



# Mess-Ohren

**Wer Lautsprecher messen will, kommt um die Anschaffung eines verlässlichen Messmikrofons nicht herum. KLANG+TON vermittelt die wichtigsten Grundlagen und stellt ein preiswertes Mikrofon vor. Außerdem gibt's auch noch einen Selbstbau-Vorschlag.**

Zum Lautsprecher-Messen braucht man, das ist klar, ein Mikrofon, das die von den Chassis ausgesandten Schallwellen in äquivalente elektrische Signale umsetzt. Kein Problem, sagt der gewiefte Bastler, da habe ich doch noch in der Band-Wühlkiste aus der Sturm- und Drang-Zeit einige Mikros rumliegen, die müssten's doch tun. Waren ja schließlich damals teuer genug.

Das aber sollte der geneigte Selbstbau-Fan tunlichst lassen, denn da, wo früher der Leadsänger seine Songs reingrölte, kommen auf keinen Fall dem Verhalten des Lautsprechers entsprechende Signale raus. Das liegt weniger am Leadsänger (obwohl es auch da schon einiges an Verstopfung und Korrosion wegen feuchter Aussprache gegeben hat), sondern am Mikrofontyp. Dabei handelt es

sich nämlich in den allermeisten Fällen um ein so genanntes dynamisches Mikrofon, das sozusagen die Umkehrung eines normalen Lautsprechers darstellt: An einer Membran ist eine Schwingspule befestigt, die in den Luftspalt eines Magneten eintaucht. Natürlich ist das Ganze im Detail deutlich anders gelöst, so ist zum Beispiel die Schwingeinheit meist noch deutlich leichter als die eines Kalotten-Hochtöners. Die Schwingspule hat zudem eine viel höhere Impedanz, oft um 600 Ohm. Wie normale Lautsprecher-Chassis ist auch so ein dynamisches Mikro ein sehr komplexes System mit vielen Unlinearitäten, und das äußert sich eben auch in einem Frequenzgang, der alles andere als gerade ist. Oft ist das sogar erwünscht, damit Sängerstimmen oder Instrumente eine besonders charakteristische Klangfarbe bekommen. Und damit scheidet es fürs Messen von Lautsprechern von vornherein aus.

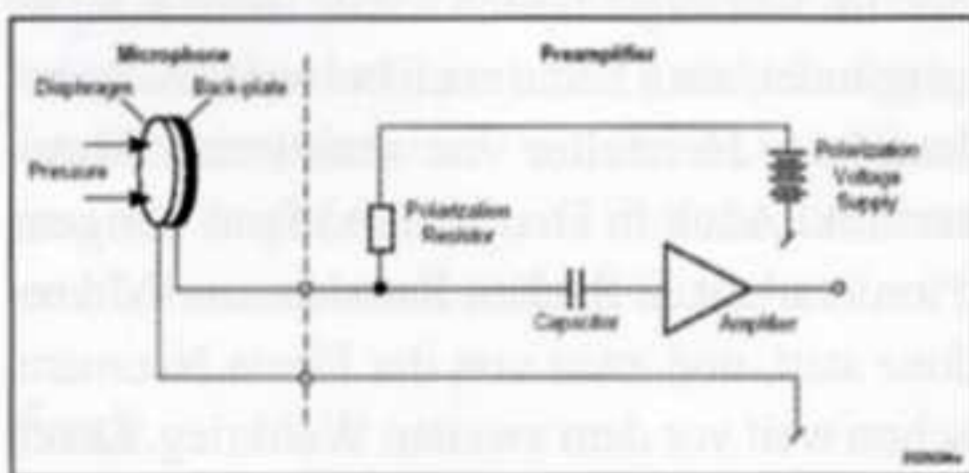
## Basiswissen Messmikrofone

So gut wie ausschließlich als Messmikrofone eingesetzt werden heutzutage so genannte Kondensator-Mikrofone. Der Name kommt nicht von ungefähr: Hinter einer straff gespannten Membran aus Metall oder metalli-

sierter Kunststoffolie sitzt in geringem Abstand (zwischen 15 und 30 Mikrometer) die so genannte Gegenelektrode, die elektrisch komplett von der Membran isoliert ist. Beide zusammen bilden einen Plattenkondensator mit einer bestimmten, definierten Kapazität. Kommt nun die Membran durch auftreffenden Schall ins Schwingen, ändert sich der Abstand zwischen den beiden Platten des Kondensators äquivalent zu den Schallwellen und somit seine Kapazität.

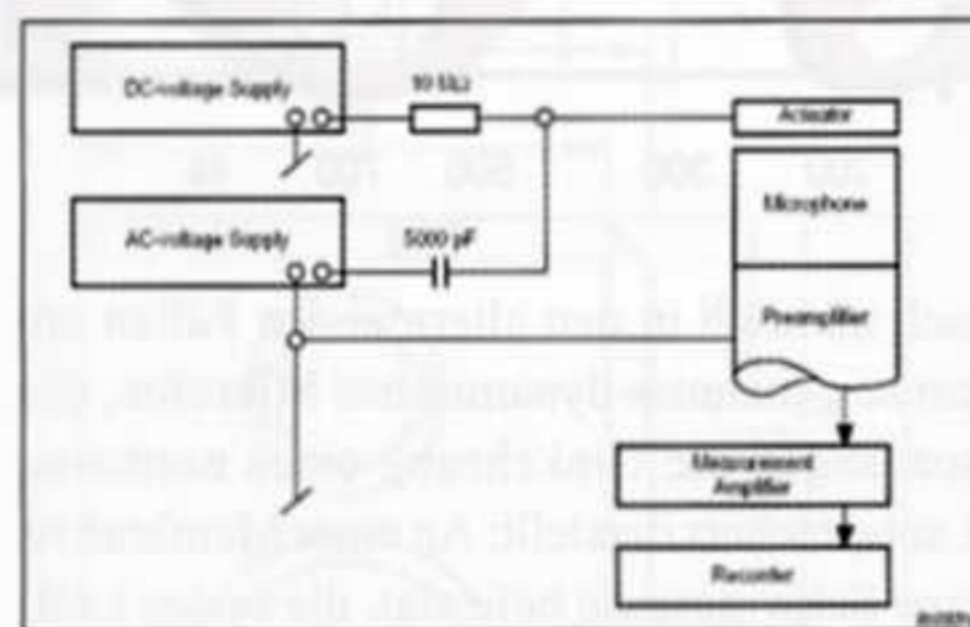
Das Prinzip des Kondensatormikrofons ist übrigens schon ziemlich alt, schon in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts stellte General Electric in Amerika derartige Messmikrofone her. Im Jahrzehnt danach wurde Brüel & Kjaer gegründet, auch heute noch bei weitem der bekannteste Hersteller von akustischer Messtechnik. Auch in Deutschland fand übrigens Pionierarbeit in Sachen Kondensator-Mikrofone statt, und zwar von der Firma Neumann schon weit vor dem zweiten Weltkrieg. Deren Betrieb wurde im Krieg zum Teil in das kleine Städtchen Gefell ausgelagert, das dann Teil der DDR wurde. Das Unternehmen gibt es heute noch und heißt jetzt Microtech Gefell. **KLANG+TON** benutzt beispielweise Mikrofone dieses Herstellers.

Das Prinzip des Kondensatormikros hört sich in der Theorie relativ einfach an. Erst mit der Ausführung wird es dann kompliziert. Zum Beispiel muss man die Änderungen der Kapazität irgendwie in eine messbare Spannung umsetzen können, und dazu ist schon etwas Aufwand nötig. Alle Hersteller dieser Mikros – es sind übrigens noch etliche weitere über die oben genannten hinaus dazugekommen – haben sich erstaunlicher Weise dafür auf eine bestimmte Art und Weise geeinigt. Zunächst wurde das Mikrophon aufgeteilt, in eine so genannte Kapsel und den Vorverstärker. Die Kapseln enthalten nur den Schwingteil, also Membran und Gegenelektrode. Sie gibt es in genormten Größen mit ebenso genormten Gewinden, über die sie sich auf die Vorverstärker, die in einem kleinen Rohr untergebracht sind, aufschrauben lassen. Die Gegenelektrode der Kapsel ist über einen zentrisch sitzenden Kontakt mit dem Vorverstärker verbunden. Der ist übrigens noch gar nicht alles, was man zum Betrieb eines solchen Mikrofons benötigt: Auch eine Spannungsversorgung gehört zwingend mit dazu. Die muss die so genannte Polarisationsspannung bereitstellen, eine Gleichspannung von 200 Volt. Diese wird über den Vorverstärker und einen sehr hochohmigen Widerstand (zwischen 400 Megohm und 10 Gigaohm) auf die Gegenelektrode geleitet. Die sich ändernde Kapazität der Kapsel moduliert dann die Polarisationsspannung und erzeugt als Ergebnis eine dem Schall äquivalente Wechselspannung. Der erwähnte Widerstand muss so groß sein, damit gewährleistet ist, dass auch bei niedrigsten Frequenzen die 200 Volt absolut konstant bleiben. Gemeinsam mit der Kapsel-Kapazität (zwischen 2 und 60 Picofarad) erzeugt er nämlich ein Filter mit sehr niedriger Grenzfrequenz.



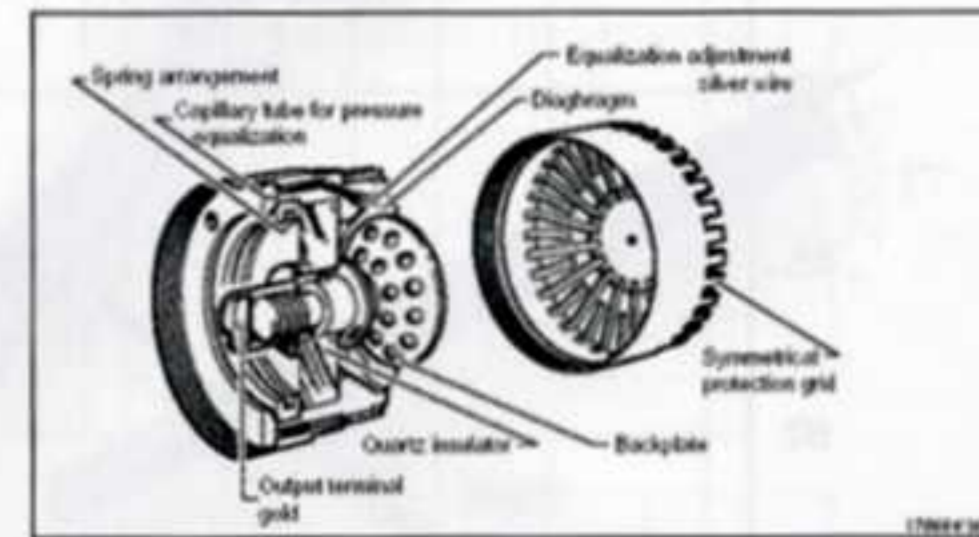
Das Prinzip eines Kondensatormikrofons: Membran (links weiß) und Gegenelektrode (schwarz) bilden einen Kondensator, dessen Kapazität sich durch Schwingungen der Membran ändert. Das moduliert auf die per hochohmigen Widerstand eingekoppelte Polarisations-Gleichspannung eine Wechselspannung, die dann per Kondensator ausgekoppelt und dem Impedanzwandler/Vorverstärker (das Dreieck rechts) zugeführt wird  
Bild: Brüel & Kjaer

Ein Abfall der Spannung durch diesen Widerstand geschieht nicht, da der Stromkreis für Gleichspannung nicht geschlossen ist, die Kapsel als Kondensator verhindert das. Deshalb fließt – außer beim Ein- und Ausschalten zum Laden und Entladen der Kapazität – auch keinerlei Strom. Die Polarisationsspannung erzeugt somit eine konstante elektrische Ladung auf der Gegenelektrode. Im Vorverstärker koppelt ein Kondensator die erwünschte Wechselspannung von der für die weitere Verarbeitung nicht benötigten Gleichspannung ab. Übrigens ist der Begriff „Vorverstärker“ ziemlich irreführend, denn seine Aufgabe ist keineswegs eine Verstärkung des Signals, sondern ausschließlich eine Impedanzwandlung. Eine Kondensator-Mikrofonkapsel hat eine extrem hohe Ausgangsimpedanz (einige zig Megohm), viel höher als sinnvoll konfigurierte Eingänge von Geräten, die das Signal weiterverarbeiten müssen, zum Beispiel Messverstärker oder Analyser.



