# Messmikrofone

Bachelor-Arbeit

verfasst von

**Rudolf Liepins**

Institut für Breitbandkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Kubin

Betreuer/in: Dipl.-Ing. Thorsten Rohde

Graz, im Oktober 2009

# Inhaltsverzeichnis

**1 Einleitung 2**

**2 Unterschiede zwischen Messmikrofonen und Studiomikrofonen 3**

**3 Messmikrofone 4**

3.1 Freifeld-, Diffusfeld- und Druckmikrofone ... 4
3.1.1 Freifeld ... 5
3.1.2 Diffusfeld ... 6
3.1.3 Druckmikrofon ... 6

3.2 Aufbau ... 7
3.2.1 Mikrofonkapsel ... 7
3.2.2 Vorverstärker ... 10
3.2.3 Spannungsversorgung ... 11
3.2.4 Materialanforderungen ... 14

3.3 Kenndaten und Qualitätsmerkmale ... 15
3.3.1 Übertragungsfaktor und Empfindlichkeit ... 15
3.3.2 Dynamikumfang ... 16
3.3.3 Frequenzgang ... 18
3.3.4 Richtcharakteristik ... 19
3.3.5 Stabilität ... 19

3.4 Kalibrierung ... 21
3.4.1 Reziprozitätsmethode ... 22
3.4.2 Vergleichsmethode ... 22
3.4.3 Elektrostatischer Aktuator ... 23
3.4.4 Pistonphon und Schallpegelkalibrator ... 24

**4 Einsatz von Messmikrofonen in der Tontechnik 26**

4.1 Pegelmessung bei Veranstaltungen ... 26
4.1.1 Orchester ... 27
4.1.2 Diskotheken und Bars ... 27

4.2 Optimierung von Lautsprechersystemen ... 28

**5 Marktübersicht 29**

5.1 Vergleich ... 29

5.2 Wahl des Messmikrofons ... 35

**6 Zusammenfassung 36**

**7 Literatur 38**

# 1 Einleitung

Bei vielen Anwendungen der Schallaufnahme ist es von großer Bedeutung, möglichst exakte, nachvollziehbare oder auch standardkonforme Ergebnisse zu erzielen, wobei die verwendeten Mikrofone dafür entsprechend geeignet sein müssen. Das Thema Messmikrofone überschneidet sich in vielen Bereichen mit der allgemeinen Mikrofontechnik, weshalb es in der Fachliteratur, wenn überhaupt, nur am Rande Erwähnung findet. In Zeiten steigender Lärmbelastung sowohl am Arbeitsplatz, als auch im öffentlichen Raum stellen Messmikrofone ein wichtiges Werkzeug zur objektiven Beurteilung von Schallereignissen dar. Auch in der Tontechnik, bei der Optimierung von Beschallungsanlagen oder DSP-basierten Raumkorrektursystemen ist dieses Thema von großer Relevanz.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Überblick über das sehr breit gefächerte Thema zu schaffen und die Frage zu klären, warum man spezielle Mikrofone in der Messtechnik benötigt. Dazu werden zunächst in Kapitel 2, die wichtigsten Unterschiede zu konventionellen Kondensatormikrofonen aus der Studiotechnik zu klären. Anschließend folgt eine Beschreibung der zugrunde liegenden Technik, und der qualitätsbestimmenden Eigenschaften von Messmikrofonen. Kapitel 4 soll einen kurzen Überblick über die Einsatzgebiete schaffen, wobei der Fokus auf tontechnisch relevanten Themen liegt. Das letzte Kapitel ist eine exemplarische Marktübersicht, wobei anhand eines Vergleiches wichtiger Mikrofonkenndaten untersucht wird, inwiefern teure Geräte von etablierten Herstellern kostengünstigeren Einsteigermodellen überlegen sind.

# 2 Unterschiede zwischen Messmikrofonen und Studiomikrofonen

Zunächst stellt sich die Frage, wo die Unterschiede zwischen einem Messmikrofon und einem Kondensator-Studiomikrofon liegen, schließlich sind der prinzipielle Aufbau und das Wandlerprinzip identisch. Viele Eigenschaften wie niedriger Rauschpegel, linearer Frequenzgang, großer Dynamikumfang bei geringem Klirrfaktor sind sowohl bei Studio- als auch bei Messmikrofonen erstrebenswert und gelten als wichtige Qualitätsmerkmale. In der Tat finden sich am Markt Studiomikrofone, die auch als Messmikrofone eingesetzt werden, bzw. Modelle, die auf der Technik eines Messmikrofons beruhen, wie etwas das Microtech Gefell M296 [gef][1].

Der grundlegende Unterschied liegt in der Anwendung. Ein Messmikrofon hat eine möglichst objektive Beurteilung des zu messenden Schallereignisses zur Aufgabe. Es muss kalibrierbar (vgl. Kapitel 3.4) und entsprechend den geltenden Normen standardisiert sein, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu ermöglichen. Besonders in Hinblick auf die Abmessungen der Kapsel muss die Norm erfüllt sein, damit alle Messmikrofone mit standardisierten Kalibratoren kompatibel sind. In den meisten Fällen sind auch Kapseln und Vorverstärker verschiedener Hersteller untereinander kombinierbar[gef][1].

Studiomikrofone hingegen dürfen das Schallereignis subjektiv beurteilen und müssen daher keinen Normen unterliegen, was sich in der durchaus erwünschten unterschiedlichen Klangcharakteristik verschiedener Modelle widerspiegelt. Während Studiomikrofone je nach Anwendungsgebiet verschiedene Richtcharakteristiken aufweisen, sind Messmikrofone in der Regel ungerichtet ausgeführt, um die akustischen Gegebenheiten am Messort möglichst wenig zu verfälschen. Studiomikrofone müssen aufgrund der normalerweise raueren Arbeitsbedingungen robuster und unempfindlicher gegen Störungen gefertigt werden, wobei oft auch die Empfindlichkeit der Kapsel niedriger ausfallen kann. Bei akustischen Messungen sollte hingegen dafür gesorgt sein, dass möglichst ideale Bedingungen vorherrschen, deshalb können Messmikrofone entsprechend sensibler ausgeführt sein[1].

[1] aus persönlicher Anfrage an den Vetrieb von Microtech Gefell GmbH am 10.09.2009

Während sich in der Studiotechnik XLR-Kabel als Standard bei Mikrofonen durchgesetzt haben, ist dies bei Messmikrofonen nicht der Fall. Besonders bei Geräten der höheren Qualitätskategorie ist es etwa nicht ohne weiteres möglich, diese direkt an ein herkömmliches Audiosetup wie etwa eine Soundkarte anzuschließen. Messmikrofone mit externer Vorspannung haben in der Regel eine 7-Pin-LEMO-Steckverbindung (siehe Kapitel 3.2.3.1), während bei Elektretmikrofonen (siehe Kapitel 3.2.3.2) häufig, wie in Abb. 2.1 schematisch dargestellt, Koaxialkabel zur Signalübertragung und Stromversorgung verwendet werden[2].

**Abb. 2.1** Elektretmikrofon wird per Koaxialkabel mit einer Versorgungsspannungsquelle verbunden, das Signal weiter zu einem Analysator geleitet[2].

Messmikrofone haben die Notwendigkeit, dass ihre Kenndaten eine besondere Langzeitstabilität aufweisen, ihre Eigenschaften sollten möglichst unabhängig von Umgebungstemperatur, Druck- oder Feuchtigkeitsschwankungen sein. Aus diesem Grund gelten spezielle Materialanforderungen, die für Tonstudiotechnik meist weniger ins Gewicht fallen [3]. Diese werden in Kapitel 3.2.4 näher erläutert.

# 3 Messmikrofone

## 3.1 Freifeld-, Diffusfeld- und Druckmikrofone

Messmikrofone beeinflussen allein durch ihre Anwesendheit und Ausrichtung im Schallfeld das Messergebnis. Um einen geraden Frequenzgang und in weiterer Folge die erforderliche Genauigkeit zu gewährleisten, müssen Messmikrofone daher speziell auf das jeweilige Schallfeld, in dem sie zum Einsatz kommen, abgestimmt sein. Man unterscheidet zwischen Druck-, Freifeld- und Diffusfeldmikrofonen[3]. Im Folgenden wird auf die Eigenschaften und Unterschiede der einzelnen Varianten eingegangen.

### 3.1.1 Freifeld

Positioniert man ein Mikrofon in einem freien Schallfeld, so wird dieses beeinträchtigt, da bei Wellenlängen, die in der Größenordnung des eingebrachten Objektes oder kleiner sind, der Schall an der Oberfläche reflektiert wird. Das resultiert aus der Tatsache, dass die Impedanz etwa einer Mikrofonmembran deutlich größer ist als die Schallkennimpedanz $Z_0$ der Luft. Während also bei tiefen Frequenzen der Schall um das Objekt gebeugt wird und keinen Einfluss erfährt, kommt es bei höheren Frequenzen bei direkter Ausrichtung des Mikrofons auf die Schallquelle zu einem Druckstau an der Oberfläche der Membran. Wie in Abb. 3.1 ersichtlich, ist der Frequenzgang daher nicht linear, wie es bei Messmikrofonen notwendig wäre, sondern besitzt einen deutlichen Anstieg von mehreren Dezibel bei hohen Frequenzen[10]. Weiters agiert das Membranschutzgitter wie ein akustischer Resonator, der ebenfalls eine Erhöhung des Pegels zur Folge hat. Der Frequenzbereich der Überhöhung ist abhängig vom Membrandurchmesser, für unterschiedliche Schalleinfallswinkel ergeben sich verschiedene Fehlerkurven[3].

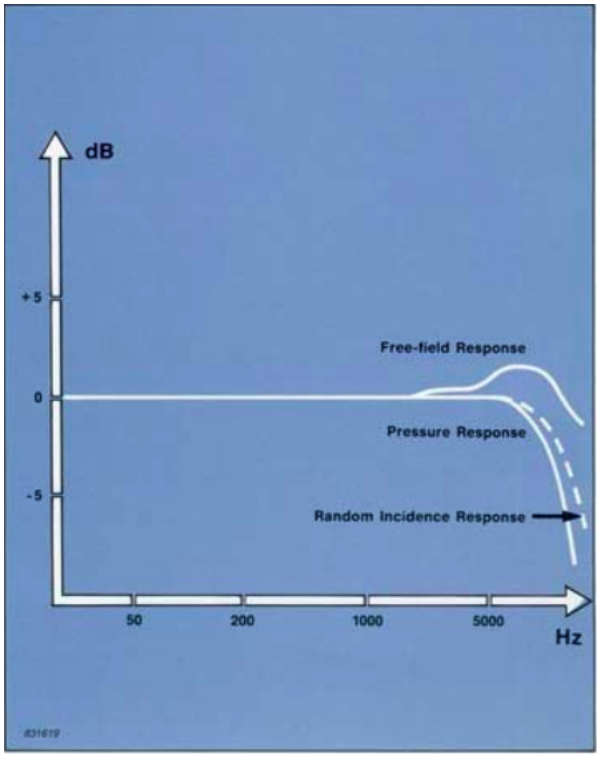



**Abb. 3.1:** Freifeld-, Diffusfeld- und Druckfrequenzgang [13]

Um also im Nutzfrequenzbereich einen annähernd konstanten Frequenzgang zu erreichen, muss das Mikrofon freifeldentzerrt werden. Dies erfolgt einerseits, indem die Membranresonanz stark bedämpft wird. Dabei wird die Dämpfung so gewählt, dass die Empfindlichkeit der Membran mit steigender Frequenz entsprechend dem Druckanstieg an der Membran abnimmt. In Summe ergibt sich dadurch ein konstanter Nutzfrequenzgang. Eine andere Möglichkeit ist es, das gemessene Schallspektrum im Nachhinein mit einer entsprechenden Korrekturkurve zu gewichten. Die benötigte Freifeldkorrektur eines bestimmten Mikrofontyps wird normalerweise aus dem entsprechenden Aktuatorfrequenzgang (vgl. Kapitel 3.4.3) ermittelt[4].

