

Anfang 1974 begann Pioneer in Zusammenarbeit mit Kureha Chemical Industry & Co., Japan, mit der Serienproduktion von piezoelektrischem High-Polymer-(HP-)Film, der für Wandlerysteme einsetzbar ist [1]. Derartige Wandler haben einfache Strukturen, weil Antrieb und Abstrahler bzw. Generator identisch sind. Das hierbei verwendete HP-Element ist ein Polyvinylidenfluorid in Folienform.

High-Polymer-Film ermöglicht neue Wandlerysteme

Horst Böttcher

© beim Hersteller Archiv Michael-Otto

Mit dem Kohle-Mikrofon war die Möglichkeit gegeben, Schallenergie in elektrische Signale umzuwandeln, und die Erfindung des Phonographen machte es möglich, Schallinformationen mechanisch zu speichern und nach Wunsch wieder in Schall zurückzuwandeln. Als dann der dänische Physiker Valdemar Poulsen 1898 sein Telephon vorstellte, schloß sich der Kreis: elektrische Signale konnten elektromagnetisch gespeichert, beliebig abgerufen und sogar gelöscht werden.

Bis zur Hi-Fi-reifen Produktion und Reproduktion von Schallsignalen war es jedoch noch ein weiter Weg. Ver-

schiedene elektroakustische Wandler wurden seit dieser Zeit entwickelt und auch verkauft. Eines haben alle diese Schallwandler gemeinsam: Zur Umsetzung von Schall in Tonfrequenz oder umgekehrt ist eine Membran notwendig. Von den vielen Systemen – u. a. auf elektrostatischer oder piezoelektrischer Basis – hat sich jedoch fast ausschließlich das elektrodynamische Prinzip bei Lautsprechern durchgesetzt. Andere Entwicklungen haben weit geringere praktische Bedeutung erlangt. Der elektrodynamische Lautsprecher hat sich zwar in hohem Maße bewährt, ist aber trotzdem häufig das schwächste Glied in der Kette elektroakustischer Wiedergabegeräte.

Während bei Verstärkern z.B. Klirrfaktoren von 0,1 % genannt werden, zeigen herkömmliche Lautsprecher zumindest im Bereich tiefer Frequenzen Werte bis über 10 %. Der Grund hierfür ist bekannt: Eine leichte Membran eines Lautsprechers ist mechanisch meist wenig stabil. Sie verformt sich und erzeugt damit Verzerrungen. Diesem Problem begegnet man mit Membranmaterialien hoher mechani-

scher Stabilität. Da ein solches Material wiederum sehr schwer ist, schwingt die Membran über und erzeugt ebenfalls hohe Verzerrungen. Deshalb ist es das Ziel jedes Lautsprecherherstellers, Wandler mit geringem bewegten Ge-



Ing. (grad.) Horst Böttcher (26), Lehre als Elektromechaniker. 3jähriges Studium an der TFH-Berlin, Fachgebiet Elektronik. Abschluß 1975 als Ingenieur (grad.). Seit 1975 bei C. Melchers & Co, Bremen, als Technischer Verkaufsförderer tätig.



Lautsprecherbox HPM-40 von Pioneer mit HP-Hochtöner

wicht und hoher mechanischer Stabilität zu entwickeln.

Hierbei scheint der piezoelektrische Wandler wegen seiner einfachen Struktur Vorteile zu bieten: Es werden keine Magnete wie bei dynamischen Systemen oder Vorspannungen wie bei elektrostatischen Systemen benötigt.

Piezoelektrizität und HPM

Wenn ein Kristall einem Druck ausgesetzt wird, wird eine elektrische Spannung erzeugt. Dieses ist der direkte piezoelektrische Effekt. Die Größe der erzeugten Spannung hängt vom Material und vom Kristallschnitt ab. Außerdem ist die Piezoelektrizitätskonstante temperaturabhängig.

Der inverse Effekt ist ebenfalls bekannt. Wenn eine elektrische Spannung an den Kristall angelegt wird, kann er zu einer mechanischen Bewegung veranlaßt werden. Diese mechanische Bewegung ist proportional der angelegten Spannung.

Die gebräuchlichen piezoelektrischen Materialien sind z. B. Turmaline, BaTiO₃, Quarze und Rochelle-Salze. Diese Materialien sind gebräuchlich für Schwingkreise, da sie eine hohe mechanische Festigkeit und geringe mechanische Verluste aufweisen. Normalerweise haben Keramiken keine piezoelektrischen Eigenschaften. Wenn jedoch ein Polarisierungsprozeß erfolgt, wird ein Zustand hergestellt, der piezoelektrische Eigenschaften zeigt. Trotzdem, konventionelle piezoelektrische Elemente waren bisher ungeeignet für die Hi-Fi-Reproduktion, da sogenannte weiche piezoelektrische Elemente nicht verfügbar waren.