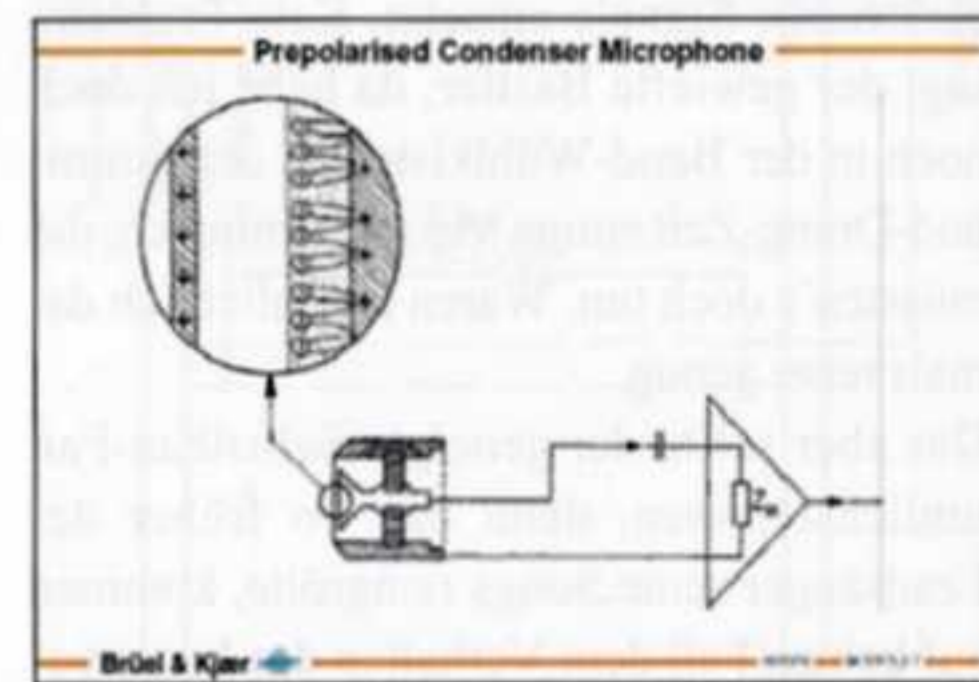
Das elektrostatische Eichgitter wird im geringen Abstand zur Membran montiert (rechts außen) und an eine Gleichspannung zwischen 200 und 800 Volt sowie eine per Kondensator eingekoppelte Wechselspannung zwischen 10 und 30 Volt angeschlossen. Diese Wechselspannung wirkt auf das Mikrophon wie Schall der gleichen Frequenz. Deshalb lässt sich mit dieser Methode der Druckfrequenzgang eines Mikrofons recht genau und unkompliziert messen  
Bild: Brüel & Kjaer

Die Spannung würde sofort zusammenbrechen. Deshalb transformiert der so genannte „Vorverstärker“ die Impedanz so weit herunter, dass sogar sehr lange Anschlusskabel kaum noch ein Problem darstellen, meist bis hinunter zu 50 bis 100 Ohm. Die Spannungshöhe, die von der Kapsel kommt, ändert sich im „Vorverstärker“ kaum, wird sogar meist noch einen Tick abgeschwächt. Wer nun meint, dass aus so einem Kondensator-Mikrofon nicht sonderlich viel Spannung herauskommen kann, liegt ziemlich daneben. Eine typische Einzoll-Kapsel liefert bei 94 dB SPL (SPL= Sound Pressure Level, Schalldruckpegel), was einem Schalldruck von einem Pascal entspricht, eine Spannung von 50 Millivolt. So wird übrigens auch die Emp-



Die Schnittzeichnung einer Kondensatorkapsel: Oben die dünne Metallmembran, darunter die gelochte Gegenelektrode. Unten ist das Gewinde zum Aufschrauben auf den Vorverstärker zu sehen  
Bild: Brüel & Kjaer

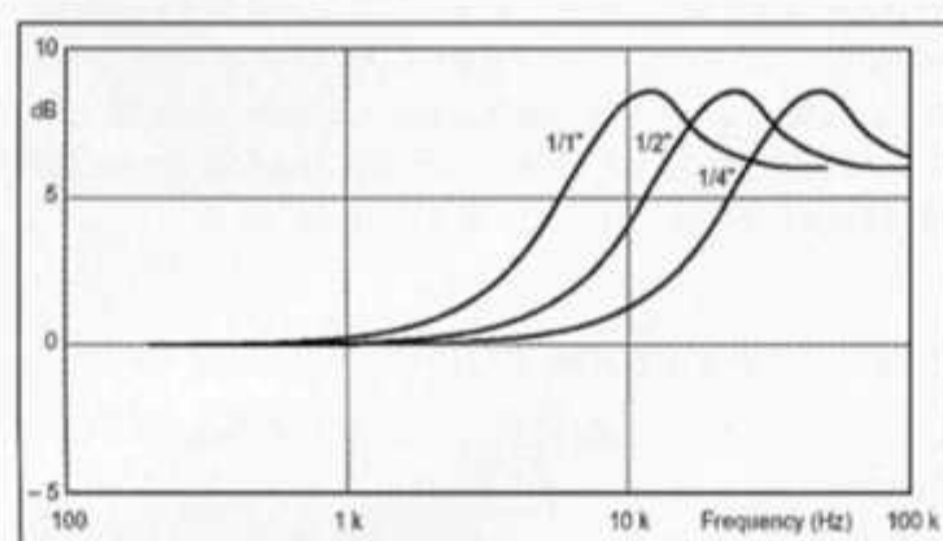
findlichkeit angegeben, in mV pro Pascal. 50 mV hört sich zunächst mal recht gering an, relativiert sich aber, wenn man weiß, dass solche Kapseln Schalldrücke von 140 dB und mehr übertragen können. Und dann (bei 140 dB SPL) erzeugt sie 10 Volt. Da kommt man mit der üblichen Versorgungsspannung für die Vorverstärker von 28 Volt (die ebenfalls von der externen Speisung zur Verfügung gestellt werden muss) an Grenzen, denn 10 Volt RMS bedeuten eine Spitze-Spitze-Spannung von 28,3 Volt. Es gibt vier genormte Meszmikro-Kapselgrößen, Ein-, Halb-, Viertel- und Achtelzoll. In den allermeisten Fällen sind die Produkte der diversen Hersteller untereinander kompatibel, eine Halb Zoll-Mikrofonkapsel von Gefell (passt zum Beispiel problemlos auf einen Vorverstärker von Brüel & Kjaer. Zum Glück für die Freunde hoher Schalldrücke vertragen alle erhältlichen Vorverstärker auch erheblich höhere Versorgungsspannungen, nur stellt die lange nicht jedes Speiseteil zur Verfügung. Ebenfalls erstaunlich: Selbst bei einem Pegel von 140 dB-SPL bewegt sich die Membran nur mit einer Amplitude von weniger als einem Mikrometer. Diese Auslenkung ist also geringer als die



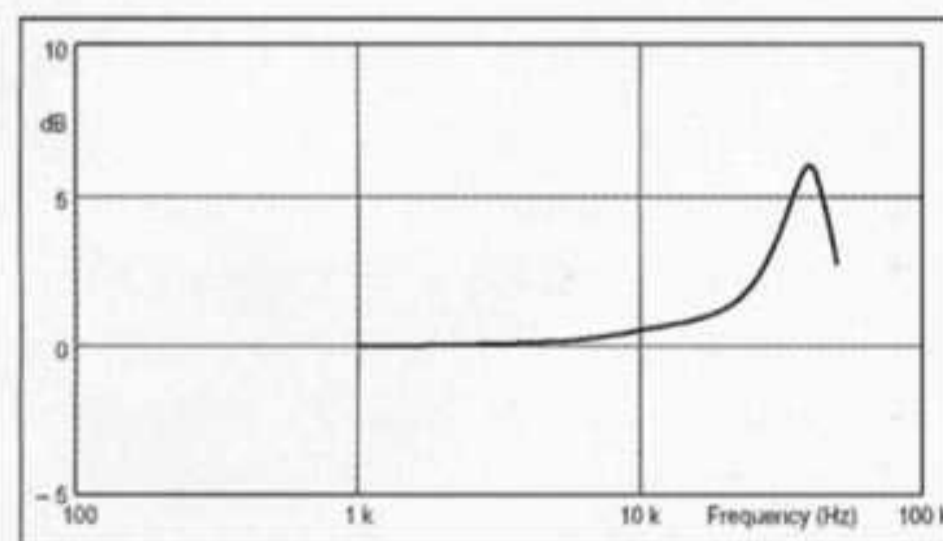
Ein Elektret-Mikrofon benötigt keine Polarisationsspannung, die elektrische Ladung befindet sich auf einer Kunststoff-Folie fest eingebrannt auf der Gegenelektrode. Bemerkenswert: Häufig ist die negative Seite der Folie zur Membran hin montiert, weshalb diese Kapseln phasenrichtig arbeiten. Kapseln mit externer Polarisation drehen die Phase um 180 Grad  
Bild: Brüel & Kjaer

Membrandicke (zwischen 1,5 und 8 Mikrometer, je nach Typ). Daran lässt sich erkennen, dass Kondensatormikrofone extrem linear arbeiten, denn die Membran muss sich kaum bewegen und lässt sich deshalb perfekt unter Kontrolle halten. Sie besteht übrigens meist aus extrem straff gespannter Nickel-Folie. Es gibt auch einige Konstruktionen mit Edelstahl-Legierungen.

