strom in A an den elektrischen Klemmen des Mikrofons;
$\underline{z}_{11} = \underline{Z}_e$	die elektrische Impedanz des Mikrofons in Ω bei blockierter Membran;
$\underline{z}_{22} = \underline{Z}_a$	die akustische Impedanz des Mikrofons in Pa · s/m ³ im elektrischen Leerlauf;
$\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{M}_p \underline{Z}_a$	die identische Rückwärts- und Vorwärts-Transferimpedanzen in V · s/m ³ , wobei $\underline{M}_p$ der Druck-Übertragungskoeffizient des Mikrofons in V/Pa ist.

ANMERKUNG Unterstrichene Formelzeichen deuten komplexe Größen an.

Die Gleichungen (1) können damit auch folgendermaßen geschrieben werden:

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

Das sind die Reziprozitätsgleichungen eines Mikrofons.

Die Mikrofone (1) und (2) mit den Druck-Übertragungskoeffizienten $\underline{M}_{p,1}$ und $\underline{M}_{p,2}$ seien mittels eines Kupplers akustisch miteinander verbunden. Aus den Gleichungen (1a) lässt sich ablesen, dass der Strom $\underline{i}_1$ an den elektrischen Klemmen des Mikrofons (1) den Kurzschluss-Volumenstrom $\underline{M}_{p,1} \underline{i}_1$ (bei $\underline{p} = 0$ an der Membran) erzeugt und somit an den akustischen Klemmen des Mikrofons (2) den Schalldruck $\underline{p}_2 = \underline{Z}_{a,12} \underline{M}_{p,1} \underline{i}_1$ hervorruft, wobei $\underline{Z}_{a,12}$ die akustische Transferimpedanz des Systems ist.

Die Leerlaufspannung des Mikrofons (2) ergibt sich daraus zu

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

Damit lautet das Produkt der Druck-Übertragungskoeffizienten

$$\underline{M}_{p,1} \underline{M}_{p,2} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,12}} \frac{\underline{U}_2}{\underline{i}_1}\quad (2)$$

5.3 Ersatzspannungsverfahren

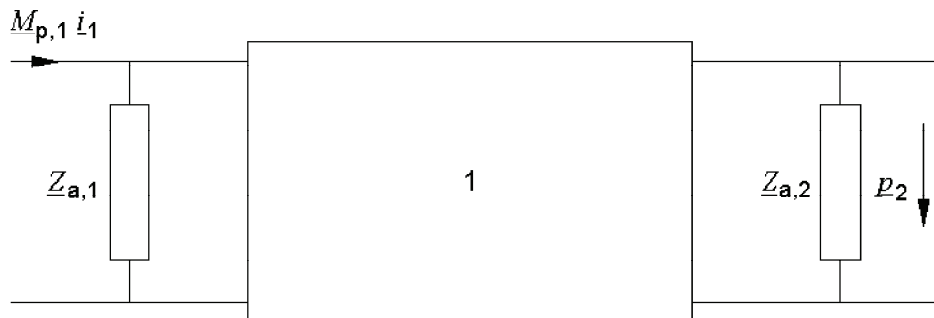
Die Leerlaufspannung eines elektrisch belasteten Mikrofons wird nach dem Ersatzspannungsverfahren ermittelt.

Das Mikrofon mit einer bestimmten Leerlaufspannung und inneren Impedanz wird an eine Lastimpedanz angeschlossen. Um die Leerlaufspannung zu messen, wird eine im Vergleich zur Lastimpedanz kleine Impedanz mit dem Mikrofon in Reihe geschaltet und eine Kalibrierspannung an sie angelegt.

Abwechselnd werden ein Schalldruck und eine Kalibrierspannung gleicher Frequenz angelegt. Wird dabei die Kalibrierspannung so abgeglichen, dass sie an der Lastimpedanz denselben Spannungsabfall wie der auf das Mikrofon einwirkende Schalldruck hervorruft, dann ist die Leerlaufspannung betragsmäßig gleich dieser Kalibrierspannung.

5.4 Berechnung der akustischen Transferimpedanz

Die akustische Transferimpedanz $\underline{Z}_{a,12} = p_2 / (\underline{M}_{p,1} \dot{v}_1)$ kann nach der Ersatzschaltung in Bild 1 berechnet werden, in der $\underline{Z}_{a,1}$ und $\underline{Z}_{a,2}$ die akustischen Impedanzen der Mikrofone (1) und (2) sind.