Während der Versuche mit piezoelektrischen Materialien wurden bald solche entdeckt, die weich sind und durch spezielle Bearbeitung über hohe piezoelektrische Effizienz verfügen.

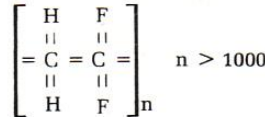
Um 1940 wurden in Rußland Studien über die Piezoelektrizität von Holz durchgeführt.

● 1959 wendete Fukada als erster biologisches hochmolekulares Material wie Fischbein und Sehnen in Tonabnehmersystemen an.

● 1960 wurde die Piezoelektrizität von synthetischen High-Polymeren (Polypeptide) ebenfalls von Fukada entdeckt.

● 1968 wurden versuchsweise synthetische HPM-Materialien (Polygamma-methyl, L-Glutamat) für Mikrofone und Kopfhörer entwickelt. Diese Wandlerysteme wurden jedoch nicht kommerziell benutzt, weil die piezoelektrische Spannungskonstante nicht sehr groß war.

● 1969 entdeckte Kawai die Piezoelektrizität von Polyvinylidenfluorid. Dieses ist ein Fluor-Kohleharz und hat folgende chemische Zusammensetzung:



Der Prozeß, der der High-Polymer-Folie die erforderliche Piezoelektrizität verleiht, besteht aus folgenden Stufen:

1. Der Film wird bei einer Temperatur von 60°C bis 100°C auf ungefähr vierfache Länge gedehnt.
2. Auf beide Seiten dämpft man zur Kontaktierung Aluminium auf.
3. Der Film wird bei Temperaturen von 80°C bis 100°C mit einem hohen Gleichspannungsfeld eine Stunde lang polarisiert.

Dieses Verfahren ähnelt dem für piezoelektrische Keramiken, jedoch bleibt die Piezoelektrizität des Films nach der Polarisation – im Gegensatz zur Keramik – erhalten. Der Elastizitätsmodul von HP-Elementen ist zwar um mehr als eine Zehnerpotenz kleiner als die der

gebräuchlichen piezoelektrischen Materialien, die Piezoelektrizität ist aber besonders stabil, sogar bei Temperaturen von 100°C.

Der Vorteil des HP-Elementes liegt in der dünnen Filmform sowie in der einfachen Struktur. Wenn ein Wechselfeld angelegt wird, vibriert es mechanisch in transversaler Richtung. Ist das HP-Element leicht gewölbt und sind die Enden befestigt, dann wird die transversale Vibration in eine pulsierende Bewegung umgesetzt (Bild 1). Somit kann dieses HP-Element dazu verwendet werden, Schallwellen abzugeben. Die Bewegung der Membran geschieht hier nicht kolbenförmig wie bei konventionellen Systemen, sondern in einer Art Atembewegung der gesamten Oberfläche.

Während Pioneer Anwendungstechnologien für dieses Element entwickelte, wurde von Kureha die Technologie für die Massenproduktion erarbeitet.

HPM-Lautsprecher

Dieser bereits erwähnte Effekt läßt sich am einfachsten in omnidirektionalen (rundum abstrahlenden) Lautsprechern nutzen (Bild 2). Der High-Polymer-Film ist hier zu einem Zylinder geformt. Zwischen einem weiteren kleineren Zylinder aus perforiertem Metall und der HP-Folie liegt eine Polyurethan-Schaumstoffdämmung. Im Kern wird Glaswolle als Absorptionsmaterial verwendet. Durch Kontaktieren der beiden Aluminiumschichten läßt sich das Wechselfeldsignal zuführen. Ein so aufgebauter Hochtöner kann mit einem Sinussignal von 18 V dauernd belastet werden, ohne daß Beschädigungen auftreten. Bei einem konventionellen Schwingspulenhochtöner würde sich die Spule innerhalb kürzester Zeit so stark erwärmen, daß der Lautsprecher zerstört wird. Die Grenzbelastbarkeit dieses HP-Lautsprechers ist durch den elektrischen Break-Point bestimmt. Die Dicke der HP-Membran für Hochtöner beträgt 30 µm, der Break-Point liegt für Raumtemperatur bei ungefähr 2000 V.

Weitere Vorteile dieser Konstruktion sind folgende: Im Gegensatz zu anderen Lautsprechersystemen wird der Schall nicht an einem Punkt erzeugt, sondern die ganze Membran (= Antriebssystem) schwingt. Die enge Abstrahl-Charakteristik konventioneller Hochtöner ist damit beseitigt. Diese war bislang besonders schwierig für die höheren Frequenzen des Audiospektrums zu erreichen. Da die ganze Oberfläche des Films vibriert, sind keine stehenden Wellen vorhanden. Niedrige Verzerrungen und ein glatter Übertragungsreich sind die Folge (Bild 3).

