

Breitband-Kommunikation im Versuch
Extrem nachgiebige Lautsprechermembran
Digital-Synthesizer-Tuner mit Suchlauf
Bauanleitungen: elektronisches Barometer,
elektronischer Treppenlicht-Automat

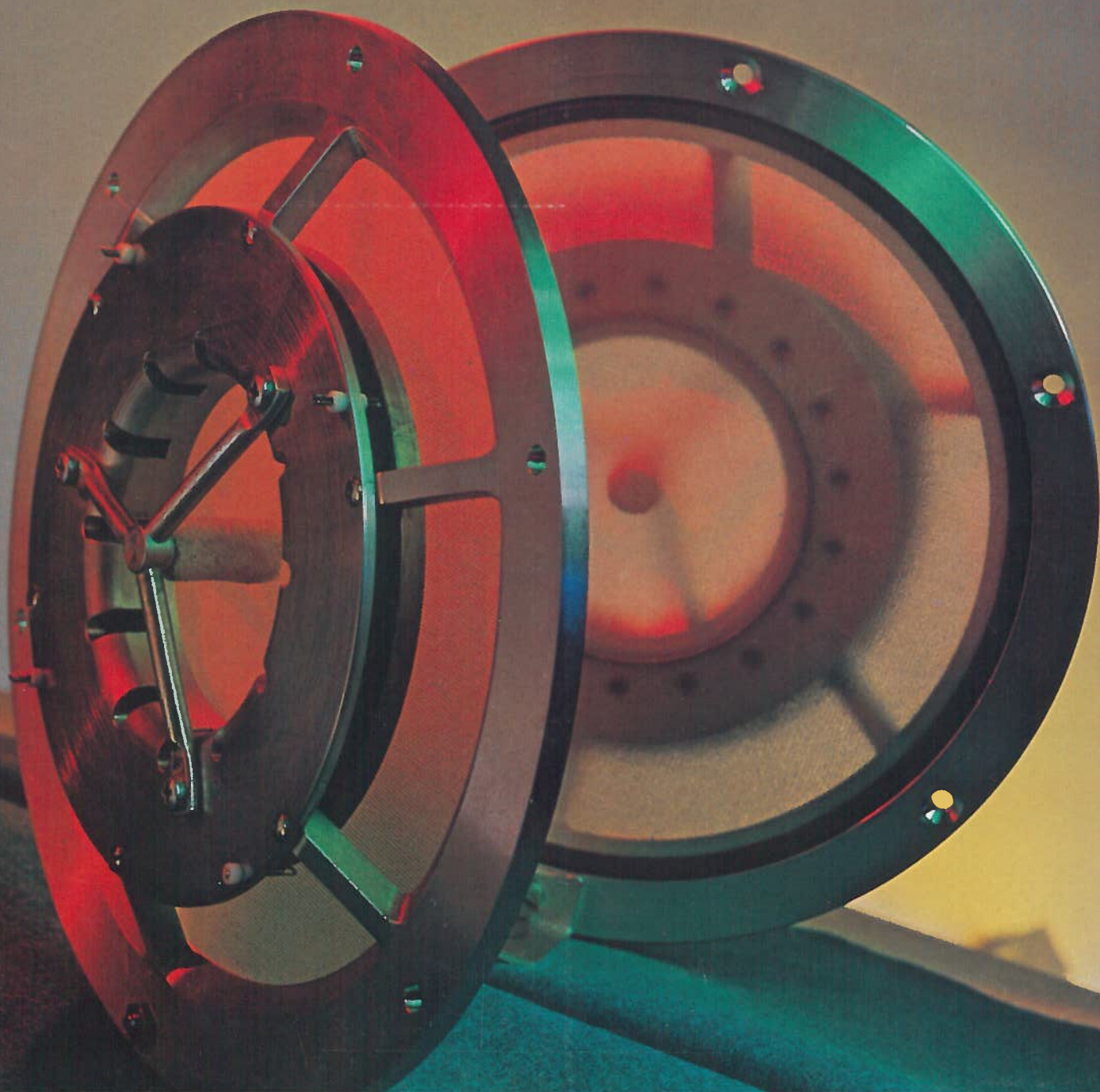
B 3108 DX

6

46. Jahrgang
15. März 1974
DM 3.—
öS 26.—, sfr 4.—

Funkschau

Radio • Fernsehen • Elektroakustik • Elektronik



Ernst Pfau

Ein neuer dynamischer Lautsprecher mit extrem nachgiebiger Membran

Wenn man von der bekannten Regel der Elektroakustik ausgeht, daß eine Übertragungskette so gut oder so schlecht ist wie ihr schwächstes Glied, dann hängt jede weitere Verbesserung unserer Wiedergabetechnik eigentlich nur noch von jener des Lautsprechers ab. Als Ergebnis einiger grundsätzlicher mechanischer Überlegungen entwickelte J. W. Manger eine neuartige Lautsprecherkonstruktion, die nachstehend beschrieben wird.