### 3.1.2 Diffusfeld

Das Diffusfeld ist dadurch charakterisiert, dass der Schall aus allen Richtungen mit mehr oder weniger gleicher Wahrscheinlichkeit und gleichem Pegel auf den Empfänger trifft. Auch hier wird der tatsächliche Schalldruckverlauf durch die Anwesendheit des Mikrofons verfälscht. In diesem Fall wird die benötigte Entzerrungskurve aus den einzelnen Freifeldkorrekturen für verschiedene Winkel ermittelt[3].

Der im Diffusfeld auftretende Druckstau in 0°-Richtung ist geringer als im Freifeld. Aus diesem Grund würde ein freifeldentzerrtes Mikrofon das Ergebnis verfälschen, da der wirkliche Pegel höher wäre als der gemessene. Wenn ein diffusfeldentzerrtes Mikrofon im Freifeld direkt auf die Quelle gerichtet wird, ist der aus der Messung resultierende Schalldruckpegel wiederum höher als der tatsächlich vorhandene. In der Praxis wird das genaueste Ergebnis erreicht, wenn in einem Winkel von 70° bis 80° zur Schallquelle gemessen wird[13].

### 3.1.3 Druckmikrofon

Bei einem Druckmikrofon entspricht die Ausgangsspannung dem real gemessenen Schalldruck vor der Membran, ohne die Anwesenheit des Mikrofons im Schallfeld zu berücksichtigen. Es kommt bei Messungen im Druckfeld zum Einsatz, welches dadurch charakterisiert ist, dass Betrag und Phase des Schalldrucks im gesamten Feld (annähernd) konstant sind. Ein Druckfeld tritt in umschlossenen Volumina auf, die kleiner als die Wellenlänge des Schalls sind. Druckmikrofone werden daher zum Beispiel in Messrohren oder akustischen Kupplern zur Vermessung von Kopfhörern eingesetzt. Obwohl das Mikrofon für gewöhnlich so angeordnet ist, dass die Membran einen Teil der schallharten

Begrenzungsfläche des Messgehäuses darstellt, hat seine Anwesenheit dennoch einen Einfluss auf das Druckfeld. Idealerweise sollte die Membran die gleiche Steifigkeit besitzen, wie die übrigen Begrenzungsflächen des Gehäuses. Da dies aber nicht der Fall ist, ändert sich das Schallfeld im Vergleich zu dem Fall, dass kein Mikrofon anwesend wäre aufgrund der Membranauslenkung bei Druckeinprägung[3].

## 3.2 Aufbau

Wegen der angestrebten hohen Empfindlichkeit sind Messmikrofone als Kondensatormikrofone realisiert. Bei der Bauform handelt es sich prinzipiell um Druckempfänger, da diese genau wie das menschliche Ohr den Schalldruck erfassen, dementsprechend haben sie, wie bereits oben erwähnt, eine ungerichtete Empfangscharakteristik. Auch bei Messungen von Schallintensität und –schnelle werden Druckempfänger verwendet, jedoch sind dafür simultane Messungen des Drucks an zwei Positionen notwendig[3].

Bei hochwertigen Labor-Messmikrofonen sind in der Regel Mikrofonkapsel und Vorverstärker getrennt ausgeführt, sodass verschiedene Anordnungen je nach Messaufbau möglich sind. Günstigere Elektretmikrofone haben meistens ein einheitliches Gehäuse[4].

### 3.2.1 Mikrofonkapsel

Die Kapsel eines Messmikrofons besteht, wie in Abb. 3.2(a) illustriert, aus der Mikrofonmembran und einer perforierten Gegenelektrode, die in wenigen µm Entfernung voneinander platziert sind und gemeinsam den Wandlerkondensator mit einer Kapazität von 2 bis 60pF[2] bilden. Dieser Kondensator wird bei Messmikrofonen in der Regel mit einer Gleichspannung von 200V aufgeladen, aufgrund des geringen Abstandes der Elektroden und der hohen Spannung entsteht ein sehr starkes elektrisches Feld. Dadurch ist die Spannungsänderung am Kondensator indirekt proportional zur Membranauslenkung. Die Gegenelektrode befindet sich auf einem Isolator, der einen sehr großen Widerstand parallel zur Wandlerkapazität darstellt. Dieser so genannte Ladewiderstand mit bis zu mehreren GΩ ist notwendig[3], um bei einer Kapazitätsänderung Ausgleichsströme zu verhindern.

[2] Hauptsächlich in Abhängigkeit vom Membrandurchmesser [3]

[3] Außerdem wird damit die Zeitkonstante des Hochpasses, der sich aus Kapselkapazität und Ladewiderstand ergibt, ausreichend groß um die elektrische untere Grenzfrequenz der Mikrofonkapsel niedrig zu halten[3].

Andernfalls würde es zum Ladungsausgleich über die Polarisationsspannungsquelle kommen und die Spannung am Wandler bliebe konstant. Weiters wird damit die Zeitkonstante des Hochpasses, der sich aus Kapselkapazität und Ladewiderstand zusammensetzt bestimmt[7].

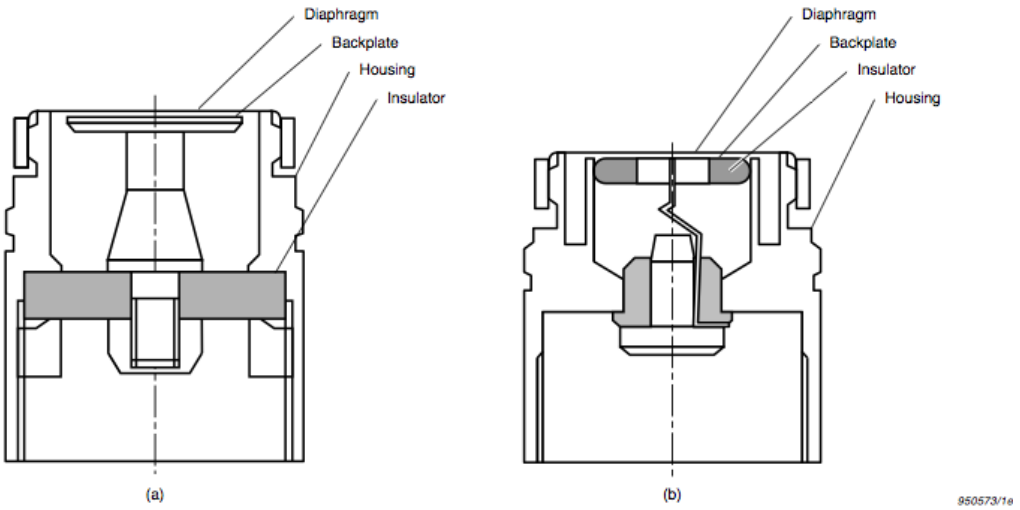



**Abb. 3.2: (a)** Klassische Bauform einer Kondensatorkapsel **(b)** Neue Bauform mit Herstellung durch Pressung[3].

In Abb. 3.2(b) ist eine alternative Bauform dargestellt, die von der Firma Brüel & Kjær patentiert wurde. Im Gegensatz zur ersten Variante werden die einzelnen Bauteile nicht geschraubt, sondern gepresst. Dadurch vereinfacht sich der Fertigungsprozess, was eine Kostenreduzierung zur Folge hat. Die Gegenelektrode wird in Form einer dünnen Metallschicht direkt am Isolator aufgetragen. Ein Vorteil des klassischen Aufbaus liegt in der Tatsache, dass dem Entwickler mehr Freiheiten bei der Optimierung des Frequenzganges gegeben sind[3].

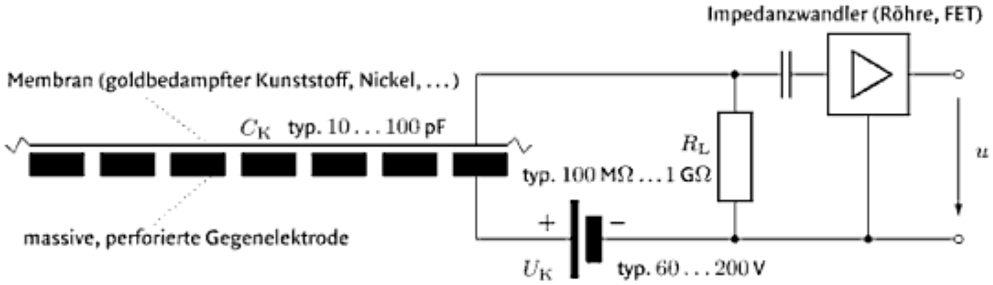



**Abb. 3.3:** Elektrostatisches Wandlerprinzip [7]

Abb. 3.3 zeigt zusammenfassend das elektrische Ersatzschaltbild des elektrostatischen Wandlerprinzips samt Impedanzwandler, auf den in Kapitel 3.2.2 näher eingegangen wird. Zwischen der Mikrofonkapsel und dem Vorverstärker befindet sich ein Koppelkondensator.

Er dient zur Trennung bzw. Auskopplung der Kapselwechselspannung von der Polarisationsspannung[3].

***Druckausgleichskanal***

Atmosphärische Druckschwankungen bewegen sich in einer ungleich höheren Größenordnung als die zu messenden Wechseldrücke. Um zu verhindern, dass es bei Luftdruckänderungen zu einer ungewollten Membranauslenkung kommt, besitzen Druckempfänger einen kleinen Ausgleichskanal. Dieser bildet einen akustischen Hochpass und ist deswegen für die untere mechanische Grenzfrequenz des Messmikrofons ausschlaggebend[3].

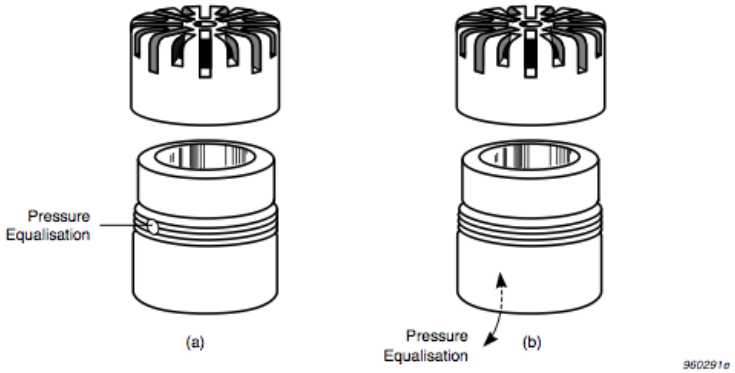



**Abb. 3.4: (a)**Druckausgleichsöffnung an der Seite bzw. **(b)** an der Rückwand der Kapsel[3].

Wie in Abb. 3.4 zu sehen ist, befindet er sich entweder seitlich der Kapsel oder dahinter. Der zweite Fall kommt zur Anwendung, wenn etwa akustische Kuppler bei der Messung eingesetzt werden. Dabei befindet sich die Ausgleichsöffnung außerhalb des Schallfeldes und die Hochpasswirkung bleibt aus (siehe Abb. 3.5). Erwähnenswert ist, dass atmosphärische Druckschwankungen prinzipiell sowohl den Frequenzgang, als auch den Phasengang eines Messmikrofons im niederfrequenten Bereich beeinflussen. Die obere mechanische Grenzfrequenz ist die Resonanzfrequenz des Membransystems, die durch Membransteifigkeit und – masse bestimmt ist[3].