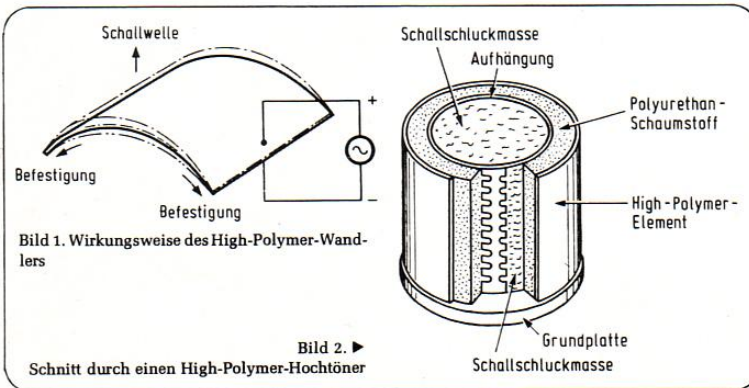


Bild 1. Wirkungsweise des High-Polymer-Wandlers

Bild 2. ▶ Schnitt durch einen High-Polymer-Hochtöner

Zur Hi-Fi'76 stellte die Firma erstmalig drei Lautsprecherboxen vor, die mit High-Polymer-Hochtönersystemen ausgestattet sind (HPM 40, HPM 60, HPM 100). Die HP-Folie ist bei diesen Boxen um 180 °C gewölbt und ca. 1/14 g schwer. Das heißt, die bewegte Masse ist extrem gering.

Es bestehen inzwischen aber auch bereits Prototypen von High-Polymer-Mitteltonlautsprechern. Diese sind im Prinzip wie die Super-Hochtöner aufgebaut, haben jedoch einen größeren Umfang. Die Lautsprecherbox HPM 200 ist z. B. mit zwei High-Polymer-Lautsprechern (Superhochton und Mittelhochton) ausgerüstet.

Natürlich sind die Techniker daran interessiert, auch entsprechende Systeme für die tieferen Frequenzen zu entwickeln. Wahrscheinlich wird in absehbarer Zeit ein großer HP-Tieftöner auf den Markt kommen. Mit einer Kugel aus HP-Folie ließe sich sogar eine kugelsymmetrische Schallabstrahlung – ein alter Wunschtraum vieler Akustiker – realisieren [2].

HP-Kopfhörer

Die gebräuchlichsten Typen hochwertiger Kopfhörer sind Schwingspulensysteme oder Elektrostaten. Beide haben verschiedene Vor- und Nachteile. Die Empfindlichkeit von Schwingspulen-Wandlersystemen ist sehr groß, und man kann sie an jeden Verstärker anschließen. Außerdem sind die Kosten relativ gering. Es ist allerdings schwer möglich, – für bessere Wiedergabe hoher Frequenzen und

verbessertes Einschwingverhalten – das Gewicht des schwingenden Systems noch mehr zu verkleinern.

Der elektrostatische Kopfhörer besitzt zwar eine leichte Membran; sein Nachteil jedoch ist die niedrige Empfindlichkeit. So können elektrostatische Kopfhörer nicht direkt an konventionellen Verstärkern betrieben werden. Eine hohe Eingangsspannung von über 100 V ist notwendig, um einen zufriedenstellenden Klang ausreichender Stärke zu erhalten. Hierfür sind Transformatoren erforderlich.

Bei HP-Kopfhörern wird der dünne HP-Film (8 µm) direkt von der angelegten Spannung betrieben. Somit ist der Übertragungsbereich ähnlich dem der Elektrostaten. Eine kleine Eingangsspannung von ungefähr 3 V reicht aus, um einen Pegel von 100 dB zu erzeugen. HP-Kopfhörer können direkt an konventionelle Verstärker in gleicher Weise wie Schwingspulenwandler angeschlossen werden. Zusätzlich besitzt der HP-Kopfhörer verschiedene Vorteile: keine Vorspannung, die Empfindlichkeit wird durch Feuchtigkeit nicht herabgesetzt und selbst bei größten Eingangspegeln sind die harmonischen Verzerrungen nicht größer als 1 % (bei 110 dB).

Die High-Polymer-Membran des Kopfhörers befindet sich auf Polyurethan-Schaumstoff, die Audiosignale werden über Aluminium-Kontakthierungen auf die Membran übertragen. Das sehr dünne Element verändert sich proportional zum angelegten Signal und erzeugt somit einen linearen Fre-

quenzgang über den ganzen Übertragungsbereich (Bild 4). Diese Technik wird bereits in den Kopfhörern SE-300, SE-500 und SE-700 angewendet. Die Kopfhörer haben sich wegen ihrer Klangneutralität, ihrer hohen Belastbarkeit und folglich auch ihrer niedrigen Verzerrungen auf dem Markt bewährt.