Es existiert übrigens die extern angelegte Polarisationsspannung hinaus noch eine weitere Methode, um die Gegenelektrode einer Kondensator-Mikrofonkapsel mit einer elektrischen Ladung zu versehen. Per so genanntem Elektret-Material nämlich, das eine fest „eingebrennte“ elektrische Ladung aufweist. Die Idee dazu geht auf den Wissenschaftler Oliver Heaviside (1850 bis 1925) zurück, der prognostizierte, dass es ein elektrisches Analogon zum Dauermagneten geben müsse. Zu seiner Zeit waren letzterer sowie elektrische und magnetische Felder durchaus schon bekannt. Aus dem Vorhandensein von beiden Feldarten schloss Heaviside, dass es auch ein Material geben müsse, das eine elektrische Ladung dauerhaft enthalten müsse und benannte es „Elektret“ in Ähnlichkeit zu „Magnet“. Es wurden auch bald solche Materialien gefunden, die technische Ausnutzung aber ließ bis in die sechziger Jahre des letzten



Die Freifeldkorrekturen von Mikrofonen berücksichtigen die Änderungen, die die Mikrofone selbst durch Druckstau vor der Membran dem Schallfeld hinzufügen. Hier typische Kurven für Einzell-, Halbzoll- und Viertelzoll-Kapseln  
Bild: Brüel & Kjaer

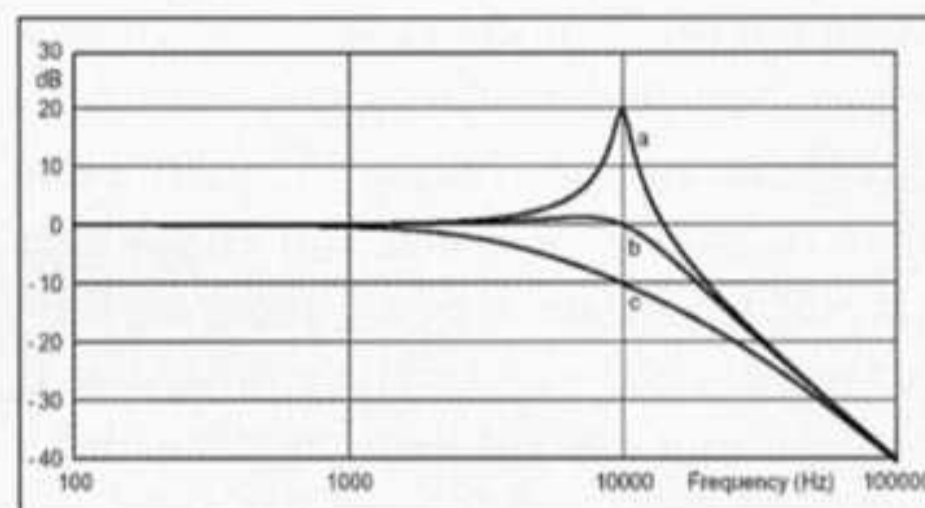


Auch das Schutzgitter einer Mikrofonkapsel fügt dem gemessenen Schall einen Fehler hinzu, wie man an dieser Frequenzgang-Kurve eines Gitters von Brüel & Kjaer erkennen kann  
Bild: Brüel & Kjaer

Jahrhunderts auf sich warten. Dann nämlich entwickelte man Kunststoffe, die eine Ladung dauerhaft aufnehmen und auch über Jahrzehnte hinweg stabil behielten. Elektrete sind ähnlich wie Magnete temperaturempfindlich und verlieren ihre Ladung, wenn sie über einen bestimmten Punkt erhitzt werden. Aber auch dieser Effekt ist mittlerweile bis über 100 Grad im Griff. Hohe Luftfeuchtigkeit kann auch dazu beitragen, dass ein Elektret seine Ladung verliert, allerdings wiederum nur in Kombination mit hohen Temperaturen. Bei Raumtemperatur ist der Effekt vernachlässigbar, so dass solche Mikrofone über Jahrzehnte hinweg stabil bleiben.

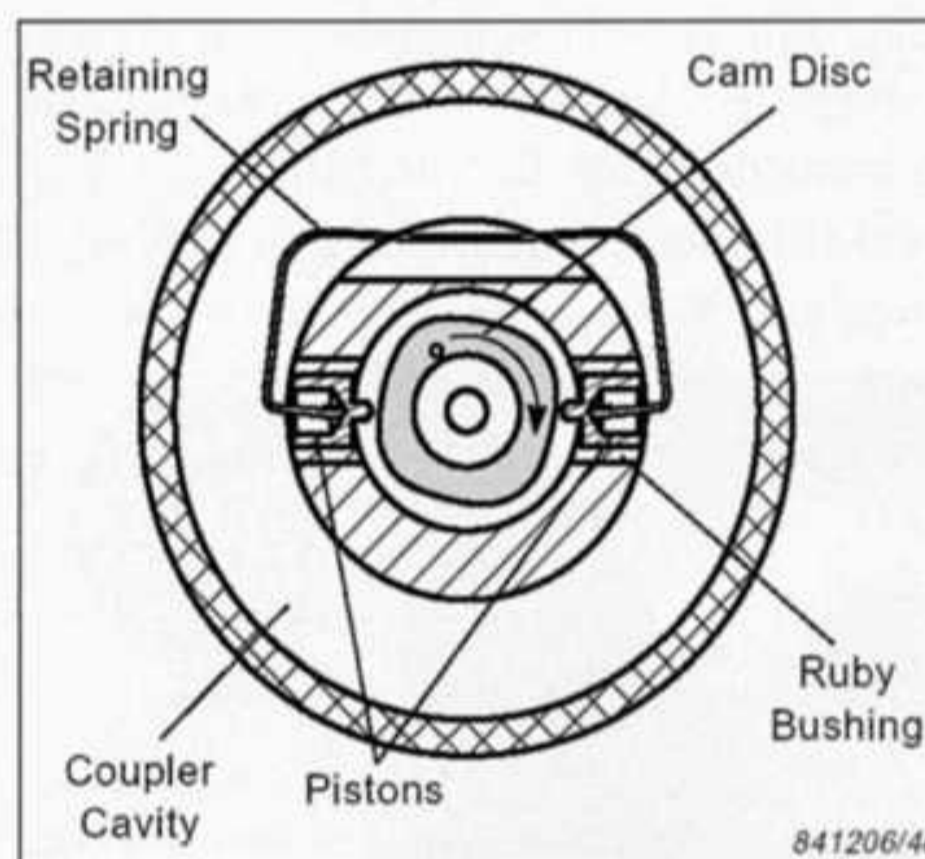
Bei den so genannten dauerpolarisierten Kapseln bringen die Hersteller eine Elektret-Folie auf die Gegenelektrode auf, und zwar mit der negativen Ladungsseite zur Membran. Diese verursacht („influenziert“ im Kontrast zu „induziert“ beim Magneten) eine positive Flächenladung auf der Membran. Bei der Version mit der 200-Volt-Polarisationsspannung ist das übrigens umgekehrt, die Membran ist negativ, die Gegenelektrode positiv geladen. Deshalb drehen solche Kapseln auch die Phase um 180 Grad, während Elektret-Kapseln die Phase nicht ändern. Die Ladung des Elektret wirkt genauso wie eine externe Polarisationsspannung und erzeugt bei Schalleinfall eine Wechselladung aus der Kapazitätsänderung der Kapsel. Elektret-Mikrofone sind wesentlich einfacher zu betreiben, da die aufwendige Erzeugung der Polarisationsspannung komplett wegfällt.

Noch ein Weiteres hat die Einführung von Elektret bei Mikrofonen bewirkt: Dadurch war es möglich, Kondensator-Mikrofone sehr viel preiswerter herzustellen. Aber da haben es die Hersteller am Anfang gleich auch deutlich übertrieben: Statt auf die Gegenelektrode packten sie das Elektret der Einfachheit halber mit auf die Membran, die dadurch erheblich zu schwer wurde und sich auch alles andere als linear verhielt. Solche Mikrofone waren für alle außer den einfachsten Anwendungen – Gegensprechanlagen oder Ähnliches – völlig unbrauchbar. Aber auch das hat sich bald geändert, diverse Hersteller bauen heute kleine, preiswerte Kapseln, die das Elektret wieder auf der Gegenelektrode haben und nennen das dann „Back-Elektret“. Bei diesen Mikros ist sogar schon ein Vorverstärker/Impedanzwandler in Form eines ein-



Über die Dämpfung der Membranresonanz, die per Abstand und Lochung der Gegenelektrode einstellbar ist, lässt sich für Freifeld-Mikrofone der Frequenzgang-Anstieg der Kapseln durch Druckstau und Schutzgitter fast vollständig kompensieren (untere Kurve). Die mittlere Kurve zeigt den Verlauf eines Druckfeld-Mikrofons, bei dem keine Kompensation nötig ist  
Bild: Brüel & Kjaer

zelnen Feldeffekt-Transistors eingebaut. Meist reicht eine Betriebsspannung von 1,5 Volt zu seinem Betrieb aus. Schon für etwa vier Euro bekommt man von Panasonic eine solche Kapsel, deren Eigenschaften für ein Messmikrofon durchaus brauchbar sind. Mehr dazu im Selbstbau-Teil dieses Artikels.



Ein Pistonphon ist zur Kalibrierung eines Mikrofons gedacht und erzeugt sein Signal über zwei kleine Kolben, die von einer rotierenden Nockenscheibe angetrieben werden. Sein Vorteil: Sein Schalldruck beruht ausschließlich auf genau bekannten mechanischen Parametern und lässt sich deshalb sehr exakt berechnen. Es muss (und kann) nicht justiert werden und arbeitet über lange Zeit äußerst stabil  
Bild: Brüel & Kjaer

Vier Euro sind natürlich ein extremer Kontrast zu den Preisen, die beispielsweise Brüel & Kjaer oder Microtech Gefell für ihre Mikrofone verlangen. Da kostet eine Halbzoll-Kapsel schnell mehr als 1.000 Euro, der passende Vorverstärker ebenfalls und ein Speiseteil ist auch nicht viel billiger. Aber diese Hersteller jetzt als Preistreiber zu verunglimpfen, wird der Sache nicht gerecht. Denn sie müssen mit ihren Produkten eine Qualität und Stabilität erreichen, an die bei den billigen Kapseln überhaupt nicht zu denken ist. Zum Beispiel muss die Kapsel so gebaut sein, dass sie ihre Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich nicht ändert. Das lässt sich nur erreichen, indem alle Teile sich mit

Änderung der Temperatur sehr ähnlich ausdehnen beziehungsweise zusammenziehen. Des Weiteren soll sich das Verhalten der Kapsel auch über viele Jahre hinweg so wenig wie möglich ändern. Deshalb altern die Hersteller jede einzelne Kapsel vor, so dass sich zum Beispiel die Spannung der Membran kaum noch ändert. Auch darf man nicht vergessen, dass die Toleranzen, die die Kapseln einhalten müssen, sehr viel enger sind, was eine erheblich präzisere und aufwendigere Fertigung bedingt. Nicht unerheblich fällt auch ins Gewicht, dass die Mikrofone von den nationalen Normungs-Instituten (hierzulande das PTB in Braunschweig) akzeptiert werden, damit sie eichfähig sind, damit auch Messungen mit offiziellem Charakter, zum Beispiel für amtliche Gutachten, erstellt werden können. Dazu müssen etliche Normen und Bestimmungen eingehalten werden. Und nicht zuletzt verlässt jede dieser Mikrofonkapseln den Hersteller kalibriert, das heißt, er dokumentiert die Eigenschaften wie Frequenzgang und Empfindlichkeit mit hoher Genauigkeit.