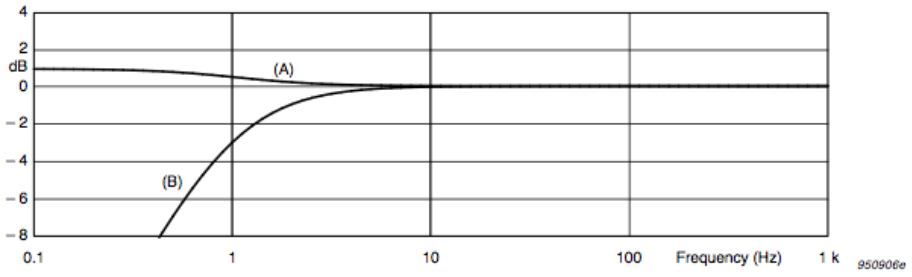



**Abb. 3.5:** Frequenzgang mit Druckventil **(B)** außerhalb bzw. **(A)** innerhalb des Schallfeldes[3].

## 3.2.2 Vorverstärker

Wie bereits oben erwähnt, benötigt die Mikrofonkapsel einen sehr großen Widerstand um einen Ladungsausgleich über die externe Polarisationsquelle zu verhindern. Der Kondensatorwandler stellt also eine hochohmige Spannungsquelle dar, wodurch er jedoch für eine Signalübertragung über längere Strecken ungeeignet ist. Der Grund dafür liegt bei der resultierenden geringen Signalstromamplitude, für die der Lastwiderstand etwa eines Kabels zu groß wäre und man mit erheblichen Pegelverlusten zu rechnen hätte. Der Vorverstärker ist ein Impedanzwandler, der den Ausgangswiderstand des Mikrofons entsprechend heruntersetzt um Anpassung zu ermöglichen. Die Schaltung hat eine sehr große Eingangsimpedanz[4] und einen sehr kleinen Ausgangswiderstand. Es wird dabei nur der Strom verstärkt, die Spannung hat maximal einen Verstärkungsfaktor 1, weswegen die Bezeichnung „Vorverstärker“ eher irreführend ist. Bei Messmikrofonen werden Impedanzwandler, wie in Abb. 3.6 vereinfacht dargestellt, mit Feldeffekttransistoren (FET) aufgebaut[7].

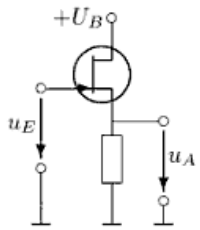



**Abb. 3.6** Impedanzwandler in FET-Ausführung[7]

Während die mechanische untere Grenzfrequenz des Messmikrofons vom Druckausgleichskanal bestimmt wird, spielt bei der elektrischen unteren Grenzfrequenz auch der Vorverstärker eine Rolle. Die Reihenschaltung von Kapselkapazität und

[4] bestimmt durch Eingangswiderstand (1 – 100 GΩ) und Eingangskapazität (0,1 – 1 pF) [3]

Koppelkondensator in Kombination mit der Eingangsimpedanz des Vorverstärkers und dem Ladewiderstand der Kapsel ergibt einen RC-Hochpass, der die Grenzfrequenz festlegt, in Abb. 3.7 ist dies vereinfacht illustriert. Da die Kapselkapazitäten bei Messmikrofonen sehr klein[5] sind, muss also der Eingangswiderstand des Verstärkers mehrere GΩ betragen, um einen möglichst linearen Frequenzgang auch bei tiefen Frequenzen zu erreichen. Die obere elektrische Grenzfrequenz ist durch einen Tiefpass bestimmt, der aus dem Ausgangswiderstand des Impedanzwandlers in Kombination mit der Lastkapazität des angeschlossenen Kabels entsteht[3].

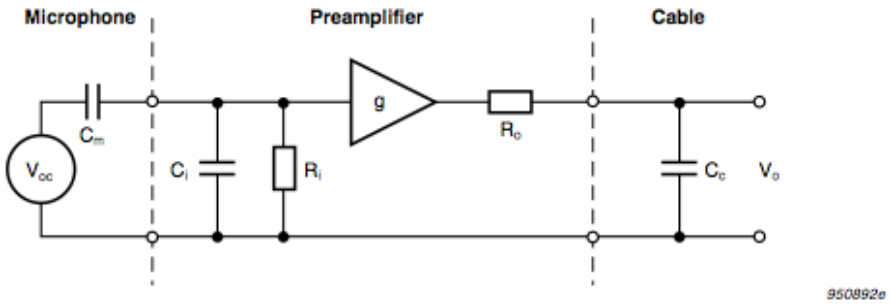



**Abb. 3.7:** Vereinfachtes Schaltbild des Mikrofons, mit einem Kabel belastet[3]

## 3.2.3 Spannungsversorgung

Wie bereits erwähnt, muss der Wandlerkondensator vorpolarisiert werden, um das für das Wandlerprinzip essentielle elektrische Feld zu erzeugen. Es gibt zwei Möglichkeiten, wie dies in der Praxis realisiert wird. Einerseits kann die Polarisation durch eine externe Spannungsquelle erzeugt werden, andererseits durch Einsatz von so genannten Elektreten, vorpolarisierten Polymeren, die ein konstantes Elektrisches Feld aufrechterhalten. Unabhängig von der Polarisationsmethode benötigen die Vorverstärker der Kondensatormikrofone eine Stromversorgung, um die Impedanzwandler zu speisen.

### 3.2.3.1 Externe Vorspannung

Bei der traditionellen Bauform eines Kondensator-Messmikrofons wird die Rückwand des Kapselkondensators mittels einer extern zugeführten Spannung polarisiert, um das für die Übertragung notwendige elektrische Feld zu erzeugen. Für gewöhnlich beträgt die Polarisationsspannung 200 V und wird von einem externen Netzteil erzeugt. Häufig verfügen Verstärkerstufen über einen Versorgungsspannungsgenerator, dieser kann auch als

[5] ca. 3 pF bei 1/8"- bzw. 70 pF bei 1"-Kapseln [3]

eigenständiges Gerät ausgeführt sein. Abb. 3.8 zeigt als Beispiel das Blockschaltbild eines batteriebetriebenen, zweikanaligen Speisegeräts mit umschaltbarer Versorgungsspannung. Der 0V-Modus dient dabei der Versorgung von vorpolarisierten Elektretmikrofonen, wo nur die Stromversorgung des Impedanzwandlers zu gewährleisten ist.

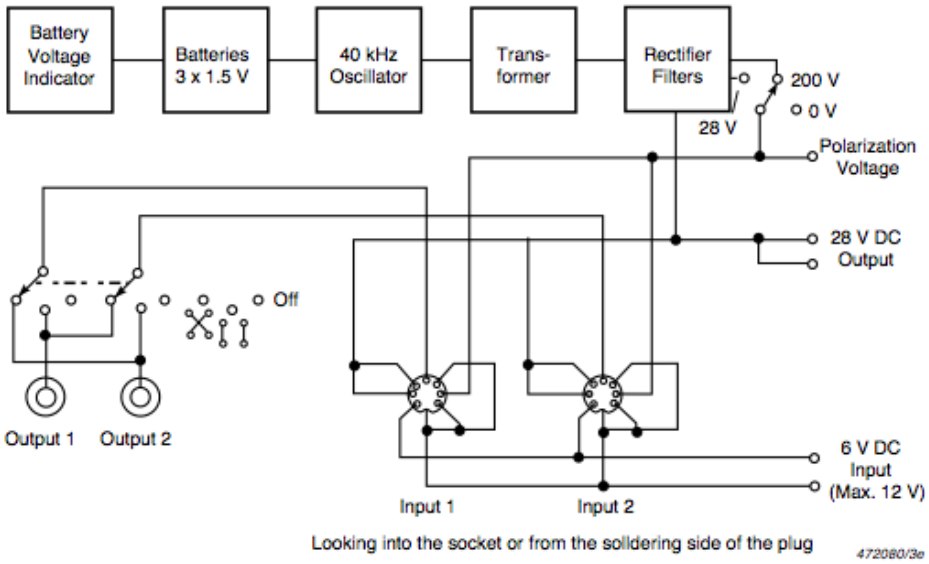



**Abb. 3.8** Blockschaltbild des B&K 2804 Power Supply[6].

Über ein Kabel mit 7-pin LEMO Steckverbindung (siehe Abb. 3.9) wird das Mikrofon versorgt. Wie bereits oben erwähnt, besitzen extern polarisierte Mikrofonkapseln einen sehr hohen Widerstand (1 – 10 GΩ), um den Ladungsausgleich über die Polarisationsspannungsquelle zu verhindern und die untere elektrische Grenzfrequenz niedrig zu halten.

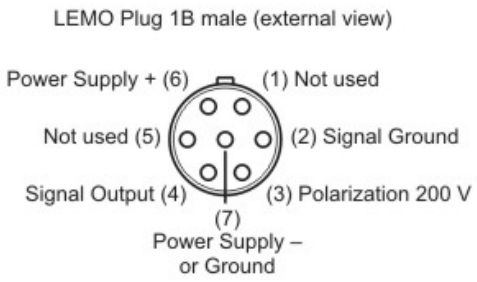



**Abb. 3.9** 7-Pin LEMO-Stecker und Belegung der Pins[14].

[6] Grafik entnommen aus: http://www.bksv.com/doc/bp0218.pdf am 10.09.2009

Messmikrofone mit externer Vorspannung sollten vor der Anwendung etwa 30 Sekunden lang „geladen“ werden, damit sich das benötigte elektrische Feld vollständig aufbauen kann. Erwähnenswert ist auch die Tatsache, dass Übertragungsfaktor und Frequenzgang von der Speisespannung beeinflusst werden. Bei niedrigerer Spannung sinkt entsprechend die Empfindlichkeit des Mikrofons, wie in Abb. 3.10 ersichtlich ist. Man sollte die Kapsel allerdings auch nicht mit zu hoher Spannung polarisieren, da dies zu Funkenüberschlägen zwischen Membran und Gegenelektrode und daraus resultierenden Ungenauigkeiten bei der Messung führen kann[3].

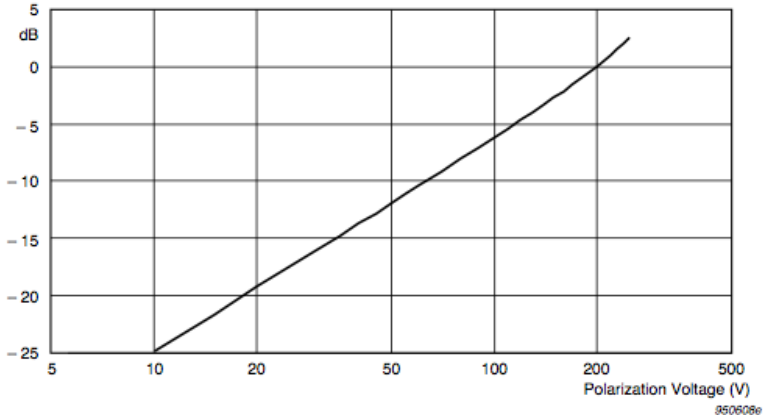



**Abb. 3.10** Änderung des Übertragungsfaktors in Abhängigkeit von der Polarisationsspannung[3].

### 3.2.3.2 Elektretverfahren

Viele Materialien bestehen aus Molekülen, die aufgrund ihrer Struktur elektrische Dipole bilden, welche jedoch ungerichtet angeordnet sind und daher kein externes Feld hervorrufen. Bei der Herstellung wird das zu polarisierende Material oberhalb der Curie-Temperatur erhitzt und einem elektrischen Feld ausgesetzt, sodass die elementaren Dipole gerichtet werden. Das äußere Feld wird nun so lange aufrechterhalten, bis das Material abkühlt und die nun räumlich ausgerichteten Dipole ein eigenes permanentes Feld erzeugen. Eine weitere Möglichkeit Polarisation zu erreichen ist die Ladungsinjektion bei der einzelne Ladungsträger in Isolatoren mit möglichst hohem spezifischem Widerstand eingeschossen werden und ein externes Feld entsteht. Der Grad der Polarisation eines Elektrets nimmt im Laufe der Jahre langsam ab. Im Allgemeinen kann entweder die Membran selbst aus einer vorpolarisierten Kunststofffolie bestehen, oder die Gegenelektrode mit einer Elektretschicht überzogen sein. Bei Messmikrofonen wird vorzugsweise die zweite Variante, wie in Abb. 3.11 verwendet, da dadurch die Membraneigenschaften nicht beeinträchtigt werden[10].