HP-Mikrofone und -Tonabnehmersysteme

Es können jedoch noch weitere akustische Wandler mit der HP-Folie ausgerüstet werden, z. B. Mikrofone und Tonabnehmersysteme. Bild 5 zeigt den relativ einfachen Aufbau eines Mikrofons mit HP-Element. Der Durchmesser der Membran beträgt ca. 15 mm. Der HP-Film liegt hier über einer Polyurethan-Schaumstoffdämmung. Enge Fertigungstoleranzen wie bei elektrostatischen Systemen sind bei diesem Mikrofon nicht erforderlich.

Bild 6 zeigt den Frequenzgang des HP-Mikrofons. Die Empfindlichkeit ist 2 mV/Pa (≅ 0,2 mV/µbar) und die Kapazität beträgt ungefähr 700 pF. Durch seine Widerstandsfähigkeit gegen Feuchtigkeit und Staub läßt sich dieses Mikrofon ohne weiteres auch im Freien verwenden.

Bei Tonabnehmersystemen ist der direkte piezoelektrische Effekt ebenfalls anwendbar. Niedrige mechanische Widerstände und eine hohe Nachgiebigkeit ermöglichen die Wiedergabe höchster Frequenzen und die Verwendung für diskrete Quadrofonie. Es wird außerdem kein Magnet benötigt wie bei elektrodynamischen Systemen. Bild 7

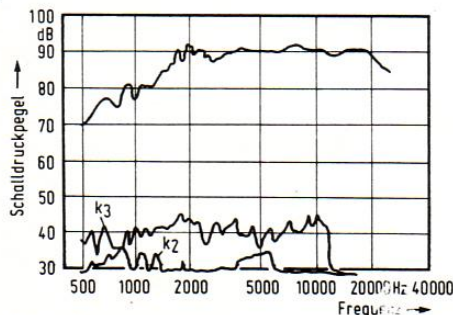


Bild 3. Frequenzgang und harmonische Verzerrungen des neuen Hochtöners, bestehend aus zwei Zylindern. Mikrofonabstand = 1 m, Eingangsspannung 5 V

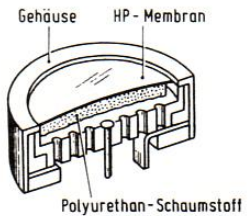
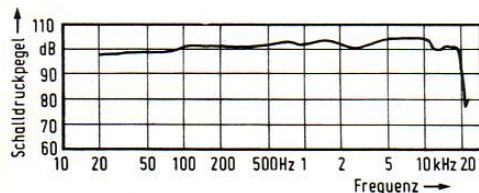


Bild 5. Schnitt durch ein Mikrofon mit HP-Wandler

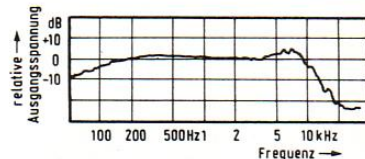


Bild 6. Der Frequenzgang des HP-Mikrofons

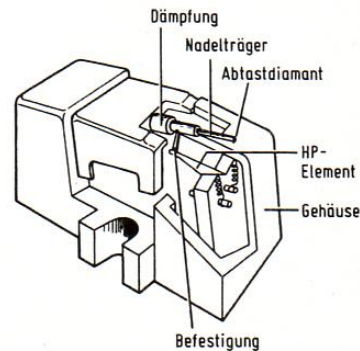


Bild 7. Ein Tonabnehmersystem mit HP-Wandler

Bild 4. Frequenzgang des Stereo-Kopfhörers SE-700, gemessen mit dem künstlichen Ohr von B & K, Typ 4153. Eingangsspannung 3 V

zeigt ein HP-Tonabnehmer-System. Hierfür wird das HP-Element in schmale Streifen von 1 mm Breite und 2 mm Länge geschnitten. Die Serienproduktionen dieser Tonabnehmer wird bald beginnen.

Das High-Polymer-Element ist ein Ergebnis von Forschungen über physi-

kalische Möglichkeiten hochmolekularer Materialien. Es sei jedoch hingewiesen, daß bisher nur eine Art der High-Polymere, nämlich das Polyvinylidenfluorid, für Audiowandler verwendet werden kann. Mittlerweile ist aber auch die deutsche Industrie dabei, hochmolekulare Materialien für elek-

troakustische Wandler zu nutzen.

Literatur

- [1] Hochmolekulare Polymer-Wandler. FUNKSCHAU 1974, H. 21, S. 817.
- [2] Piezoelektrischer Kugel-Lautsprecher. FUNKSCHAU 1976, H. 15, S. 619.

*© beim Hersteller
Archiv Michael-Otto*