Legende

1 Kuppler

Bild 1 — Ersatzschaltung zur Berechnung der akustischen Transferimpedanz $\underline{Z}_{a,12}$

In einigen Fällen lässt sich $\underline{Z}_{a,12}$ auch theoretisch ermitteln. Es wird angenommen, dass der Schalldruck an allen Stellen im Kuppler gleich ist (das ist der Fall, wenn die Abmessungen des Kupplers im Vergleich zur Wellenlänge sehr klein sind). Dann weist das Gas im Kuppler ausschließlich die Eigenschaft einer reinen Nachgiebigkeit auf, und $\underline{Z}_{a,12}$ ist nach der in Bild 2 gezeigten Ersatzschaltung durch $\underline{Z}'_{a,12}$ gegeben (unter der Annahme adiabatischer Kompression und Expansion des Gases):

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

Dabei ist

- V das Gesamtvolumen des Kupplers in m^3 ;
- $V_{e,1}$ das Äquivalentvolumen des Mikrofons (1) in m^3 ;
- $V_{e,2}$ das Äquivalentvolumen des Mikrofons (2) in m^3 ;

- $\underline{Z}_{a,V} = \frac{\kappa p_s}{j\omega V}$ die akustische Impedanz des im Kuppler eingeschlossenen Gases in $\text{Pa} \cdot \text{s/m}^3$;
 ω die Kreisfrequenz in rad/s ;
 p_s der Luftdruck in Pa ;
 $p_{s,r}$ der Luftdruck in Pa unter Referenzbedingungen;
 κ das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten unter Messbedingungen;
 κ_r κ unter Referenzbedingungen.

Die Werte von κ und κ_r für feuchte Luft können mit den in Anhang F angegebenen Gleichungen berechnet werden.

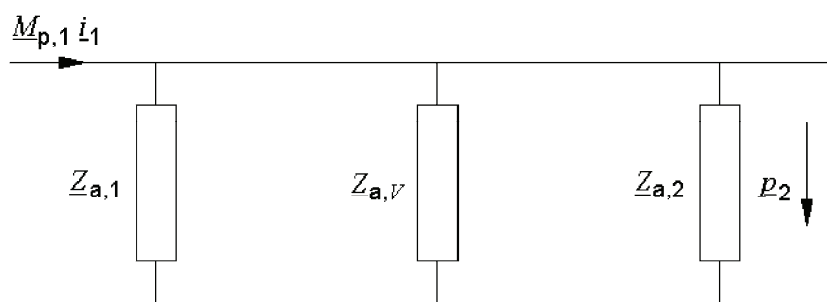


**Bild 2 — Ersatzschaltung zur Berechnung von $\underline{Z}'_{a,12}$,
sofern die Kupplerabmessungen klein im Vergleich zur Wellenlänge sind**

Bei höheren Frequenzen, bei denen die Kupplerabmessungen im Vergleich zur Wellenlänge nicht klein genug sind, wird die Berechnung von $\underline{Z}_{a,12}$ allgemein kompliziert. Wenn der Kuppler jedoch eine zylindrische Form hat und sein Durchmesser gleich demjenigen der Mikrofonmembranen ist, kann bei Frequenzen, bei denen die Ausbreitung ebener Wellen angenommen werden kann, das gesamte System als homogene Übertragungsleitung angesehen werden (siehe Bild 3).

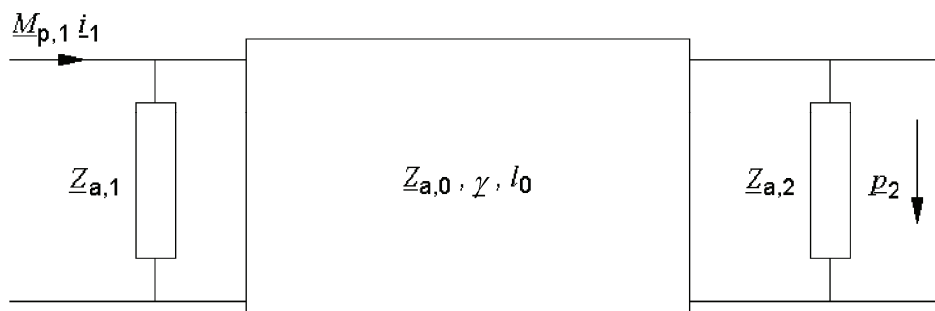


**Bild 3 — Ersatzschaltung zur Berechnung von $\underline{Z}'_{a,12}$,
wenn im Kuppler die Ausbreitung ebener Wellen angenommen werden kann**

$\underline{Z}_{a,12}$ ist dann durch $\underline{Z}'_{a,12}$ gegeben (unter der Annahme adiabatischer Kompression und Expansion des Gases):

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

Dabei ist

$\underline{Z}_{a,0}$ die akustische Impedanz für ebene Wellen im Kuppler; bei Vernachlässigung von Verlusten im Kuppler ist $\underline{Z}_{a,0} = \rho c / S_0$;

ρ die Dichte des eingeschlossenen Gases in kg/m³;

c die Schallgeschwindigkeit in m/s in dem Gas bei freier Wellenausbreitung;

S_0 die Querschnittsfläche des Kupplers in m²;

l_0 die Länge des Kupplers in m, d. h. der Abstand zwischen den beiden Membranen;

$\underline{\chi} = \alpha + j\beta$ der komplexe Ausbreitungskoeffizient in m⁻¹.

Die Werte von ρ und c für feuchte Luft können mit den in Anhang F angegebenen Gleichungen berechnet werden.