Auch per mit einem Lautsprecher ausgerüsteten Kalibrator lässt sich eine Messkette sehr genau kalibrieren. Hier der mit 170 Euro recht preiswerte SC-1 von IBF Akustik

Lautsprecher-Hobbyisten benötigen (bis auf Letzteres) all das nicht, sie brauchen nur ein Mikrofon, auf das sie sich verlassen können, etwaige Normen und Bestimmungen sind eher unwichtig. Deshalb bleibt ein professionelles Messmikrofon meist ein Traum für den Selbstbauer, der die mehrere tausend Euro –



Gut zu erkennen ist hier die filigrane Membran eines Kondensatormikrofons aus Nickel



Einzoll-, Halbzoll- und Viertelzoll-Kapseln von Microtech Gefell warten auf ihren Einsatz. Daneben ein Halbzoll-Vorverstärker

wenn überhaupt – lieber in Lautsprecher investiert. Den Traum von Brüel & Kjaer oder Microtech Gefell sollte man trotzdem im Hinterkopf behalten, denn beispielsweise bei Ebay gibt es relativ häufig Kapseln und Vorverstärker, die für erheblich weniger als Neupreis, manchmal sogar jeweils unter 100 Euro angeboten werden. Auch Speiseteile gibt's da immer wieder. Bei den Kapseln sollte man



Vorverstärker/Impedanzwandler für Kondensator-Kapseln gibt es in verschiedenen Größen. Hier ein Einzoll- und ein Halbzoll-Exemplar. Rechts ist ein Adapter zu sehen, mit dem sich eine Viertelzoll-Kapsel an einem Halbzoll-Vorverstärker betreiben lässt

allerdings darauf achten, solche mit „Freifeldkorrektur“ (siehe Kasten Mikrofontypen) zu kaufen, denn nur sie eignen sich fürs Lautsprecher-Messen. Dazu kann es schon einmal nötig werden, im Internet auf den Hersteller-Seiten zu recherchieren, weil die Auktionsan-

bieter das nicht angeben. Am sinnvollsten einsetzbar fürs Messen von Lautsprechern sind Halbzoll-Kapseln, da sie sowohl über eine ordentliche Empfindlichkeit als auch über einen recht glatten Frequenzgang verfügen. Auch sind bei weitem die meisten Vorverstärker für Halbzoll-Kapseln ausgelegt. Einzoll-Kapseln lassen sich auch verwenden, ihre Frequenzgänge fallen aber meist unterhalb von 20 kHz schon ab. Viertelzoll-Kapseln reichen teils bis über 100 kHz und vertragen Schalldrücke bis 170 dB. Sie sind allerdings auch recht leise und rauschen kräftig. Achtelzoll-Mikros sind extrem selten und nur für Spezialanwendungen geeignet.



Den Vorverstärker MP-21 und das Mikrofon EMM-8 bietet der Hersteller IBF-Akustik auch als Komplett-Set an. Der Vorteil dabei: Der Verstärker ist dann genau auf die Empfindlichkeit des Mikrofons kalibriert, bei 94 dB Schalldruck leuchtet eine LED auf. So lassen sich auch ohne Kalibrator verlässliche Aussagen über den gemessenen Schalldruck machen

### Selbstbau eines Messmikrofons

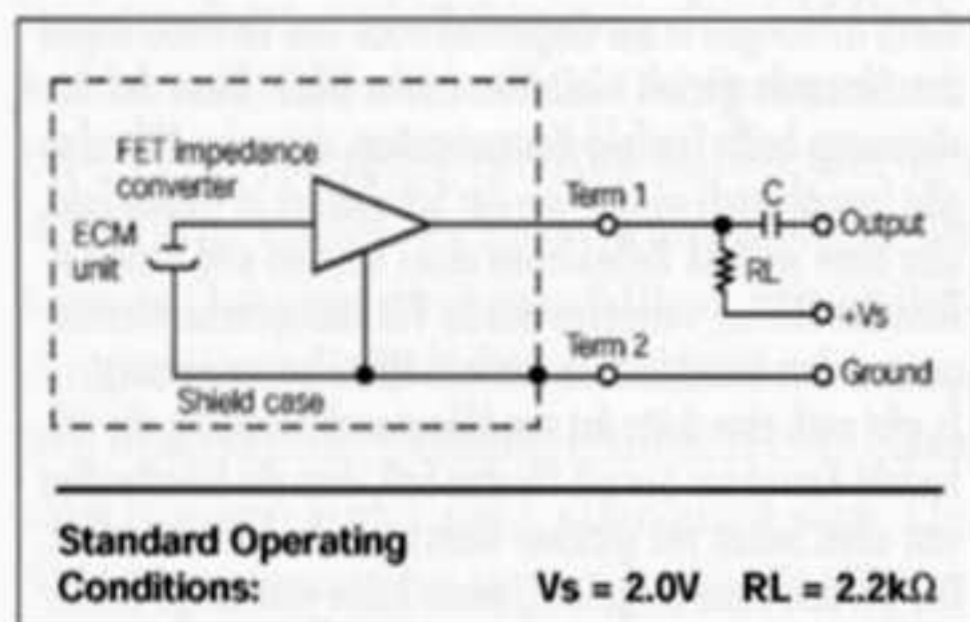
Für sparsame Zeitgenossen hat **KLANG+TON** einen Bauvorschlag für ein Messmikrofon erarbeitet. Dafür galt es, eine geeignete Kapsel auszuwählen. Panasonic hat einige interessante im Angebot, von denen wir uns vier unterschiedliche in jeweils mehreren Exemplaren anschauten. Zwei der Kapseln, die MCE 4000 und die MCE 4500, schieden sofort aus, denn ihre Frequenzgänge zeigten zwischen acht und 15 kHz eine deutliche Anhebung um teilweise mehr als zwölf dB. In die engere Wahl kamen dadurch die MCE 2000 und die MCE 2500, beide unter anderem bei Monacor erhältlich, aber auch bei Elektronik-Versendern: Reichelt Elektronik bietet die MCE 2500 an, Westfalia die MCE-2000. Von beiden überprüften wir fünf Stück, je drei von Monacor und zwei aus den

anderen Quellen. Die MCE-2500 sah schon deutlich besser aus, sie stieg zu hohen Frequenzen hin langsam an und erreichte bei 21 kHz maximal zwischen vier und fünf dB Anhebung. Die Schwankungen fielen mit etwas mehr als einem dB erstaunlich gering aus.

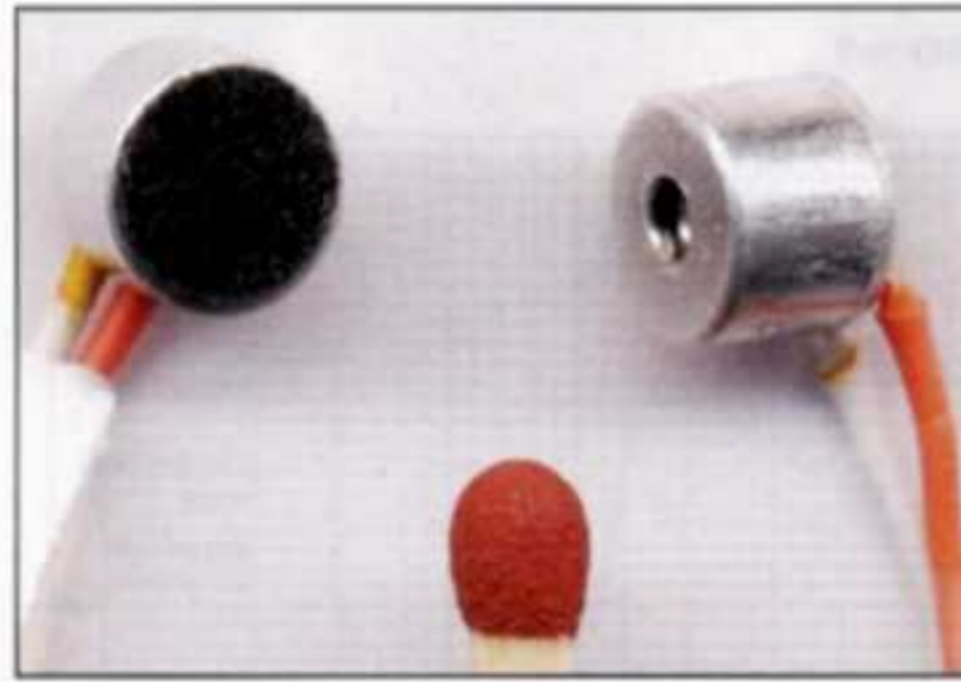


Damit das dünne Mikrofonrohr in den üblichen Feder-Mikroclips Halt bekommt, kann man hinten einen XLR-Stecker aufschieben. Dann ist auch gleich die Anschlussfrage gelöst. Aber auch ein Stück PVC-Rundmaterial ist praktikabel

Anders allerdings in puncto Empfindlichkeit: Hier ermittelten wir eine Streuung zwischen 1,4 und 6,7 mV/Pa, wobei drei Exemplare zwischen 4 und 4,5 mV/Pa lagen. Bei der MCE 2000 schlussendlich streute die Empfindlichkeit nicht so stark, sie lag zwischen 5,9 und 6,9 mV/Pa. Die Frequenzgänge zeigten eine interessante Erscheinung: Zwei Exemplare, nämlich die von Westfalia, wiesen eine ähnliche Tendenz auf wie die 2500er: Langsam bis 20 kHz ansteigender Frequenzgang mit diesmal knapp vier dB plus gegenüber 1 kHz. Die Exemplare von Monacor zeigten zwar auch eine Höhenanhebung, allerdings nur um etwa zwei bis zweieinhalb dB. Außerdem lagen auch ihre Empfindlichkeiten mit 6,5 bis 6,9 mV/Pa recht dicht beieinander. Ob das noch Zufall ist? Über die Ursachen dafür kann man trotzdem nur spekulieren, vielleicht bekommt Monacor eine bessere Selektionsstufe als die anderen Anbieter. Oder vielleicht hat man dort einfach nur eine bessere Fertigungscharge erwischt. Ob das auch bei weiteren Kapseln von Monacor der Fall ist, kann die Redaktion natürlich nicht garantieren.