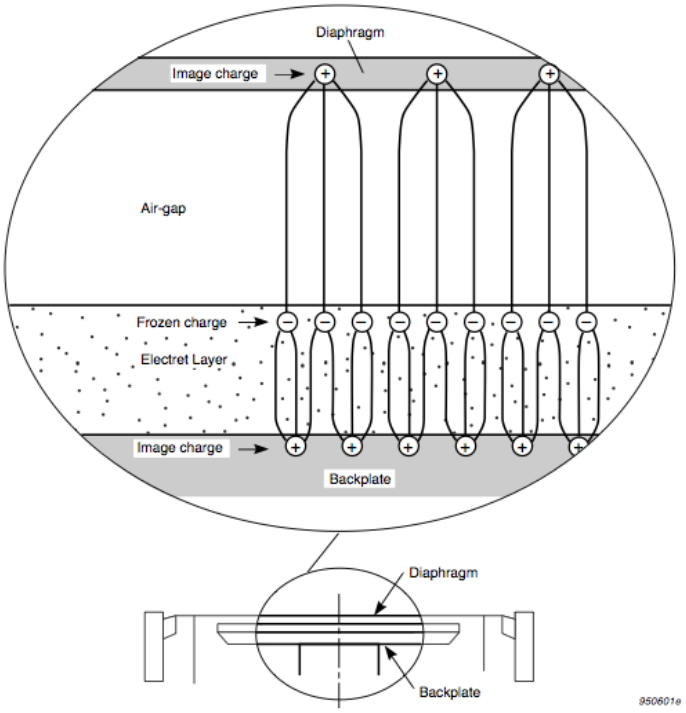



**Abb. 3.11** Prinzip des Elektretmikrofons[3]

Im Allgemeinen sind sowohl Messmikrofone mit externer Polarisationsspannung als auch Elektretmikrofone für die meisten Messsituationen geeignet. Letztere sind weniger empfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit und Kondenswasser auf den elektronischen Komponenten, während es bei extern gespeisten Mikrofonen dadurch eher zu Kurzschlüssen kommen kann. Andererseits ist der Übertragungsfaktor extern polarisierter Geräte weniger temperaturabhängig, wodurch diese bei hohen Temperaturen vorzuziehen sind. Elektretmikrofone sind kostengünstiger und leichter in der Handhabung, daher bewähren sie sich besonders für Messaufgaben im mobilen Einsatz wie zum Beispiel bei Schallpegelmessgeräten. Bedingt durch die Tatsache, dass die Polarisation des Elektrets mit der Zeit zurückgeht, verfügen Messmikrofone mit externer Vorspannung über eine höhere Langzeitstabilität[2].

### 3.2.4 Materialanforderungen

Wie bereits oben erwähnt, müssen die Kenndaten von Messmikrofonen möglichst unabhängig von atmosphärischen Gegebenheiten wie Temperatur, Luftdruck oder Luftfeuchtigkeit sein. Dementsprechend werden bei labortauglichen Geräten hochqualitative, oft schwer zu verarbeitende Materialien eingesetzt, die den entsprechenden Anforderungen genügen. Da die Empfindlichkeit des Mikrofons indirekt proportional zur Membransteifigkeit ist, muss besonders darauf geachtet werden, dass diese konstant gehalten wird. Um eine hohe

Empfindlichkeit und gleichzeitig einen großen Nutzfrequenzbereich zu erreichen, müssen einerseits die Membranmasse sehr gering, und die Steifigkeit möglichst hoch sein. Die Firma Brüel & Kjær beispielsweise verwendet für die Membran besonders feinkörnige Nickelfolien oder spezielle Stahllegierungen, welche die hohen Einspannkräfte von bis zu 600 N/mm² vertragen[7]. Damit die Membransteifigkeit nicht von Temperaturschwankungen beeinflusst wird, ist es notwendig, dass Gehäuse und Membran in etwa denselben Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweisen, damit die mechanischen Verhältnisse unverändert bleiben. Als Gehäusematerial wird häufig Monel, eine Nickel-Kupfer-Legierung mit hoher Zugfestigkeit, verwendet. Der Isolator muss mechanisch stabil sein und einen sehr hohen spezifischen Widerstand aufweisen, daher werden zur Herstellung zumeist Saphir, Rubin oder monokristalline Quarze eingesetzt. Wegen der sehr hohen elektrischen Feldstärke von bis zu 10kV/mm müssen die Oberflächen von Membran und Gegenelektrode frei von Partikeln sein, um Rauschen aufgrund von Funkendurchschlag in der Luftspalte zu verhindern[3].

## 3.3 Kenndaten und Qualitätsmerkmale

Im Allgemeinen haben Messmikrofone weitgehend ähnliche Parameter, die für eine möglichst hohe Qualität angestrebt werden, wie Studiokondensatormikrofone. In der Studiotechnik allerdings, wie in Kapitel 2 bereits angesprochen, ist das Endergebnis ein hauptsächlich subjektiver, mehr oder weniger zufrieden stellender Klangeindruck, bei dem die Mikrofonkenndaten zwar dafür mitverantwortlich, aber nicht zwingend der bestimmende Faktor sind. Bei objektiven Messungen lässt sich jedoch daraus direkt die zu erwartende Genauigkeit und Qualität des Ergebnisses ermitteln. Aus diesem Grund werden nun die wichtigsten Mikrofonparameter, die für gewöhnlich im Datenblatt des entsprechenden Modells angegeben sind, besprochen.

### 3.3.1 Übertragungsfaktor und Empfindlichkeit

Der Übertragungsfaktor (engl. sensitivity) ist einer der primären Qualitätsparameter eines Messmikrofons. Es handelt sich dabei um das Verhältnis von gemessener Ausgangsspannung des elektrostatischen Wandlers zum an der Membran auftreffenden Schalldruck:

[7] Entnommen aus Brüel & Kjær Microphone Handbook Vol. 1

$$B = \frac{U}{p} \qquad \left[\frac{\mathrm{mV}}{\mathrm{Pa}}\right].$$

Ein Mikrofon mit höherem Übertragungsfaktor hat demnach für einen gegebenen Schalldruck eine größere resultierende Ausgangsspannung und das elektrische Signal muss weniger verstärkt werden. Dadurch fällt in weiterer Folge das Eigenrauschen geringer aus als bei einem Mikrofon mit kleinerem Übertragungsfaktor. Die Angaben in Datenblättern beziehen sich auf eine Messung bei 1 kHz, falls nicht anders vermerkt[7].

Man unterscheidet prinzipiell zwischen Leerlauf-Übertragungsfaktor $B_\mathrm{o}$ und Betriebs-Übertragungsfaktor $B_\mathrm{c}$. Beim Leerlauf-Übertragungsfaktor wird ein idealisierter Vorverstärker angenommen, der die Kapsel nicht belastet. Für die Kalibrierung (siehe Kapitel 3.4) des gesamten Mikrofonsystems sollte der Betriebs-Übertragungsfaktor verwendet werden, bei dem auch der Vorverstärker miteinbezogen wird. Eine weitere häufig angegebene Größe ist das Übertragungsmaß

$$G = 20 \cdot \log\left(\frac{\mathrm{B}}{B_\mathrm{Ref}}\right) \qquad [\mathrm{dB}] \qquad \text{mit } \mathrm{B_{Ref}} = 1\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{Pa}}.$$

Dabei handelt es sich um den logarithmierten Übertragungsfaktor bei dem als Referenzgröße 1 V/Pa verwendet wird[3]. Generell wird im Sprachgebrauch der Begriff „Empfindlichkeit“ für den Betriebs-Übertragungsfaktor oder das Betriebs-Übertragungsmaß verwendet[8].

### 3.3.2 Dynamikumfang

Der untere, noch erfassbare Schalldruckpegel wird vom Eigenrauschen des Mikrofonsystems definiert, welches bei jedem Mikrofontyp unterschiedlich ist. In Abb. 3.12 ist als Beispiel der Grundgeräuschpegel für verschiedene Frequenzbänder aufgeführt. Beachtenswert ist, dass das Rauschen jeweils bei den Grenzfrequenzen deutlich höher ausfällt als im restlichen Spektrum.

[8] laut http://de.wikipedia.org/wiki/Übertragungsfaktor (Stand: 06.11.2009)

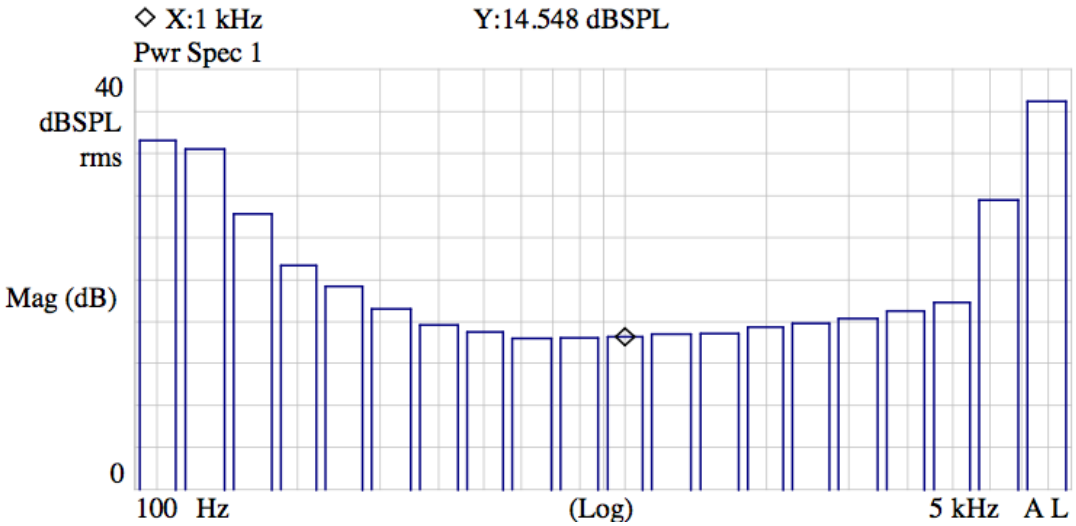



**Abb. 3.12** Grundgeräuschpegel eines Mikrofons für einzelne Terzbänder[2].

Die obere Pegelgrenze, bis zu welcher ein Schallereignis störungsfrei erfasst werden kann, ist der Grenzschalldruckpegel. Dieser ist bei Kondensatormikrofonen durch physikalische Rahmenbedingungen festgelegt. Ab einer gewissen Membranauslenkung kommt es zu Funkenüberschlägen zwischen Membran und Gegenelektrode, wodurch nichtlineare Verzerrungen entstehen. Dies manifestiert sich in einem bestimmten Total-Harmonic-Distortion-Wert (THD), dem Verhältnis der Leistung der harmonischen Anteile zur Gesamtleistung der Grundfrequenz

$$\mathrm{THD}_{\mathrm{dB}} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{harm}}{P_1}\right) \quad [\mathrm{dB}] \qquad \text{bzw.} \qquad \mathrm{THD}_{\%} = \sqrt{\frac{P_{harm}}{P_1}} \cdot 100 \quad [\%].$$

In Datenblättern wird als Grenzschalldruckpegel ein Wert angegeben, bei dessen Unterschreitung die Einhaltung eines gewissen THD-Wertes, wie etwa 3% THD, garantiert wird. In Abb. 3.13 wird der Dynamikumfang von typischen Messmikrofonen in Abhängigkeit vom Kapseldurchmesser verglichen. Generell gilt, dass der Grenzschalldruckpegel bei Mikrofonen mit kleiner Membran höher liegt, da die Auslenkung geringer ist. Dafür ist das Eigenrauschen bei größeren Membranen geringer ausgeprägt, wodurch diese besonders für kleine zu messende Pegel geeignet sind[2].