Bei genauerer Betrachtung der Aufgaben, die ein Lautsprecher als Wandler zu erfüllen hat, stoßen wir auf zwei Forderungen, die sich offenbar nicht miteinander verbinden lassen. Als Gegenstück zum Mikrofon, das mit einer unserem Trommelfell ähnlichen Membran die an seinem Ort vorhandenen Luftdruckschwankungen erkennt und daraus adäquate elektrische Spannungsschwankungen macht, veranlaßt der Lautsprecher einen Körper, meist wiederum in der Form einer Membran, zu

Bewegungen, die jenen der Mikrofonmembran mehr oder weniger vollkommen entsprechen.

Wie soll ein idealer Wandler arbeiten?

Ein idealer Wandler für elektrische Schwingungen in Luftdruckschwankungen muß diese hinsichtlich ihrer Amplituden und Phasen absolut genau nachbilden und dies noch über einen recht breiten Frequenzbereich. Letzteres wird erreicht, wenn zugeführte elektrische Rechteckschwingungen zu wiederum

rechteckigen Schallschwingungen führen. Die üblichen Lautsprecher sind von diesem Idealfall noch recht weit entfernt (Bild 1). Am Beispiel einer einfachen Sinusschwingung kann man zeigen, wie die Membran der elektrischen Schwingung zunächst mit einer kleinen Amplitude folgt, dann mit einer viel größeren Amplitude die Bewegung noch fortsetzt, wenn es das Signal keineswegs vorschreibt. Beide zusammen führen zu einer erheblichen Verformung der ursprünglichen Sinusschwingung, die das Ohr als eine Verzerrung des Klangbildes empfindet. Würde man die Lautsprechermembran so klein und leicht wie eine Mikrofonmembran bauen, um eine ähnlich geringe Trägheit und auch günstig liegende Eigenfrequenz zu erreichen, könnte der Lautsprecher seine wichtigste Aufgabe, der er auch seinen Namen verdankt, überhaupt nicht erfüllen, nämlich die Übertragung der zur Beschallung eines Raumes erforderlichen mechanischen Ener-

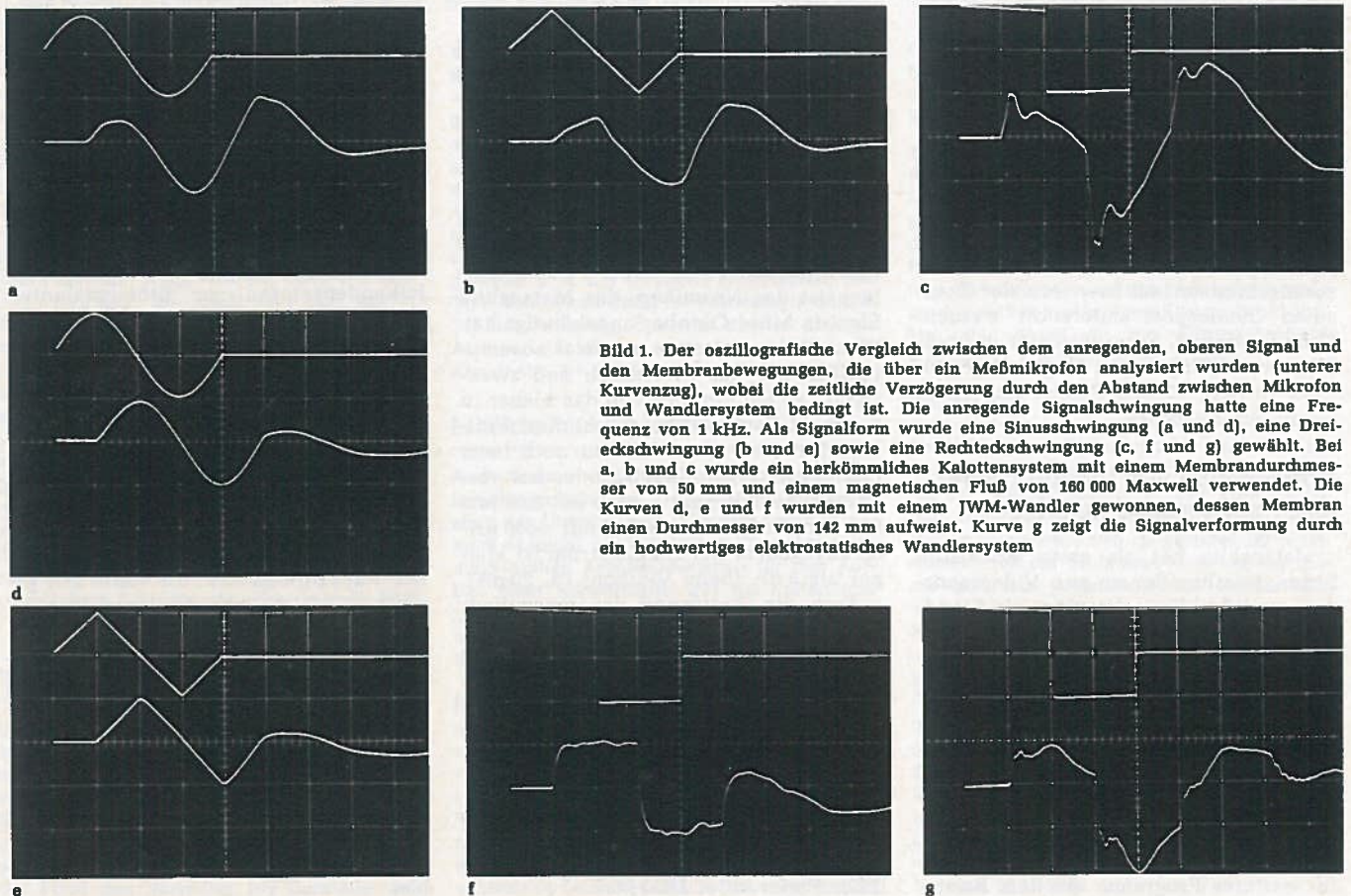
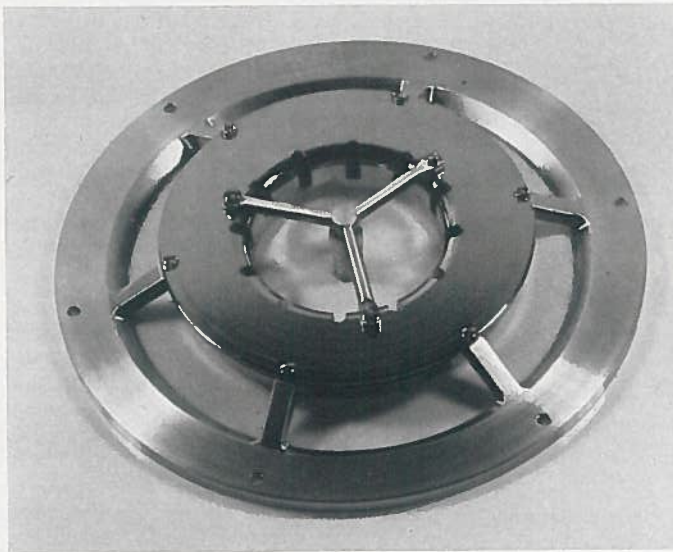