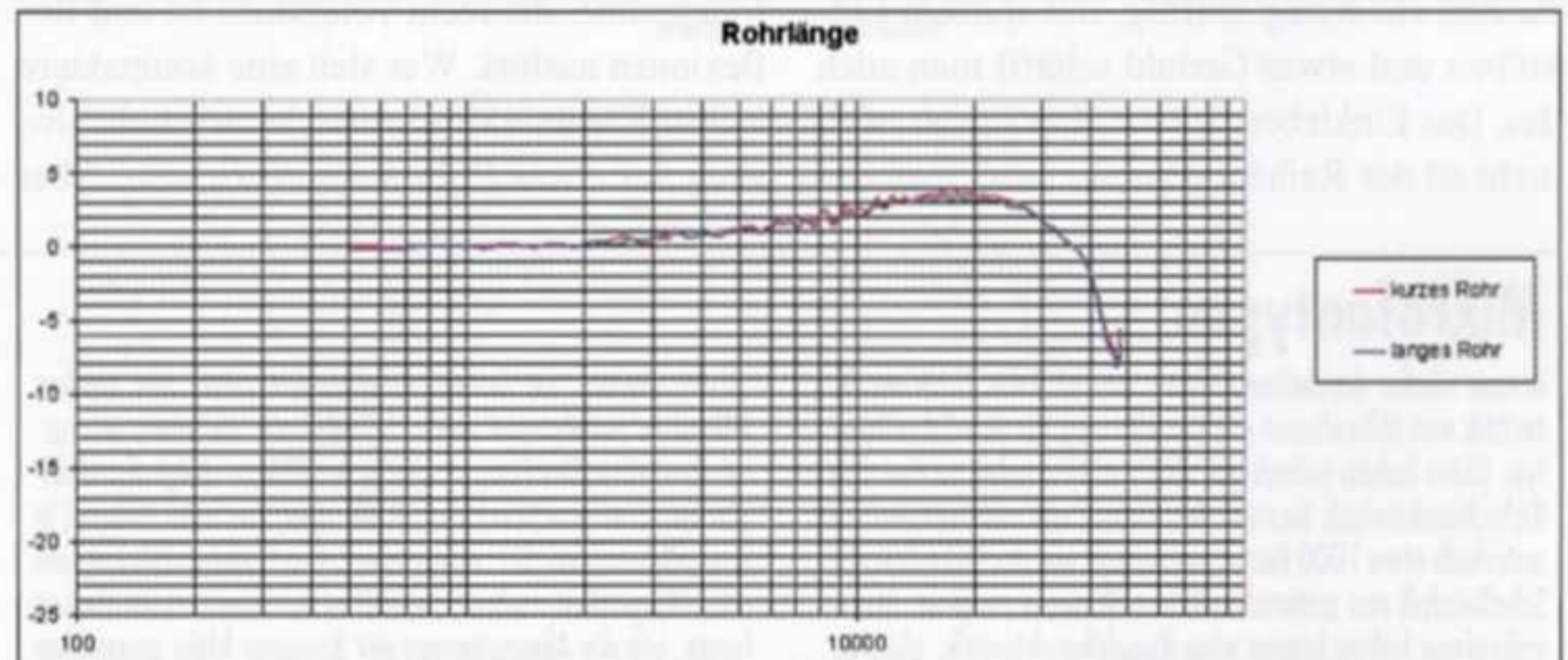
So wird die Elektret-Kapsel von Panasonic angeschlossen. Bei dem im Text erwähnten ELV-Vorverstärker ist diese Schaltung aus Widerstand und Kondensator aber schon enthalten



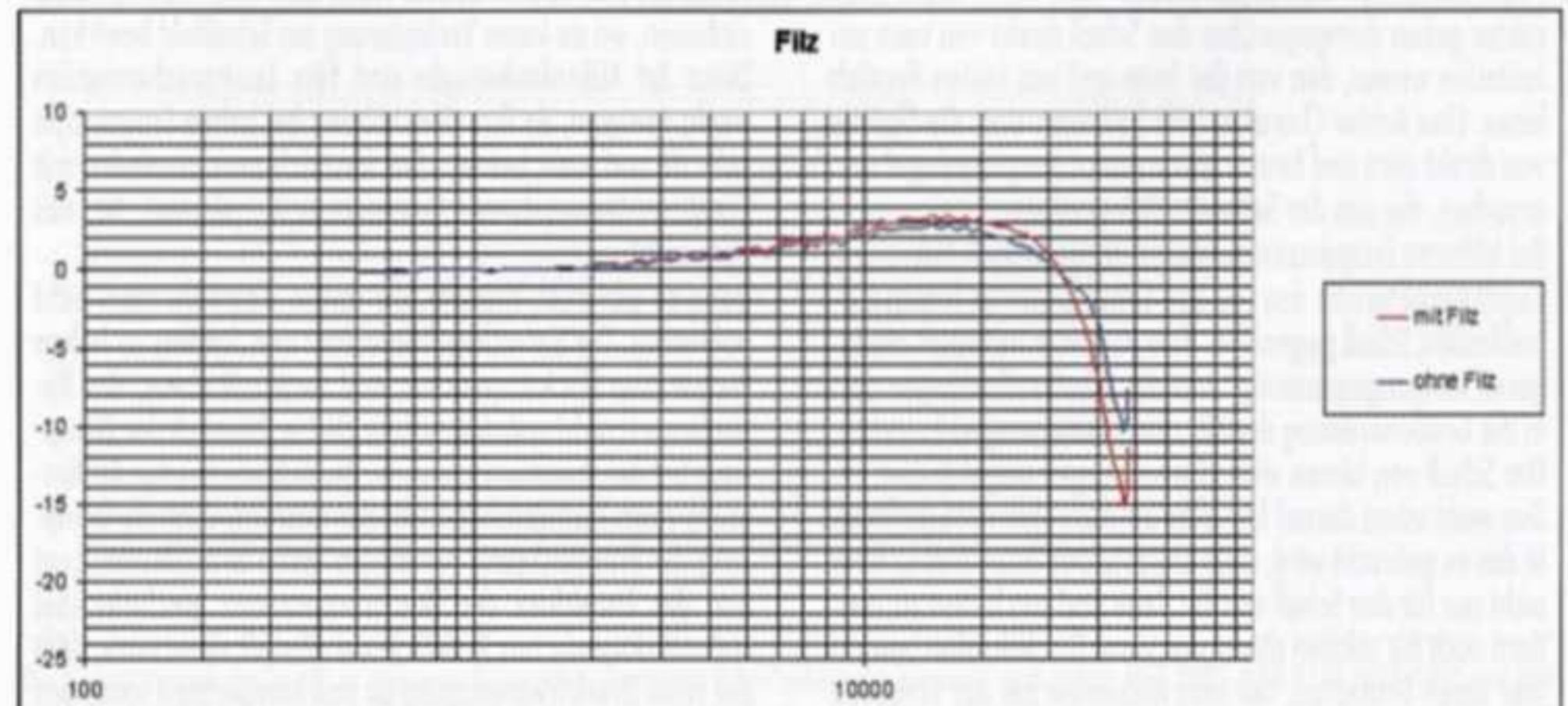
Sehr geringe Abmessungen haben die Kapseln von Panasonic, wie man hier im Größenvergleich mit einem Streichholzkopf erkennen kann. Bei der rechten Kapsel wurde der Schutzfilz entfernt, durch das kleine Loch ist die Membran zu erkennen

Damit war die Entscheidung, welche Kapsel zu empfehlen ist, gefallen: Die MCE-2000 ist zweifelsfrei die beste, erst recht, wenn sie die Eigenschaften wie bei den Kapseln von Monacor aufweist. Aber jetzt kommt ein Haken: Panasonic hat leider die Fertigung der MCE-2000, die beim Hersteller eigentlich WM-60A heißt, eingestellt. Monacor hat der Redaktion allerdings zugesichert, dass sie noch bis mindestens Mitte nächsten Jahres lieferbar bleiben wird, wahrscheinlich sogar bis Ende September. Genug Zeit also, sich einige

dieser mit 4,20 Euro das Stück wahrlich nicht teuren Kleinode auf Lager zu legen. Monacor-Produkte lassen sich übrigens nicht direkt beim Hersteller bestellen, sondern können nur beim Fachhandel gekauft werden. Wo genau in Ihrer Gegend, sagt Ihnen die Monacor-Internetseite [www.monacor.de](http://www.monacor.de). Jetzt hieß es, die Kapsel so zu befestigen, dass man sie problemlos zum Messen positionieren und handhaben kann. Für diesen Zweck bietet sich Aluminium-Rohr mit acht Millimetern Durchmesser an, das in so gut wie jedem Baumarkt in Meterstücken für ein paar Euro erhältlich ist. Es hat nämlich nominell einen Innendurchmesser von sechs Millimetern, genau das Außenmaß der Kapsel. In der Praxis zeigte sich dann, dass man mit einem Metallbohrer ein wenig nachhelfen musste, der tatsächliche Innendurchmesser war etwas kleiner und ein bis zwei Zehntel sollte die Differenz schon sein, damit die Kapsel hineinpasst. Passt's dann immer noch nicht ganz, hilft eine halbrunde Schlüsselfeile für die letzten Hundertstel. Auch die Position der Kapsel ist wichtig: Sitzt sie zu tief im Rohr, setzt's eine heftige Anhebung bei 20 kHz. Bei



Hier der Vergleich zwischen einer Mikrofonrohrlänge von 15 und 25 Zentimetern. Das kurze Rohr (rot) zeigt deutlich mehr Welligkeiten als das lange



Entfernt man den Schutzfilz von der MCE-2000, profitiert der Frequenzgang deutlich (blaue Kurve)



Beim Einbau der Mikrofonkapsel sollten man darauf achten, dass sie nicht zu weit ins Rohr hineinrutscht. Was dann passiert, sieht man an der blauen Kurve. Bei planer Montage (rot) ist das Ergebnis durchaus vertretbar. Noch besser aber wird's, wenn die Kapsel einige Millimeter aus dem Rohr herausragt

bündiger Montage (so hat **KLANG+TON** auch getestet, um Reproduzierbarkeit zu gewährleisten) sieht der Frequenzgang schon viel besser aus. Optimal verläuft er aber erst dann, wenn die Kapsel etwa drei bis vier Millimeter aus dem Rohr herausragt. Bevor die Kapsel in das Rohr eingeklebt wird, sollte man nicht vergessen, genügend lange Anschlusskabel anzulöten. Diese Arbeit ist wegen der geringen Größe von Kapsel und Lötflächen ein wenig knifflig, mit spitzem LötKolben und etwas Geduld schafft man auch das. Das Einkleben ist jetzt aber immer noch nicht an der Reihe, denn nun muss man das