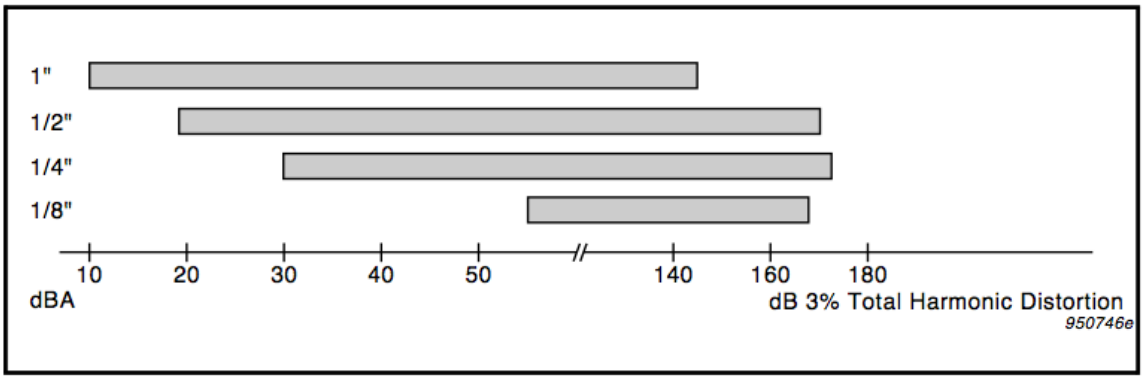



**Abb. 3.13** Dynamikumfang eines typischen Messmikrofons in Abhängigkeit vom Kapseldurchmesser[3].

## 3.3.3 Frequenzgang

Der in Datenblättern angegebene Frequenzgang eines Messmikrofons beschreibt den Verlauf des Übertragungsfaktors über die Frequenz. Sinnvolle Messergebnisse können selbstverständlich nur in jenem Bereich erzielt werden, in dem der Frequenzgang annähernd gerade verläuft. Die obere und untere Grenzfrequenz wird sowohl durch elektrische, als auch mechano-akustische Gegebenheiten bestimmt, welche in Kapitel 3.2 besprochen wurden. In der Praxis wird der Verlauf der Empfindlichkeit über die Frequenz mittels eines Kalibrators (siehe Kapitel 3.4) ermittelt und die Änderung gegenüber der Empfindlichkeit bei einer Referenzfrequenz, meistens 1 kHz, dargestellt (siehe Abb. 3.14) [3].

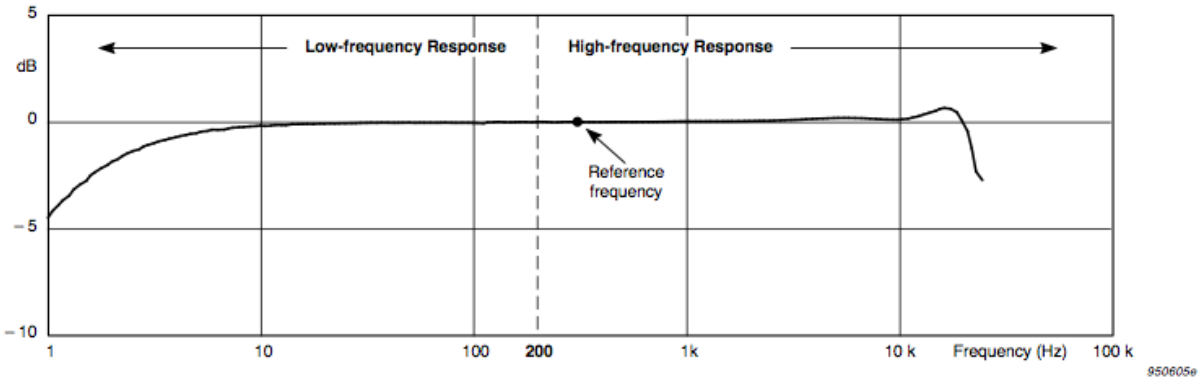



**Abb. 3.14** Typischer Frequenzgang eines Messmikrofons, auf 0 dB bei der Referenzfrequenz von 250 Hz normiert[3].

Der Frequenzverlauf ist stark abhängig vom Schallfeld, in welchem das Mikrofon eingesetzt wird bzw. für welches es konzipiert wurde. Dieses Thema wurde ausführlich in Kapitel 3.1 erläutert.

## 3.3.4 Richtcharakteristik

Messmikrofone sind Druckempfänger, welche im Allgemeinen eine Kugelcharakteristik aufweisen. Bei höheren Frequenzen tritt jedoch auch bei dieser Bauform eine frequenzabhängige Richtwirkung auf, wie in Abb. 3.15 zu sehen ist. Dies ist besonders bei Freifeld-Messungen relevant, da Schalldruck, der nicht aus 0°-Richtung auf die Membran fällt mit steigender Frequenz teils erheblich gedämpft wird. Auch hier ist die Richtwirkung abhängig vom Kapseldurchmesser. Bei einer 1"-Kapsel ist die Frequenz, bei der eine bestimmte Richtcharakteristik gegeben ist, nur halb so hoch wie bei einer 1/2"-Kapsel. Ebenso verdoppelt sich diese Frequenz beispielsweise bei einer 1/4"-Kapsel[3].

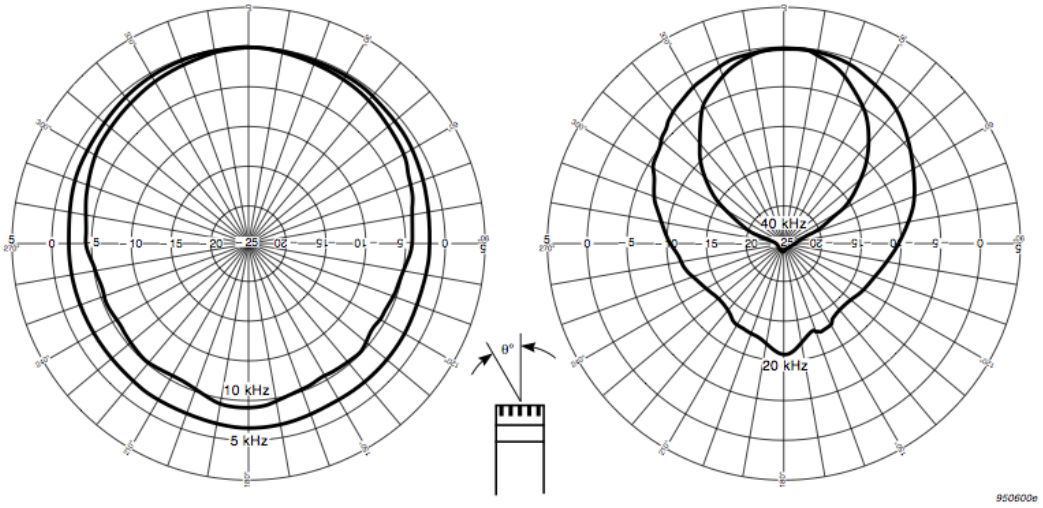



**Abb. 3.15** Empfindlichkeit eines Messmikrofons in Abhängigkeit vom Einfallswinkel bei unterschiedlichen Frequenzen[3].

## 3.3.5 Stabilität

Ein wesendliches Qualitätsmerkmal für Messmikrofone und gleichzeitig einer der Faktoren, die für die großen preislichen Unterschiede am Markt verantwortlich sind, ist die Stabilität. Dadurch ergeben sich hohe Anforderungen an Material und Fertigungsprozess (siehe Kapitel 3.2.4), die wichtigsten Stabilitätskriterien werden im Weiteren besprochen. Bei Studiomikrofonen fallen diese bei weitem nicht so ins Gewicht wie bei Messmikrofonen, was ebenfalls die beiden Bereiche unterscheidet (siehe Kapitel 2).

***Langzeitstabilität***

Im Laufe der Zeit ändert sich bei Kondensatormikrofonen die Membransteifigkeit, was einen leichten Anstieg des Übertragungsfaktors zur Folge hat. Der Zeitraum dieser systematischen

Steifigkeitsänderung ist dabei von der Umgebungstemperatur bestimmt, in welcher das Messmikrofon eingesetzt wird. Bei höheren Temperaturen sinkt die Spannung der Membran proportional schneller. Bei Mikrofonen, die häufig Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, tritt dieses Phänomen ebenfalls schneller auf, als bei solchen, die unter konstanter Temperatur, etwa in einem Eichlabor betrieben werden. Ein Stabilitätsfaktor $F$, welcher als Verhältnis der Stabilität S bei einer Temperatur $T$ zur Stabilität bei einer Referenztemperatur $T_{\mathrm{ref}}$ definiert ist, wird zur Beurteilung dieses Effekts herangezogen. Die temperaturabhängige Langzeitstabilität ergibt sich zu

$$S(T) = S(T_{\mathrm{ref}}) \cdot F(T).$$

Bei Elektretmikrofonen verringert sich die Polarisation der Elektretschicht über Jahre, was wiederum einen sinkenden Übertragungsfaktor bedeutet[3].

### *Temperaturabhängigkeit*

Bei sehr hohen oder niedrigen Umgebungstemperaturen ändert sich ebenfalls der Übertragungsfaktor eines Messmikrofons, diese Änderung ist in Abb. 3.16 zu sehen. Dabei sind die Schwankungen von der Frequenz abhängig und besonders bei hohen Frequenzen ausgeprägt[3].

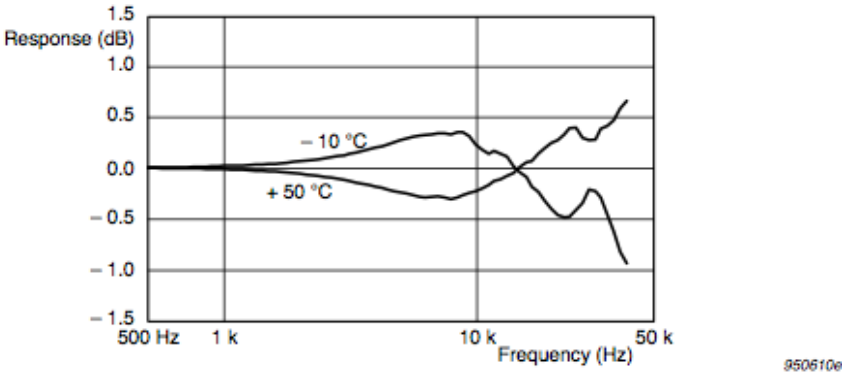



**Abb. 3.16** Schwankungen des Freifeldfrequenzganges in Abhängigkeit von der Temperatur, bezogen auf Raumtemperatur 20°C [3].

### *Atmosphärische Druckschwankungen*

Die Kapsel eines Druckmikrofons besitzt ein Ausgleichkanal, um atmosphärische Druckschwankungen auszugleichen. Dadurch wird gewährleistet, dass nur der zu messende Wechseldruck von der Membran erfasst wird (siehe Kapitel 3.2.1). Allerdings ändert sich mit steigendem Luftdruck die Dichte und Steifigkeit der Luft innerhalb der Kapsel. Dies hat zur

Folge, dass sich die Impedanz des Gehäuses ändert und im Endeffekt die Ausgangsspannung des Mikrofons beeinflusst wird[3].

***Luftfeuchtigkeit***

Die Membranen einige Mikrofonmodelle sind mit einer Quarzschicht überzogen, die Feuchtigkeit aufnimmt. Dadurch verringert sich die Membransteifigkeit, was zu einem erhöhten Übertragungsfaktor führt. Kondenswasserbildung innerhalb der Elektronik kann eventuell zu einer Fehlfunktion des Messsystems führen und sollte auf jeden Fall vermieden werden[3].

## 3.4 Kalibrierung

Der Übertragungsfaktor eines Messgeräts wird, wie weiter oben beschrieben, als Verhältnis von Ausgangsgröße zu Eingangsgröße definiert. Bei einem elektroakustischen Wandler sind die Ausgangsparameter elektrische Größen wie Strom und Spannung, die Eingangsparameter physikalische Größen wie Druck, Schnelle oder Beschleunigung. Die Ermittlung der Empfindlichkeit wird als Kalibrierung bezeichnet. Dabei dienen die physikalischen Grundeinheiten als absolute Referenz für die Messungen. Es ist wichtig, dass diese international auf anerkannte Weise abgeglichen sind. Um zu aussagekräftigen und vergleichbaren Ergebnissen zu kommen, muss weiters die Messgenauigkeit der entsprechenden Kalibrierungsmethode bekannt sein, die zuvor empirisch ermittelt wurde. Sind beide Bedingungen erfüllt, kann von *traceability*, also Nachverfolgbarkeit des Ergebnisses über die gesamte Messkette bis zu den SI-Grundeinheiten gesprochen werden. In erster Linie müssen Messmikrofone kalibriert werden, um eine möglichst korrekte Messung durchführen zu können. Dies impliziert, dass durch die Kalibrierung die Einhaltung von Normen, gesetzlichen Bestimmungen oder Kundenwünschen bestätigt bzw. die Stabilität und fehlerfreie Funktion des Messaufbaus überprüft wird. Auch wird dadurch auf äußere Faktoren der entsprechenden Messumgebung, wie Druck- oder Temperaturschwankungen Rücksicht genommen[3].