Der Realteil von $\underline{\chi}$ erfasst die Verluste aufgrund der Viskosität und der Wärmeleitung an den Kupplerwandungen, während der Imaginärteil die Kreiswellenzahl ist.

Bei Vernachlässigung von Verlusten darf als Näherung für $\underline{\chi}$ in Gleichung (4) $\alpha = 0$ und $\beta = \omega/c$ gesetzt werden.

Alle mit den Mikrofonen in Zusammenhang stehenden Luftvolumina, die nicht von den Kupplerwandungen und den beiden Membranen begrenzt werden, müssen berücksichtigt werden (siehe 7.3.3.1).

5.5 Wärmeleitungskorrektur

Der Berechnung von $\underline{Z}'_{a,12}$ im vorhergehenden Abschnitt liegt die Annahme adiabatischer Bedingungen im Kuppler zugrunde. In der Praxis verursacht jedoch der Einfluss der Wärmeleitung an den Kupplerwandungen, vor allem bei kleinen Kupplern und tiefen Frequenzen, Abweichungen von den rein adiabatischen Bedingungen.

Bei tiefen Frequenzen, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass der Schalldruck an allen Stellen derselbe ist, und unter der Annahme, dass die Kupplerwandungen eine konstante Temperatur haben, kann der Einfluss der Wärmeleitungsverluste berechnet und als komplexer Korrekturfaktor $\underline{\Delta}_H$ zum Volumen V in Gleichung (3) angegeben werden. Die Berechnung des Korrekturfaktors $\underline{\Delta}_H$ ist in Anhang A angegeben.

Bei hohen Frequenzen findet im Kuppler Wellenausbreitung statt, sodass der Schalldruck nicht mehr an allen Stellen derselbe ist. Bei Kupplern von der Form eines rechtwinkligen Zylinders gilt die Theorie der Übertragungsleitung (siehe 5.4), mit deren Hilfe der resultierende Einfluss der an den Kupplerwandungen auftretenden Wärmeleitung und Verluste aufgrund der Viskosität durch den komplexen Ausbreitungskoeffizienten und die akustische Impedanz für ebene Wellen im Kuppler berücksichtigt werden kann. Die zusätzliche Wärmeleitung an den Stirnflächen des Kupplers, d. h. an den Mikrofonmembranen, lässt sich dadurch berücksichtigen, dass dem Ausdruck für die akustische Impedanz der Mikrofone weitere Terme hinzugefügt werden. Die Berechnung des komplexen Ausbreitungskoeffizienten und der akustischen Impedanz für ebene Wellen ist in Anhang A angegeben.

5.6 Kapillarkorrektion

Ein Kuppler ist gewöhnlich mit Kapillarröhrchen versehen, die den Ausgleich des Luftdrucks innerhalb und außerhalb des Kupplers ermöglichen. Sind zwei solche Kapillarröhrchen vorhanden, erlaubt das, auch ein anderes Gas als Luft zu verwenden.

Die akustische Eingangsimpedanz einer offenen Kapillare ist

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

Dabei ist

$\underline{Z}_{a,t}$ die komplexe akustische Impedanz in $\text{Pa} \cdot \text{s/m}^3$ für die Wellen in einem unendlich langen Rohr;

l_C die Länge des Rohrs in m.

Der Effekt der Parallelschaltung von Kapillarröhrchen kann durch den komplexen Korrektionsfaktor $\underline{\Delta}_C$ zu den akustischen Transferimpedanzen in den Gleichungen (3) und (4) berücksichtigt werden:

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

Dabei ist

n die Anzahl der benutzten identischen Kapillarröhrchen;

$\underline{Z}_{a,12}''$ nach 5.5 bezüglich der Wärmeleitung korrigierte akustische Transferimpedanz $\underline{Z}_{a,12}$.

Die Berechnung der akustischen Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{a,C}$ einer offenen Kapillare ist in Anhang B angegeben.

5.7 Gleichungen des Druck-Übertragungskoeffizienten

5.7.1 Verfahren mit drei Mikrofonen

Die elektrische Transferimpedanz $\underline{U}_2 / i_1$ (siehe 5.2) sei mit $\underline{Z}_{e,12}$ bezeichnet. Für die anderen Mikrofonpaarungen gelten entsprechende Bezeichnungen.

Unter Berücksichtigung der in 5.5 und 5.6 angegebenen Korrekturen lautet die Gleichung für den Betrag des Druck-Übertragungskoeffizienten des Mikrofons (1):

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

Entsprechende Gleichungen gelten für die Mikrofone (2) und (3).

Der Phasenwinkel des Druck-Übertragungskoeffizienten jedes Mikrofons lässt sich auf ähnliche Weise aus den Phasenwinkeln der einzelnen Terme in der obigen Gleichung bestimmen.

ANMERKUNG Wenn komplexe Größen mit Betrag und Phase angegeben werden, sollte die Angabe der Phase in dem Bereich aller vier Quadranten erfolgen, d. h. 0 bis 2π rad bzw. 0 bis 360° .