Rohr noch auf die richtige Länge bringen. Um die herauszufinden, hat **KLANG+TON** zwei verschiedene ausprobiert: Einmal 15, einmal 25 Zentimeter. Und siehe da: Bei 15 Zentimetern zeigten sich Welligkeiten im Frequenzgang, die bei 25 Zentimetern deutlich geringer ausfielen. Letzteres ist also ganz klar vorzuziehen. Was sich hier durch die Welligkeiten bemerkbar macht, ist aller Wahrscheinlichkeit nach die Feder-Mikrofonklemme, die recht voluminös ist und Reflexionen auslöst. Wer sich eine kompaktere Mikro-Klemme konstruiert, kann problemlos auch auf etwas Rohrlänge verzichten. Aber

nur, wenn's unbedingt sein muss, schließlich hat man einen ganzen Meter Rohr ... Ebenfalls interessiert hat die Redaktion, was passiert, wenn man den kleinen Filz auf der Mikro-Kapsel entfernt. Dann wird zunächst eine kreisförmige Öffnung sichtbar, unter der mit etwas Abstand die Membran zu sehen ist. Groß etwas passieren kann also nicht, wenn man den Filz komplett weglässt, vielleicht kommt ein wenig Staub an die Membran, aber das dürfte wenig Schaden anrichten. Die anschließende Messung zeigte einen durchaus positiven Effekt: Die Anhebung im Hochtonbereich reduzierte sich um etwa 0,5 dB. Verglichen wurde übrigens jeweils mit einer MK201 von Microtech Gefell, deren Frequenzgang genau bekannt war. Der Lautsprecher für die Messungen wurde eigens dafür entwickelt und hat zwischen 500 Hertz und 40 kHz nicht mehr als plusminus zwei dB Abweichung im Frequenzgang. Ein „Nachteil“ der MCE-2000 soll nicht verschwiegen werden: Bei Schallpegeln oberhalb 112 dB verzerrt sie stark. **K+T** hat auf der Internet-Seite von Siegfried Linkwitz (ja genau, der mit den Linkwitz-Filtern) eine Modifikation gefunden, die das abändert (zu finden auf [www.linkwitzlab.com/sys\\_test.htm#Mic](http://www.linkwitzlab.com/sys_test.htm#Mic)). Damit lassen sich dann problemlos bis zu 140 dB messen, die Empfindlichkeit reduziert

## Mikrofontypen

Immer wieder durcheinandergebracht wird die Richtcharakteristik von Mikrofonen mit der Eignung für den Schallfeldtyp. Diese haben jedoch gar nichts miteinander zu tun. Die Richtcharakteristik bezieht sich immer nur auf Frequenzen unterhalb etwa 1000 Hertz und besagt, wie das Mikrofon auf Schalleinfall aus unterschiedlichen Winkeln reagiert. Messmikrofone haben immer eine Kugelcharakteristik, gleicher Schalldruck wird, egal von wo er kommt, immer in gleichen Pegel umgesetzt. Mikros mit Nieren- oder Supernieren-Charakter geben demgegenüber den Schall direkt von vorn am lautesten wieder, den von der Seite und von hinten deutlich leiser. Eine Achter-Charakteristik bedeutet, dass die Signale von direkt vorn und hinten gleich starke Ausgangspegel verursachen, die von der Seite deutlich weniger.

Bei höheren Frequenzen quittieren übrigens auch Mikros mit Kugelcharakteristik den von den Seiten oder von hinten auftretenden Schall gegenüber dem von vorn mit einer niedrigeren Ausgangsspannung, weil die Schallwellenlängen dort in die Größenordnung der Mikrofonabmessungen kommen. Der Schall von hinten wird also sozusagen abgeschattet. Das weist schon darauf hin, dass ein Mikrofon ein Schallfeld, in das es gebracht wird, nicht unverändert lässt. Das ist aber nicht nur für den Schall von der Seite und von hinten so, sondern auch für solchen direkt von vorn. Das Mikrofon bewirkt hier einen Druckstau, der sein Maximum bei der Frequenz hat, deren Wellenlänge seinem Durchmesser entspricht. Der

Effekt davon: Zu hohen Frequenzen misst ein solches Mikrofon zunehmend mehr Schalldruck, als ohne es vorhanden wäre. Der Frequenzgang des Mikros steigt also deutlich an. In einem Druck-Schallfeld aber, das zum Beispiel in Koppelkammern für Messungen von Telefon-Hörkapseln oder Hörgeräten, auftritt, verhält es sich linear, zumindest so lange, wie die Abmessungen der Kammer klein gegenüber der Wellenlänge sind. Auch kann man diese so genannten Druckfeld-Mikros plan in eine Wand oder Begrenzungsfläche einbauen, wo sie keine Veränderung am Schallfeld bewirken. Diese Art Mikrofonkapseln sind fürs Lautsprechermessen wenig geeignet, da ihre Überhöhung bei hohen Frequenzen zehn dB und mehr beträgt. Das lässt sich zwar zumindest mit Computer-Messsystemen kompensieren, sinnvoll ist das aber nicht.