### 3.4.1 Reziprozitätsmethode

Hierbei kommen 3 Mikrofone zum Einsatz, die auch reziprok, also als Schallquelle einsetzbar sein müssen. Dies ist bei Kondensatormikrofonen im Allgemeinen möglich, da es zu einer Membranauslenkung kommt, wenn der Polarisationsspannung der Kapsel eine Wechselspannung überlagert wird. Jeweils 2 Mikrofone werden mittels eines luftdicht verschlossenen, zylindrischen Kupplers übereinander angeordnet, wobei ein Mikrofon als Empfänger, und das andere als Schallquelle dient. Insgesamt sind drei Messungen notwendig, um für alle Kombinationen ein Ergebnis zu ermitteln. Es werden die Ausgangsspannung des Empfängers, sowie die Eingangsspannung des Transmitters gemessen. Das Verhältnis der beiden ergibt die elektrische Transferimpedanz der Anordnung. Weiters müssen die Geometrie des Kupplers, die Eigenschaften des eingeschlossenen Mediums, sowie die akustischen Impedanzen der Mikrofone bekannt, sein um die akustische Transferimpedanz zu ermitteln. Das Verhältnis der beiden Transferimpedanzen entspricht dem Produkt der Empfindlichkeiten der beiden Mikrofone, sodass sich insgesamt ein Gleichungssystem mit drei Gleichungen und drei Unbekannten

$$M_{p,A} \cdot M_{p,B} = \frac{Z_{e,AB}}{Z_{a,AB}} \qquad M_{p,B} \cdot M_{p,C} = \frac{Z_{e,BC}}{Z_{a,BC}} \qquad M_{p,C} \cdot M_{p,A} = \frac{Z_{e,CA}}{Z_{a,CA}}$$

wobei

$M_{p,A}, M_{p,B}, M_{p,C}$ Übertragungsfaktoren der Mikrofone A, B und C

ergibt. Wird dieses gelöst, erhält man die Übertragungsfaktoren der jeweiligen Mikrofone[12].

Die Reziprozitätsmethode ist ein sehr genaues Verfahren, mit dem eine Genauigkeit von etwa ±0,5 dB erreicht wird. Es ist allerdings recht aufwendig und kostspielig, weshalb es daher in erster Linie in primären Kalibrierungslabors eingesetzt wird[4].

### 3.4.2 Vergleichsmethode

Ein relativ einfaches Verfahren stellt die Kalibrierung durch Vergleich dar. Hierbei werden jeweils die Empfindlichkeit eines Referenzmikrofons mit bekannten Eigenschaften und die des zu kalibrierenden Mikrofons gemessen. Die Empfindlichkeit des Probanden ergibt sich direkt als Summe der Empfindlichkeit des Referenzmikrofons und der Pegeldifferenz aus

beiden Messungen. Es wird zwischen Komparations- und Substitutionsmethode unterschieden. Bei Komparation wird die Messung an beiden Geräten gleichzeitig durchgeführt, was notwendig ist, wenn das Schallfeld nicht über einen längeren Zeitraum konstant gehalten werden kann. Dabei müssen Referenz und Proband allerdings von gleicher Bauart sein, da sie ansonsten das Schallfeld auf unterschiedliche Weise beeinflussen würden und das Ergebnis verfälscht wäre. Bei der Substitutionsmethode werden die Mikrofone nacheinander vermessen, das Testsignal muss dabei exakt wiederholbar sein um das Resultat nicht zu verfälschen[4].

### 3.4.3 Elektrostatischer Aktuator

Hierbei wird das zu kalibrierende Mikrofon mit freigelegter Membran in eine Vorrichtung gespannt und in geringem Abstand über ein so genanntes Eichgitter positioniert. Dazwischen befindet sich ein Isolator aus geschliffenem Glas. Das Gitter wird nun über einen hochohmigen Widerstand mit einer Gleichspannung von 800 V polarisiert, die mit einem Messsignal in Form einer Wechselspannung mit unterschiedlicher Amplitude von 10 V bis 100 V überlagert wird. Auf die Membran wirkt dadurch eine eingeprägte Flächenkraft, die in etwa dem Schalldruck im Druckfeld entspricht. Allerdings werden die akustische Impedanz und die Druckverteilung an der Membran durch das Eichgitter nicht auf dieselbe Weise beeinflusst, wie vom eigentlichen Schutzgitter des Mikrofons. Daher entspricht der Frequenzgang der Aktuator-Messung nicht exakt dem wahren Druckfeldfrequenzgang. Um weiters den Diffus- und Freifeldfrequenzgang zu ermitteln, muss der gemessene Verlauf mit einer entsprechenden Korrekturkurve gewichtet werden[4]. In Abb. 3.17 ist die schematische Anordnung des Kalibrierungsaufbaus mit Komponenten der Firma G.R.A.S. Sound & Vibration zu sehen.

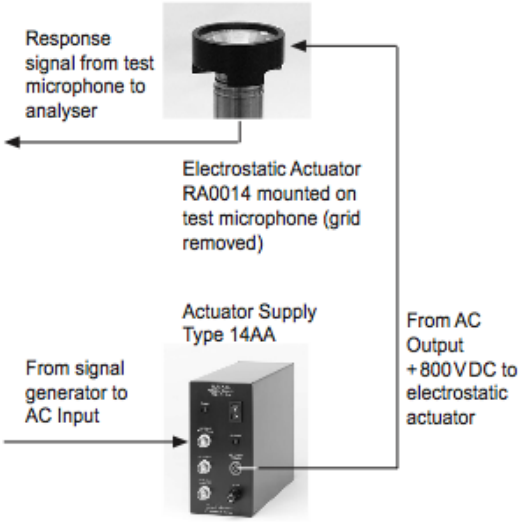



**Abb. 3.17** Prinzipieller Aufbau der Aktuatorkalibrierung[14].

Diese Methode hat eine höhere Ungenauigkeit als andere Kalibrierungsmethoden, kann jedoch ohne viel Aufwand über einen großen Frequenzbereich durchgeführt werden. In der Produktion wird sie aufgrund ihrer Schnelligkeit häufig angewendet, um die im Datenblatt angegebenen Diffusfeld- und Freifeldfrequenzgänge rechnerisch zu ermitteln[4].

### 3.4.4 Pistonphon und Schallpegelkalibrator

Eine einfache Methode für die Ermittlung der frequenzabhängigen Empfindlichkeit eines Messmikrofons ist die Verwendung eines Pistonphons. Wie in Abb. 3.18 dargestellt, besteht das Gerät aus einer kleinen Druckkammer mit einer für das zu kalibrierende Mikrofon vorgesehenen Öffnung an der Stirnseite. Für den statischen Druckausgleich befindet sich eine kleine Kapillare in der Kammerwand. Ein Elektromotor betreibt einen Kolben, der sich in das Volumen schiebt und durch seinen Hub und Durchmesser genau definierte periodische Volumenänderungen hervorruft[3], [8].

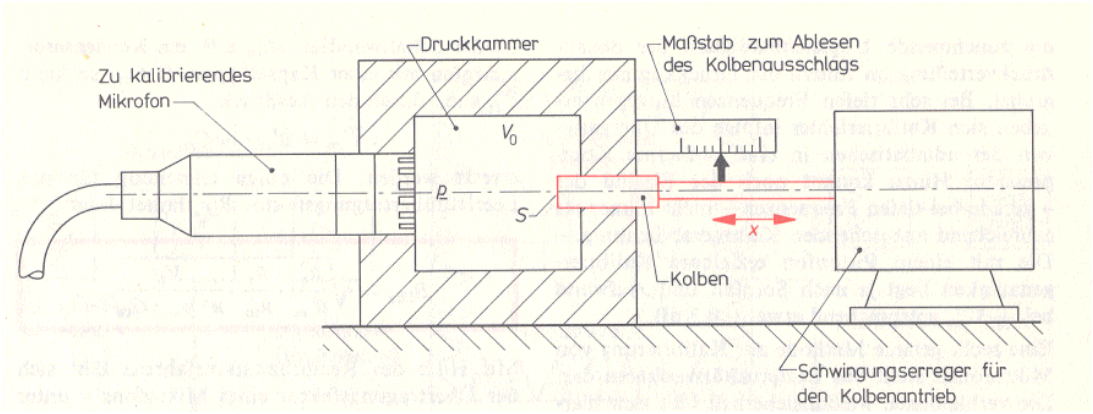



**Abb. 3.18** Prinzipieller Aufbau eines Pistonphons zur Mikrofonkalibrierung [8]

Somit wird ein Referenzschalldruck erzeugt, der auf die Mikrofonmembran wirkt. Ein Nachteil dieser Kalibrierungsmethode besteht in der Tatsache, dass nur ein kleiner Frequenzbereich von etwa 30 bis 300 Hz abgedeckt wird. Bei höheren Frequenzen bzw. kleineren Wellenlängen ist die Bedingung eines im gesamten Volumen gleichmäßigen Schalldrucks nicht mehr gegeben. Die untere Grenzfrequenz ist durch die Hochpasswirkung des Ausgleichskanals bestimmt[8].

Auf ähnliche Weise funktionieren Schallpegelkalibratoren, die mit einem Sinusoszillator einen Kalibrier-Ton mit einem Referenzpegel von für gewöhnlich 94 dB erzeugen, was dem Schalldruck von 1 Pa entspricht. Die Frequenz beträgt normalerweise 1 kHz, da es in diesem Fall möglich ist eine Kalibrierung bei eingeschalteten Bewertungsfiltern durchzuführen. Auch in diesem Fall kann man aufgrund des schmalbandigen Testtons keine Aussage über den Frequenzgang getroffen werden[3].

Abschließend sind in Tabelle 3.1 die Messgenauigkeiten der besprochenen Kalibrierungsmethoden zusammengefasst. Zu beachten ist dabei, dass diese nicht die einzigen bestimmenden Faktoren bei der Wahl des Verfahrens darstellen. Eine hochpräzise Kalibrierung ist oft mit viel Zeit- und finanziellem Aufwand verbunden, schnellere und unterwegs einsetzbare Methoden büßen dafür bei der Genauigkeit ein. Die Wahl des Kalibrierungsverfahrens hängt wie die Wahl des Messmikrofons von Anwendungsgebiet und Zielsetzung ab.

| Method | Uncertainty |
|---|---|
| Reciprocity Calibration | 0.03 to 0.05 dB |
| Comparison Method | 0.06 to 0.14 dB |
| Substitution Method | 0.06 to 0.14 dB |
| Pistonphone<br>Sound Level Calibrator | 0.07 to 0.3 dB |
| Actuator Frequency Response | 0.1 to 0.5 dB |

**Tabelle 3.1** Messungenauigkeiten (2-fache Standardabweichung) verschiedener Kalibrierungsverfahren[3].

# 4 Einsatz von Messmikrofonen in der Tontechnik

Messmikrofone werden häufig in der Industrie bei der Bestimmung verschiedener akustischer Parameter eingesetzt, um etwa die Einhaltung gewisser Normen und gesetzlicher Vorschriften bezüglich der Geräuschentwicklung von Produkten zu gewährleisten. In Zeiten immer größerer Lärmbelastung durch Auto- und Flugverkehr für Anrainer, sowie eines gestiegenen Pflichtbewusstseins beim Arbeitnehmerschutz, gewinnen behördliche Schallpegelmessungen im öffentlichen Raum und am Arbeitsplatz immer mehr an Bedeutung. Im Zuge dieser Arbeit soll der Fokus allerdings auf tontechnisch relevante Einsatzgebiete von Messmikrofonen liegen, einige Bereiche werden im Folgenden angesprochen.

## 4.1 Pegelmessung bei Veranstaltungen

Musikalische Darbietungen sind oft mit einer großen Lautstärke verbunden, wodurch sowohl Publikum, als auch Teilnehmer einer hohen Lärmbelastung ausgesetzt sein können. Aus diesem Grund werden im Zuge des Arbeitnehmerschutzes Lärmpegelmessungen durchgeführt. Für gewöhnlich werden dabei entweder der A-bewertete, energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$, oder der Tageslärmexpositionspegel $L_{EX,8h}$, sowie der Spitzenschalldruckpegel $L_{C,peak}$ ermittelt [9]. Zur Messung werden entweder kompakte,

tragbare Schallpegelmessgeräte, oder computerbasierte Messsysteme mit entsprechender Analysesoftware und Messmikrofonen eingesetzt[3].