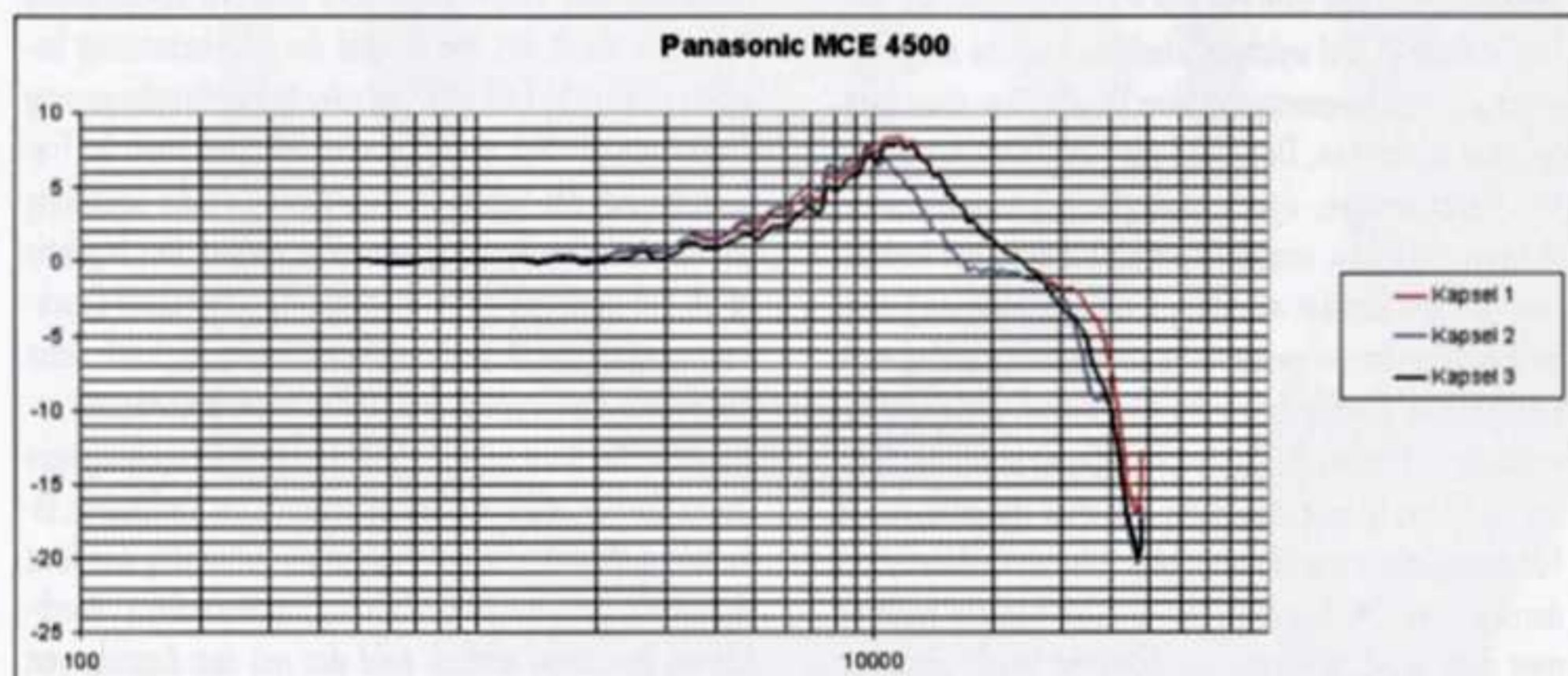
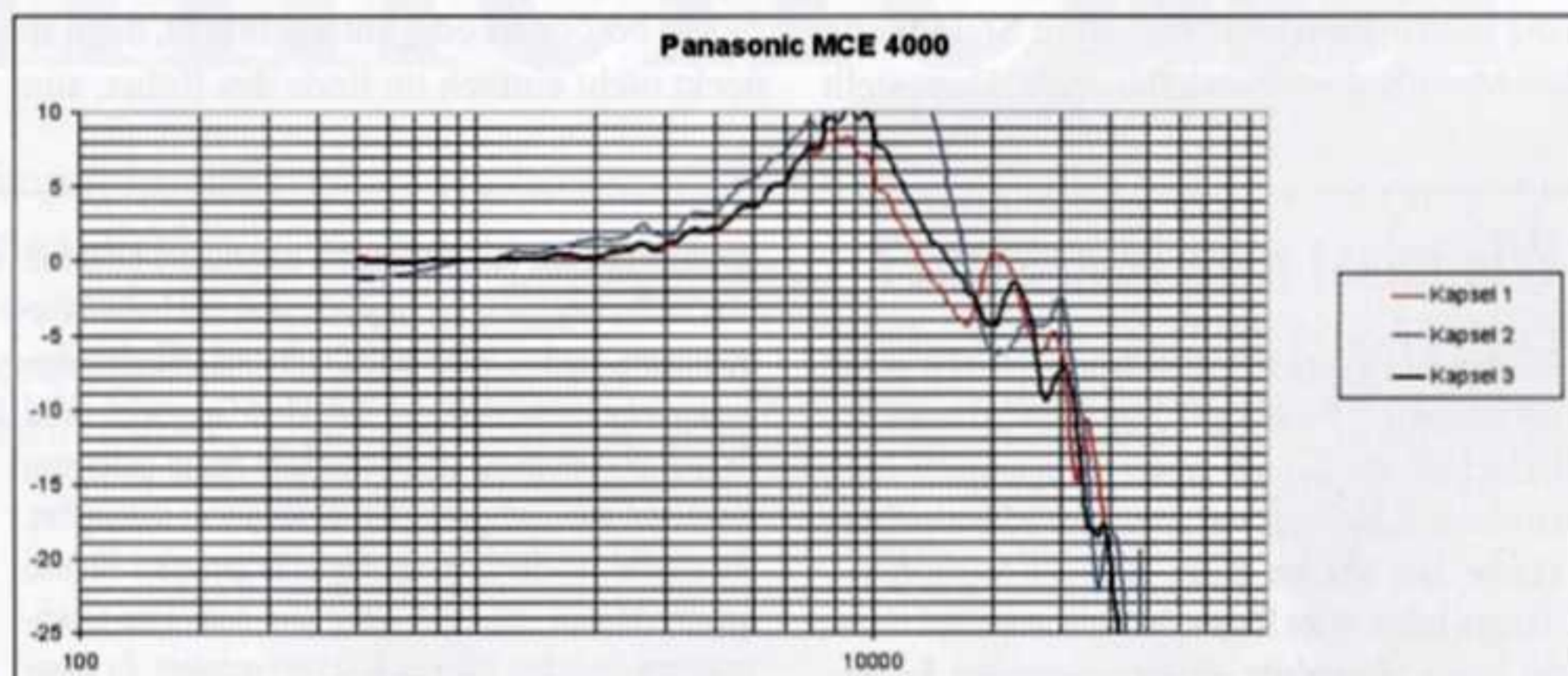
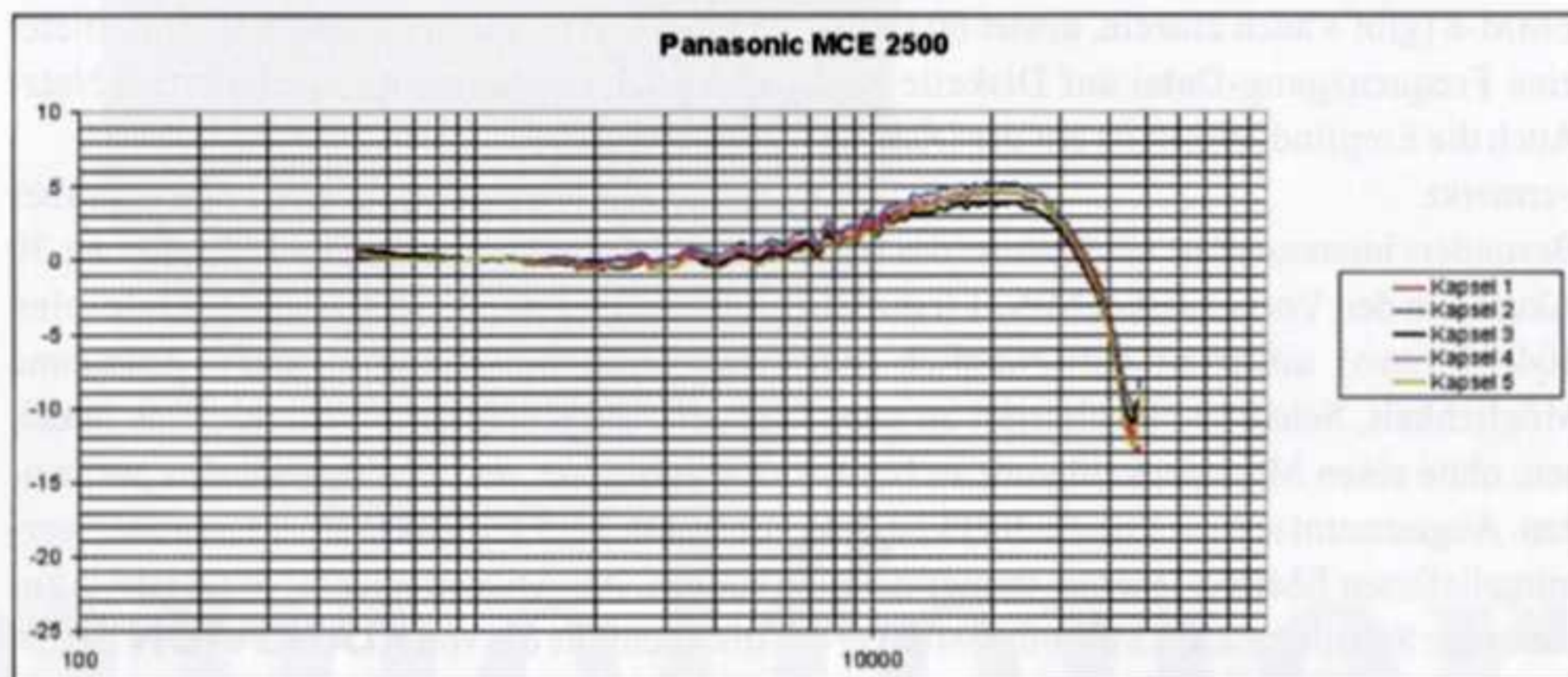
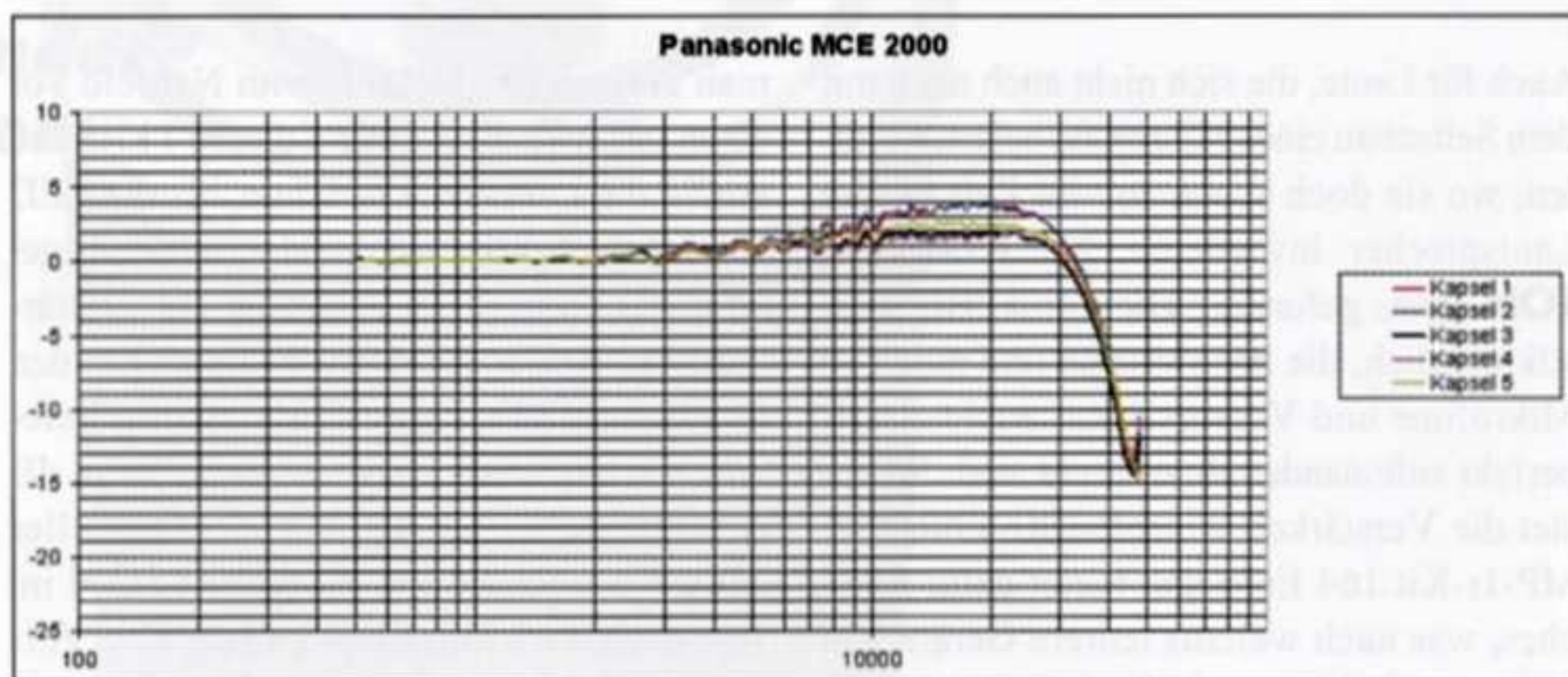
Denn es gibt auch Kapseln, die solche Überhöhungen nicht aufweisen. Die Entwickler haben hier den Anstieg zu hohen Frequenzen hin kompensiert, und zwar mit etwas, das Boxenbauern nicht unbekannt sein dürfte: Nämlich der Dämpfung bei der Resonanzfrequenz. Ähnlich wie bei der Abstimmung eines Lautsprecher-Gehäuses lässt sich über die Dämpfung der Frequenzgang in starkem Maße beeinflussen. Legt nun der Entwickler die Membranresonanz geschickt (bei Halbzoll-Kapseln um 20 kHz) und dämpft diese stark, fällt der reine Druckfrequenzgang ab und kompensiert somit den Anstieg durch Druckstau im Schallfeld. Eines erledigt er da-

bei normalerweise gleich noch mit: Kondensator-Messkapseln benötigen eine Schutzkappe, damit der dünnen Membran im rauen Alltagsbetrieb nichts passiert. Die ist zwar schalldurchlässig, bildet aber bei einer bestimmten Frequenz abhängig von Beschaffenheit und Membranentfernung eine Resonanzstelle. Die kann man mit dieser Methode gleich mit kompensieren.

Als Einstell-Element für die Dämpfung bietet sich die Gegenelektrode an. Denn die sitzt sehr dicht an der Membran. Die dazwischen liegende Luft wird dadurch bei Membranbewegungen stark beschleunigt, gleichzeitig aber auch durch den engen Abstand gebremst. Diese Bremswirkung lässt sich durch Öffnungen in der Gegenelektrode und Veränderungen des Abstands gezielt einstellen (siehe Bild). Diese Art Abstimmung heißt Freifeld-Kompensation, denn das Mikrofon gibt (annähernd) wieder, wie der Schalldruck in freiem Feld, also ohne jegliche Reflexionen eines Raumes und ohne Einfluss des Mikros, verlaufen würde. Für Lautsprechermessungen werden ausschließlich Freifeld-Mikrofone eingesetzt. Es gibt noch eine dritte Art von Mikrofonabstimmung, die Diffusfeld-Korrektur. Sie gilt für den Fall, dass die Schallwellen von allen Seiten mit gleicher Wahrscheinlichkeit eintreffen. Die werden dann eingesetzt, wenn keine eindeutige Schallquelle zu definieren ist, zum Beispiel bei Lärmmessungen in einer Maschinenhalle mit zig unterschiedlichen Lärmquellen und vielen Reflexionen.

sich dann allerdings deutlich. Außerdem werden besondere Anforderungen an den Vorverstärker gestellt, das Mikro gibt bei 140 dB mehr als ein Volt aus, was so gut wie jeden Verstärker auf dem Markt übersteuert. Die Modifikation schaltet dem Feldeffekt-Transistor, der in der Kapsel als Impedanzwandler arbeitet, einen Sourcewiderstand zu und verlegt so den Arbeitsbereich weiter in den linearen Teil der FET-Kennlinie. Für normale Anwendungen ist das aber völlig unnötig, da reichen 112 dB in jedem Fall.