### 4.1.1 Orchester

Orchestermusiker sind häufig einer großen Lärmbelastung ausgesetzt, in Tabelle 4.1 ist die typische Lärmexposition nach Instrumentengruppen angeführt. Man sieht, dass beinahe alle Beteiligten einem $L_{A,eq}$ von 90 dB(A) und darüber ausgesetzt sind, was auf Dauer für das Gehör sehr belastend ist und zu dauerhaften Schäden führen kann[9].

| Berufliche Tätigkeit | $L_{A,eq}$ (dB) | Gehörschutz erforderlich? |
|---|---|---|
| **Orchestermusiker/innen** | | |
| Dirigent/innen | 86 | eventuell |
| Bläser und Schlagzeug | 90 | ja |
| Violinen, Violen | 90 | ja |
| Celli, Kontrabässe | 86 | eventuell |
| Piccolo, Querflöte | 90 | ja |
| Holzblasinstrumente | 90 | ja |
| Blechblasinstrumente | 95 | ja |
| Harfe | 90 | ja |
| Schlagzeug | 90 | ja |
| **Gesang** | | |
| Sänger/in | 95 | ja |
| Chorsänger/in | 86 | eventuell |

**Tabelle 4.1** Typische Lärmbelastung im Orchester [9].

Laut Arbeitsinspektion des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit gelten ein $L_{A,eq}$ ab 85 dB(A) sowie ein $L_{C,peak}$ von 137 dB(C) als gefährdend, die Messungen dienen daher als Bewertungsgrundlage, anhand derer weiterführende Präventivmaßnahmen gesetzt werden. Diese können zum Beispiel in einer verringerten Expositionsdauer der Musiker, einer veränderten Sitzordnung im Orchester oder im Tragen eines Gehörschutzes manifestiert sein. Ebenso kann die Lärmbelastung durch gezieltes Einbringen von Absorbermaterial vermindert werden[9].

### 4.1.2 Diskotheken und Bars

Einer ähnlichen Problematik sind die Mitarbeiter von Tanzlokalen ausgesetzt, wie die durchschnittlichen Lärmbelastungen in Tabelle 4.2 zeigen. In diesem Fall ist allerdings auch der Anrainerschutz zu berücksichtigen und entsprechende Maßnamen zur Schalldämmung

nach außen müssen getroffen werden, um die gesetzlichen Vorschriften zu erfüllen. Häufig werden in Diskotheken Schallpegelmesser für eine permanente Überwachung stationär montiert. Die Lärmexposition für Mitarbeiter kann zum Beispiel durch gezielte Ausrichtung der Schallquellen auf die Tanzfläche, architektonische und raumakustische Maßnahmen, Schallgedämmte Pausenräume oder Gehörschutz verringert werden[9]

| Personengruppe | $L_{A,eq}$ (dB) |
|---|---|
| Discjockey | 96 |
| Barpersonal | 92 |
| Servier- und Abräumpersonal | 93 |
| Security | 96 |

**Tabelle 4.2** Durchschnittliche Lärmbelastung in Diskotheken[9].

## 4.2 Optimierung von Lautsprechersystemen

Ein weiters Einsatzgebiet von Messmikrofonen ist das Einmessen von Lautsprecheranlagen, sowohl im HiFi- und Studiobereich, als auch bei großen Beschallungssystemen. Dabei wird ein Testsignal entweder als Sinussweep oder MLS-Signal über das zu analysierende System abgespielt und mit einem oder mehreren Messmikrofonen an der Hörposition aufgenommen. Bei großen Veranstaltungen wird etwa der Publikumsbereich, bei Studiomonitoren die übliche Abhörposition als Schallsenke gewählt. Mit Hilfe einer Analysesoftware wird die Übertragungsfunktion des Raumes oder Ortes ermittelt, die aus der Art der Aufstellung des Beschallungssystems resultiert, und eine inverse Entzerrungskurve ermittelt. Auf diese Weise ist es möglich unerwünschte Reflexionen oder Raummoden mit Methoden der Signalverarbeitung zu neutralisieren oder zumindest einzudämmen[11].

# 5 Marktübersicht

## 5.1 Vergleich

In diesem Kapitel soll ein Überblick des aktuellen Angebots an Messmikrofonen geschaffen werden. Dabei wurden Modelle verschiedener Hersteller und Preisklassen in einer tabellarischen Gegenüberstellung verglichen. In erster Linie soll dabei der Frage nachgegangen werden, welche Parameter für die teils immensen Preisunterschiede zwischen Einsteigermodellen und hochklassigen Laborgeräten verantwortlich sind. Es wird auch untersucht, inwiefern billigere Modelle für vernünftigen Messeinsatz geeignet sind und wie es sich generell mit dem Preis-Leistungsverhältnis verhält. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse einer Testreihe[9], bei manchen Modellen, für die kein Ergebnis zur Verfügung stand, die Werte aus dem Datenblatt des Herstellers herangezogen und verglichen.

[9] Swen Müller: *Messmikrofone* in: *Production Partner* 2/09 bis 9/09; für diese Arbeit wurden Ergebnisse der Ausgaben 3/09 und 4/09 entnommen.

| Hersteller | Modell | Preis (UVP) in EUR |
|---|---|---|
| Audix* | TR-40 | 199,00 |
| Behringer* | ECM8000 | 68,00 |
| Beyerdynamic* | MM1 | 178,00 |
| Brüel & Kjær* | Kapsel 4190<br>Vorverstärker 2669 | 1.910,00 |
| DPA* | 4007 | 2.142,00 |
| G.R.A.S Sound & Vibration** | Kapsel 40AE<br>Vorverstärker 26AK | 1.677,00 |
| Microtech Gefell** | Kapsel MK 250<br>Vorverstärker MK 10 | 760,00<br>490,00 |
| t.bone* | MM-1 | 79,00 |

**Tabelle 5.1** Zum Vergleich herangezogene Mikrofone.

Die Preisspanne zwischen den billigsten und teuersten verglichenen Modellen ist sehr hoch, es sind sowohl extern gespeiste Geräte, als auch Elektretmikrofone vertreten, weshalb die Kenndaten nicht immer sinnvoll untereinander vergleichbar sind. Das Ziel ist daher nicht primär eine Kaufentscheidung zu erleichtern, sondern zu untersuchen in welcher Beziehung die qualitativen Parameter zum Kaufpreis stehen. Es werden im Weiteren die wichtigsten Kenndaten gegenübergestellt und besprochen, außerdem exemplarisch Auszüge aus Datenblättern der wichtigsten Hersteller angeführt.

### *Übertragungsfaktor/Empfindlichkeit*

Der Übertragungsfaktor wird in mV/Pa angegeben und stellt ein wesentliches Kriterium für einen niedrigen Grundgeräuschpegel dar (siehe Kapitel 3.3.1). Die angegebenen Werte stammen entweder von den herangezogenen Messergebnissen oder aus dem Datenblatt des Herstellers, wie in der Tabelle angegeben.

* Zugrunde liegende Information von Testreihe der Zeitschrift *Production Partner* und Datenblatt des Herstellers entnommen.

** Zugrunde liegende Information dem Datenblatt des Herstellers entnommen.

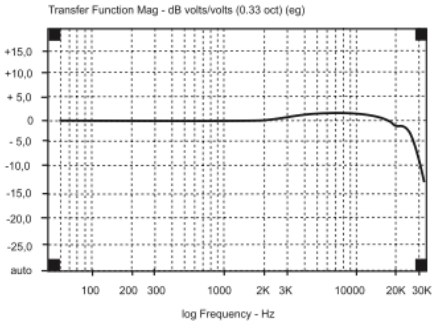
| **Hersteller** | **Modell** | **Übertragungsfaktor [mV/Pa]** |
|---|---|---|
| Audix | TR-40 | 9,5 |
| Behringer | ECM8000 | 12,4 |
| Beyerdynamic | MM1 | 15,2 |
| Brüel & Kjær | 4190 + 2669 | 50,1 |
| DPA | 4007 | 2,3 |
| G.R.A.S Sound & Vibration | 40AE + 26AK | 50 |
| Microtech Gefell | MK250 + MK10 | 50 |
| t.bone | MM-1 | 20,1 |

**Tabelle 5.2** Übertragungsfaktor der einzelnen Modelle

Hier erkennt man den eindeutigen Trend, dass der Übertragungsfaktor mit dem Preis ansteigt. Das DPA 4007 fällt dabei aus dem Rahmen, da es sich prinzipiell um ein Studiomikrofon handelt, welches für besonders hohe Pegel, wie etwa bei Schlagzeugaufnahmen dimensioniert ist. Um ein Übersteuern von Mischpulteingangsverstärkern zu verhindern, ist ein 4:1 Übertrager integriert. Der tatsächliche Übertragungsfaktor liegt also um den Faktor 4 höher[7].

**SPECIFICATIONS**

| | |
|---|---|
| Type | electret condenser, omni-directional |
| Impedance | 600 Ohms |
| Sensitivity | -60 dB |
| Frequency response | 15 Hz to 20 kHz |
| Connector | gold-plated XLR |
| Phantom power | +15 V to +48 V |
| Weight | app. 120 g |



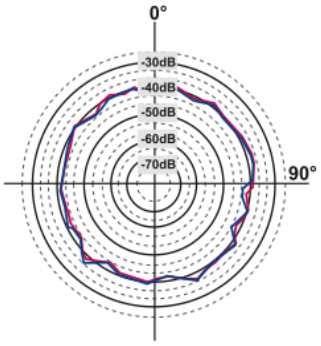




**Abb. 5.1** Auszug aus dem Datenblatt des Behringer ECM8000. Es gibt keinerlei Angaben zum Eigenrauschen, Grenzschalldruckpegel oder Randbedingungen bei der Ermittlung des angegebenen Übertragungsmaßes[10].

Bemerkenswert ist, dass die Hersteller der günstigeren Messmikrofone entweder den unbelasteten Leerlauf-Übertragungsfaktor in ihren Datenblättern angeben, oder gar nicht explizit vermerken (siehe Abb. 5.1), ob die Belastung durch den Vorverstärker bei den Angaben berücksichtigt wurde. Für die professionellen Mikrofone sind zum Teil sehr ausführliche Spezifikationen und Diagramme im Datenblatt vorhanden, Abb. 5.2 enthält als Beispiel die Angaben zur Microtech Gefell MK 250 Kapsel.

[10] Entnommen aus: http://www.massey.ac.nz/~tjmoir/ecm8000.pdf (Stand 06.11.2009)

| | | |
|---|---|---|
| | **Measuring Microphone Capsule MK 250** in wooden case | Order-No. 311122 |

**SPECIFICATIONS** CE Certificate

| | | |
|---|---|---|
| | **Measuring Microphone Capsule** | **MK 250** |
| | | **21.31- 93.67 PTB-licence no. for official calibration** |
| | Transducer type | Capacitive pressure transducer |
| * | Frequency range free-field | 3,5 Hz ... 20 kHz (± 2 dB) |
| * | Sensitivity | 50 mV/Pa |
| | Max. SPL for THD ≤ 3 % at 1 kHz | 146 dB |
| | Inherent noise with preamplifier MV 204 | 15 dBA |
| | Polarization voltage | Backelectret |
| * | Polarized cartridge capacitance at 1 kHz | 17 pF |
| | Operating temperature range | -50 ... +100 °C |
| | Main ambient temperature coefficient | ≤ 0,01 dB/K |
| | Main ambient pressure coefficient | $-1x10^{-5}$ dB/Pa |
| | Diameter with protection grid | 13,2 ± 0,02 mm |
| | Diameter without protection grid | 12,7 ± 0,02 mm |
| | Height | 16,4 mm |
| | Weight | 9 g |
| | Preamplifier thread | 11,7 mm 60 UNS |
| | Protection grid thread | 12,7 mm 60 UNS |

* individually calibrated

**Abb. 5.2** Spezifikationen im Datenblatt der MK 250 Kapsel von Microtech Gefell[11].

### *Dynamikumfang*

Neben der Empfindlichkeit ist der erfassbare Dynamikbereich ein sehr wichtiges Kriterium für die Qualität des Messmikrofons. In Tabelle 5.3 sind der Grundgeräuschpegel in dB(A) und der Grenzschalldruckpegel für maximal 3% THD der einzelnen Modelle gegenübergestellt. Als Differenz der beiden ergibt sich ein Dynamikumfang, der aber immer in Bezug auf die beiden Grenzwerte beurteilt werden muss. Das Eigenrauschen beim DPA 4007 liegt beispielsweise um etwa 10 dB höher als jenes des Brüel & Kjær-Systems und ist daher für Messungen von leisen Schallquellen nicht so sehr geeignet. Der Grenzschalldruckpegel liegt beim DPA 4007 dafür um etwa 15 dB höher, was durch seine ursprüngliche Funktion als Schlagzeugmikrofon bedingt ist. Es ist daher für Schallquellen mit besonders hohem Pegel prädestiniert. Im Vergleich ist ersichtlich, dass die günstigeren Modelle sowohl beim Eigenrauschen, als auch beim Grenzschalldruckpegel nicht an die professionellen Geräte herankommen. Der Dynamikumfang beträgt bei allen unter 100

[11] Entnommen aus: http://www.microtechgefell.de/prod/mess/kapsel/mk250/mk250_0.htm (Stand 06.11.2009)

dB(A), während die Kapseln von B&K, Microtech Gefell, DPA und G.R.A.S. problemlos mehr als 120 dB(A) Dynamikunterschiede erfassen können.

| **Hersteller** | **Modell** | **Noise SPL [dB(A)]** | **SPL bei 3% THD [dB]** | **Dynamikumfang [dB(A)]** |
|---|---|---|---|---|
| Audix | TR-40 | 28 | 120 | 92 |
| Behringer | ECM8000 | 29,3 | 120,5 | 91,2 |
| Beyerdynamic | MM1 | 26,8 | 123,2 | 96,4 |
| Brüel & Kjær | 4190 + 2669 | 13,7 | 138,2 | 124,5 |
| DPA | 4007 | 23 | 153,5 | 130,5 |
| G.R.A.S Sound & Vibration | 40AE + 26AK | 14,5 | 148 | 133,5 |
| Microtech Gefell | MK250 + MK 10 | 15 | 146 | 131 |
| t.bone | MM-1 | 23,9 | 118 | 94,1 |

**Tabelle 5.3** Grundgeräuschpegel, Grenzschalldruckpegel und resultierender Dynamikumfang

### *Frequenzgang*

Wie etwa in Abb. 5.2 bzw. Abb. 5.1 ersichtlich ist, wird vom Hersteller ein Nutzfrequenzbereich angegeben, in dem die Empfindlichkeit annähernd (zum Beispiel innerhalb ± 2 dB) konstant sein soll. Für gewöhnlich werden die angegebenen Freifeldfrequenzgänge allerdings rechnerisch aus dem Aktuatorfrequenzgang (siehe Kapitel 3.4.3) ermittelt. Der gemessene reale Freifeldfrequenzgang unterscheidet sich, wie auch in der herangezogenen Messreihe zum Teil erheblich von jenem im Datenblatt. Auch hier ist die Tendenz zu erkennen, dass die günstigeren Modelle wie das t.bone MM-1 oder das Behringer ECM 8000 etwa im Vergleich zum Brüel & Kjær-System stärker vom idealen Frequenzgang abweichen.

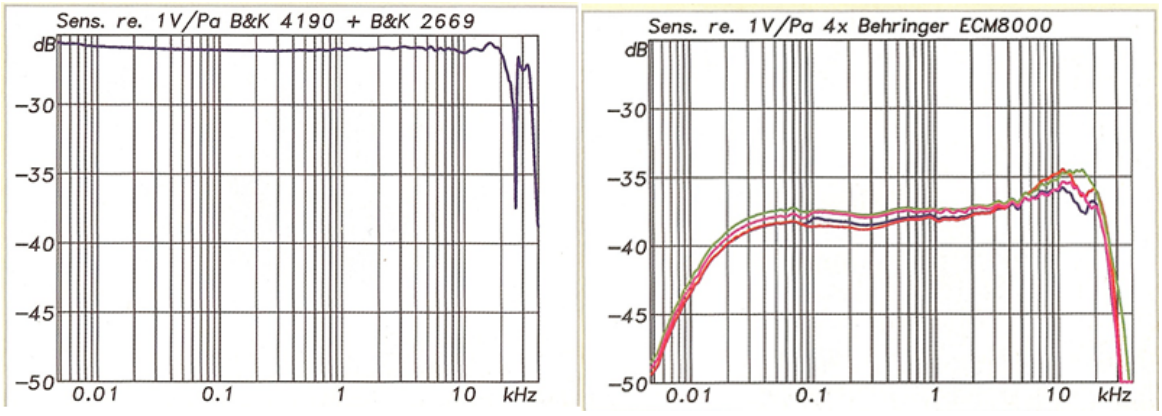



**Abb. 5.3** Vergleich der Frequenzgänge von B&K 4190 + B&K 2669 vs. Behringer ECM8000[5].

## 5.2 Wahl des Messmikrofons

Der Vergleich der Kenndaten zeigt, dass zwischen Einsteigermodellen und professionellen Messmikrofonen teilweise erhebliche Unterschiede bestehen. Besonders beim Eigenrauschen und maximalem SPL können die günstigen, zum Großteil in Ostasien gefertigten Geräte nicht mithalten. Ein weiterer negativer Aspekt bei diesen Mikrofonen ist, dass die preiswerte Herstellung eine breitere Serienstreuung der Qualitätsparameter nach sich zieht. Das bedeutet, dass die realen Kenndaten von den angegebenen Werten stärker abweichen können, als bei Herstellern mit höchsten Qualitätsstandards. Diese Streuung lässt sich nur in Testreihen mit mehreren Probanden ermitteln und dient als weiteres Gütekriterium für Messgeräte. Für den Gelegenheitsanwender wird es sich zumeist nicht auszahlen in teuerste Apparatur zu investieren, da der Preisunterschied zu ebenfalls brauchbaren Mikrofonen, nicht proportional mit der Qualität der erzielbaren Messergebnisse steigt. Aus diesem Grund ist es wichtig das Preis-Leistungsverhältnis der in Frage kommenden Modelle gegenüberzustellen. Die Ergebnisse der zitierten Messreihe zeigen, dass die besonders günstigen Mikrofone von Behringer und t.bone, abgesehen vom geringen Dynamikumfang, einen problematischen Frequenzgang aufweisen und auch die Verarbeitung des Gehäuses zum Teil mangelhaft ist. Ersteres hat auch bezüglich Grundrauschen und 3%-THD-Grenze eine hohe Serienstreuung[5]. Beide Modelle verfügen über ein mangelhaftes Datenblatt, wodurch sich etwa eine Kalibrierung als problematisch erweist. Die etwas teureren Mikrofone von Audix und Beyerdynamic stellen einen ganz guten Kompromiss für gelegentliche, aber möglichst akkurate Messeinsätze dar, wobei das letztere über einen höheren Übertragungsfaktor verfügt.

Auch die Serienstreuung hält sich beim Beyerdynamic MM1 in Grenzen, wodurch in Summe die größere Investition im Vergleich zu den ganz billigen Modellen durchaus Sinn ergibt[5].

# 6 Zusammenfassung

Obwohl Messmikrofone auf demselben Wandlerprinzip beruhen, unterscheiden sie sich im Detail zumeist stark von Kondensatormikrofonen, die in der Tonstudiotechnik eingesetzt werden. Andererseits gibt es sowohl hochklassige Studiomikrofone, die ohne weiteres für den objektiven Messeinsatz geeignet sind, als auch solche, deren Aufbau ein Messmikrofonmodell zugrunde liegt. Die Grenzen sind also nicht immer eindeutig definierbar und hängen von den jeweiligen Bedürfnissen ab. Generell ist bei der Wahl des geeigneten Messmikrofons zuerst genau zu überlegen, für welches Einsatzgebiet das Gerät gedacht ist, wie hier noch einmal zusammenfassend besprochen:

- Zu Beginn steht die Art des Schallfeldes der Messumgebung, die Mikrofone sind für gewöhnlich entweder für Freifeld – oder Druckfeldbedingungen ausgelegt. Zwischen Druckfeld- und Diffusfeldmikrofonen ist der Unterschied gering, sodass in der Regel die gleichen Geräte verwendet werden können.

- Weiters sollte man sich überlegen für welche Lautstärken das Messmikrofon optimal sein soll. Ein besonders hoher Grenzschalldruckpegel hat aufgrund der physikalischen Rahmenbedingungen zumeist ein entsprechend höheres Eigenrauschen zur Folge und umgekehrt.

- Viele Parameter stehen in direktem Zusammenhang zueinander, wie Nutzfrequenzbereich und Grundgeräuschpegel. Benötigt man etwa eine sehr hohe obere Grenzfrequenz, so liegt die Wahl bei einem kleinen Membrandurchmesser, da entsprechend kleinere Wellenlängen noch gut erfasst werden können. Der Dynamikumfang bei kleinen Kapseln ist allerdings nach unten hin sehr eingeschränkt, da mit sinkendem Durchmesser der Grundgeräuschpegel steigt. Umso wichtiger ist es

die Rahmenbedingungen der Messung genau zu analysieren um den bestmöglichen Kompromiss zu finden.

- Die Art der Polarisierung spielt bei der Auswahl ebenfalls eine Rolle. Elektretmikrofone haben einerseits den Vorteil, dass sie aufgrund der einfachen Handhabung gut für den mobilen Messeinsatz geeignet sind und unempfindlicher gegen Feuchtigkeit sind. Extern gespeiste Messmikrofone wiederum sind in der Laborumgebung, sowie für Messungen bei hohen Temperaturen die bessere Wahl.

- Neben etwaigen zu erfüllenden Normen und Standards spielt bei Messungen die Umgebung eine große Rolle. Ein Labormikrofon ist meistens weniger robust gebaut, als ein Modell für den mobilen Einsatz. Außerdem sind Messmikrofone, je nach Typ, mehr oder weniger empfindlich gegenüber atmosphärischen Bedingungen.

- Ein nicht zu vernachlässigender Faktor ist der Preis des Messmikrofons. Im Allgemeinen sind auch mit günstigeren Geräten gute Ergebnisse erzielbar, sofern man nicht auf die Einhaltung strenger Normen angewiesen ist.

# 7 Literatur

[1] Marilyn Cooper, Dave Formenti: *Q&A: Differences in Measurement and Studio Microphones,* Sound and Vibration Magazine, p. 2, February 2000

[2] Mark Valentino: *Microphone Handbook,* PCB Piezotronics Inc., http://www.pcb.com/products/literature.php (Stand 10.09.2009)

[3] Brüel & Kjær: *Technical Documentation – Microphone Handbook Vol. 1,* 1996

[4] Swen Müller: *Production Partner* Heft 2/09, p. 95 – 109, 2009

[5] Swen Müller: *Production Partner* Heft 3/09, p. 82 – 90, 2009

[6] Swen Müller: *Production Partner* Heft 4/09, p. 102 – 110, 2009

[7] Thomas Görne: *Tontechnik*, 1. Aufl., Hanser Fachbuchverlag, Leibzig, 2006

[8] Ivar Veit: *Technische Akustik,* 6. Aufl., Vogel Buchverlag, Würzburg, 2005

[9] *Kodex zur Lärmreduktion im Musik- und Unterhaltungssektor*, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Wien, Jänner 2007

[10] Zöllner, Zwicker: *Elektroakustik,* Springer-Verlag, 3. Aufl., Berlin, 1993

[11] Wavecapture & Dan Bävholm: *How to measure sound levels*, www.wavecapture.com, 2006 (Stand 21.09.2009)

[12] Erling Frederiksen, Jørgen I. Christensen: *Pressure Reciprocity Calibration Instruments, Results and Uncertainity,* Brüel & Kjær Technical Review No.1, 1998

[13] Brüel & Kjær: *Primer: Measuring Sound*, www.bksv.com, September 1984

(Stand 06.11.2009)

[14] G.R.A.S. Sound & Vibration: *Selection Guide for Microphones & Preamplifiers*, www.gras.dk, 2004 (Stand 06.11.2009)