Das dünne Aluminium-Rohr lässt sich nicht in einer Feder-Mikroklemme zum Halten bringen. Dabei helfen kann ein etwa sechs Zentimeter langes Stück PVC-Rundmaterial mit 20 mm Durchmesser. Dieses gibt's ebenfalls im Baumarkt. Das Stück bekommt mittig eine Bohrung mit acht Millimetern Durchmesser (langsam bohren, sonst schmilzt das PVC rund um den Bohrer!) und kann dann ein Stück auf das Mikrofonrohr geschoben werden. Hinten noch eine Cinchbuchse anlöten und einkleben – fertig. Eine andere Möglichkeit, die auch gleich für Anschluss sorgt, ist, einen XLR-Stecker mit Klemm-Kabelsicherung auf das Rohr zu stecken und die Sicherung festzuziehen. Eine dritte Variante ist, ein kleines rechteckiges Kunststoffgehäuse an den Stirnseiten mittig mit Acht-Millimeter-Löchern zu versehen und dort das Mikro-Rohr festzukleben. Auch das hält in der Mikroklemme und bietet gleichzeitig den Vorteil, Vorverstärker und 9-Volt-Batterie als Stromversorgung mit unterzubringen. Womit wir beim letzten Problempunkt angekommen wären, nämlich eben Verstärker und Stromversorgung. Zum Bearbeiten mit einem PC-Messprogramm via Soundkarte müssen die zarten Mikro-Signale nämlich etwas aufgepöppelt werden. Dazu bieten Conrad, ELV und Co. reichlich Bausätze an, aus denen wir uns einen besonders kleinen, den SMD-Mikrofonverstärker von ELV (Artikelnummer: 68-199-86) herausgegriffen haben, der nur 4,95 Euro kostet. Er passt wunderbar in ein kleines Gehäuse direkt am Mikro, muss allerdings mit SMD-Bauteilen bestückt werden. Mit oben schon erwähntem spitzen LötKolben und ruhiger Hand geht aber auch das. Die Schaltung verstärkt um etwa 40 dB. Damit kommt man gut in den für die meisten Soundkarten optimalen Spannungsbereich zwischen 100 mV und 1 V.



Die Frequenzgänge der jeweils in mehreren Exemplaren getesteten Mikrofonkapseln. Von oben nach unten: MCE-2000, MCE-2500, MCE-4000 und MCE-4500. Die beiden Letzteren sind durch ihre starke Anhebung um 10 kHz für Messzwecke nicht geeignet. Die MCE-2500 ist schon besser, kann aber der MCE-2000 auch nicht das Wasser reichen

Auch für Leute, die sich nicht auch noch mit dem Selbstbau eines Mikrofons belasten wollen, wo sie doch schon so viel Zeit in ihre Lautsprecher investieren, hat **KLANG+TON** etwas gefunden: Die Firma IBF-Akustik nämlich, die hochwertige und günstige Mikrofone und Vorverstärker anbietet, die perfekt aufeinander abgestimmt sind. So kostet die Verstärker-Mikrofon-Kombination MP-1r-Kit 164 Euro und bietet dafür manches, was auch weitaus teurere Geräte und Mikros nicht können: So liegt dem Mikrofon EMM-8 (gibt's auch einzeln, kostet 60 Euro) eine Frequenzgang-Datei auf Diskette bei. Auch die Empfindlichkeit ist auf der Diskette vermerkt.

Besonders interessant ist ein Feature, das IBF Akustik in den Vorverstärker MP-21 (einzeln 104,79 Euro) integriert hat: Nämlich die Möglichkeit, Schalldruck kalibriert zu messen, ohne einen Mikrofonkalibrator zu besitzen. Abgestimmt auf die Empfindlichkeit des mitgelieferten EMM-8 leuchtet immer dann, wenn der Schalldruck am Mikrofon 94 dB erreicht, eine LED auf. So ist es kein Problem, eine ganze Messkette inklusive Soundkarte und Mess-Software zu kalibrieren. Dazu stellt

man einfach das Mikrofon im Nahfeld vor einen Lautsprecher, gibt auf diesen 1 kHz und erhöht die Lautstärke so lange, bis die LED hell leuchtet. Wird sie dunkler, ist der Pegel schon zu hoch. Dann stellt man die Verstärkung am Regler des Vorverstärkers auf den gewünschten Wert ein und hat nur eine Referenz für die Ausgangsspannung, die 94 dB entspricht. Das funktioniert laut Hersteller auf ein dB genau, was **KLANG+TON** im Test auch nachvollziehen konnte. Der Vorverstärker wird standardmäßig von einer 9-Volt-Batterie mit Spannung versorgt, bietet aber auch einem (nicht mitgelieferten) Netzteil Anschluss.

Beide Komponenten machen einen sauber verarbeiteten Eindruck. Das Mikrofon ist 30 Zentimeter lang und trägt am Ende eine Kunststoff-Verdickung, mit der es Aufnahme in der – mitgelieferten – Federklemme findet. Vorverstärker und EMM-8 werden per handelsüblichem Cinchkabel miteinander verbunden. Als Mikrofonkapsel nutzt IBF-Akustik ebenfalls die von **KLANG+TON** bevorzugte MCE-2000 von Panasonic. Hier ist sie zudem besonders edel untergebracht, denn sie steckt nicht einfach im Ende des Rohrs, son-

dern in einem Edelstahl-Stück, das von einem feinen Drahtgitter abgeschlossen wird. Den Filz der Kapsel hat der Hersteller übrigens ebenfalls entfernt.

Die Kalibrierung von IBF-Akustik hat **KLANG+TON** überprüft. Die Empfindlichkeit von 6,1 mV/Pa konnten wir auf den Punkt genau bestätigen. Der Frequenzgang zeigte im oberen Bereich Abweichungen von etwa 0,5 dB. Das kann man weder IBF-Akustik noch **KLANG+TON** anlasten, denn sowohl Brüel & Kjaer, von denen das Referenzmikrofon von IBF Akustik stammt, als auch Microtech Gefell geben als Genauigkeit (oder besser gesagt Messunsicherheit) des Kalibrier-Frequenzgangs 0,5 dB an. Da kann man sich über die hier zu Tage tretenden Abweichungen im Grunde nicht beschweren. Als Fazit lässt sich ziehen, dass IBF-Akustik mit der Verstärker-Mikrofon-Kombi MP-1r-Kit eine verlässliche Messmöglichkeit für Lautsprecher bietet, die das Budget eines Hobbyisten keineswegs sprengt. Besonders gefallen hat die Möglichkeit, auch mit kalibriertem Pegel zu messen, ohne dass man einen nicht ganz billigen Kalibrator anschaffen muss.

Michael Nothnagel

## Wie misst man Mikrofone?

Will man die Eigenschaften eines Mikrofons feststellen, tut sich ein Henne-Ei-Problem auf: Ohne genau bekanntes Mikrofon kann man den zum Messen herangezogenen Lautsprecher nicht beurteilen und ohne genau bekannten Lautsprecher kein Mikrofon. Diesen gordischen Knoten durchschlagen haben einige Wissenschaftler in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts: Mit der so genannten Reziprozitätsmethode kann man von drei Mikrofonen gleichen Typs Empfindlichkeit (bei welchem Schalldruck welche Ausgangsspannung) und Frequenzgang ohne Umweg über einen Lautsprecher bestimmen. Dazu wird die Fähigkeit eines Mikrofons herangezogen, dass es mit gleichen Eigenschaften nicht nur als Mikro, sondern auch als Lautsprecher funktioniert. Die drei Kapseln werden in drei Kombinationen jeweils paarweise zusammengespannt, je eine als Mikro und eine als Lautsprecher. Aus den Ergebnissen lassen sich dann sehr zuverlässig und genau die gewünschten Daten errechnen. Dieses Verfahren ist sehr aufwendig und wird eigentlich nur in Forschungslabors und großen, akkreditierten Kalibrierlabors durchgeführt. Die Eigenschaften anderer Kapseln ermittelt man dann durch einfachen Vergleich. So lassen sich Empfindlichkeit und Frequenzgang auf wenige Hundertstel dB genau bestimmen.

Werden kalibrierte Mikrofonkapseln ausgeliefert, bekommt man in aller Regel nicht nur Empfindlichkeit und Freifeld-Frequenzgang, sondern meist auch Druck- und Diffusfeld-Frequenzgänge mitgeliefert. Der Druckfeld-Gang wird dabei nicht direkt gemessen, sondern mithilfe des so genannten elektrostatischen Eichgitters. Das ist ein planes Metallgitter, das parallel zur Membran der Kapsel in geringem Abstand angebracht wird. An dieses Gitter wird dann eine Gleichspannung (zwischen 200 und 800 Volt) angelegt. Zu dieser Gleichspannung kommt dann noch eine Wechsellspannung hinzu, die durch das von ihr und der Gleichspannung bewirkte elektrische Feld eine äquivalente Membranbewegung auslöst, ganz ähnlich wie bei Schalleinfall. Jetzt kann der Frequenzbereich der Kapsel durchgeföhren und die Spannung am Vorverstärker-Ausgang gemessen werden. Das Ergebnis ist bis auf minimale Abweichungen mit dem reinen Druckfrequenzgang der Kapsel identisch. Daraus lässt sich dann rechnerisch der Freifeld- und Diffusfeld-Frequenzgang errechnen. Die dazu notwendigen Korrektur-Frequenzgänge stellen die Hersteller für jeden Kapseltyp zur Verfügung. Eine solche Messung ist nicht sonderlich aufwendig und lässt sich auch in normalen Lautsprecher-Messlabors durchführen. Besonders einfach geht das mit den Kapseln von Microtech Gefell, denn sie haben in der Membran-Schutzkapsel schon ein elektrostatisches Eichgitter integriert. Die

Front der gelochten Schutzkapsel ist dazu vom Rest isoliert. Will man nicht die Kapsel, sondern eine komplette Messkette kalibrieren, um Schalldrücke genau messen zu können, benötigt man einen so genannten Schallkalibrator. Der lässt sich auf das Mikrofon aufstecken und gibt einen Sinuston mit definiertem Pegel ab, meist 1 kHz und 94 dB SPL. Das Anzeige-Instrument oder die Mess-Software können nun genau justiert werden. Für Einzell- und Halbzoll-Kapsel muss man dabei noch ein Korrekturwert von 0,4 respektive 0,2 dB beachten. Man justiert also auf 93,6 beziehungsweise 93,8 dB. Eine noch genauere Kalibriermöglichkeit bietet das so genannte Pistonphon. Sein Vorteil: Der Schalldruck wird hier nicht wie beim Kalibrator durch einen Lautsprecher erzeugt, der sich mit der Zeit verändern kann, sondern über zwei Kolben, die sich von einer Nockenscheibe angetrieben auf- und abbewegen. Der erzeugte Schalldruck ergibt sich hier ausschließlich aus den mechanischen Abmessungen, nämlich dem Durchmesser und Hub der Kolben sowie der Größe der Kammer, in die die Kolben arbeiten und in die auch das Mikrofon eingesteckt wird. Das erlaubt eine Kalibriergenauigkeit von etwa einem Zehntel dB, was für die meisten Labors locker ausreicht. Der gemessene Schalldruck ist beim Pistonphon vom momentanen Luftdruck abhängig. Deshalb liegt jedem dieser Geräte ein Barometer bei, dessen Skala den richtigen Korrekturwert direkt anzeigt.