Bild 1. Der oszillografische Vergleich zwischen dem anregenden, oberen Signal und den Membranbewegungen, die über ein Meßmikrofon analysiert wurden (unterer Kurvenzug), wobei die zeitliche Verzögerung durch den Abstand zwischen Mikrofon und Wandler system bedingt ist. Die anregende Signalschwingung hatte eine Frequenz von 1 kHz. Als Signalform wurde eine Sinusschwingung (a und d), eine Dreieckschwingung (b und e) sowie eine Rechteckschwingung (c, f und g) gewählt. Bei a, b und c wurde ein herkömmliches Kalottensystem mit einem Membrandurchmesser von 50 mm und einem magnetischen Fluß von 160 000 Maxwell verwendet. Die Kurven d, e und f wurden mit einem JWM-Wandler gewonnen, dessen Membran einen Durchmesser von 142 mm aufweist. Kurve g zeigt die Signalverformung durch ein hochwertiges elektrostatisches Wandler system



◀ Bild 2.
Die Aufnahme zeigt die extrem flache Bauweise des JWM-Lautsprecherchassis. Das abgebildete Modell hat einen Außendurchmesser von 185 mm und eine Bauhöhe von nur 24 mm. Entsprechend niedrig sind auch die Aufwendungen für den Lautsprechermagneten. In der Mitte ist die sternförmige Mittelstütze der Membran zu erkennen (Aufnahme: A. Leutmayr)

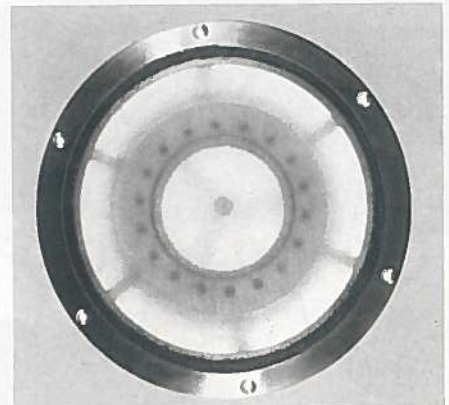


Bild 3. Beim Blick auf die vordere Membranfläche ist die Struktur des gewirkten Trägergerüsts aus Polyamid-Fasern zu erkennen, das der Oberfläche der Membran eine gleichmäßige Rauigkeit verleiht. Die zur Erfassung der Luft erforderliche viskoelastische Füllmasse ist durchscheinend (Aufnahme: A. Leutmayr)

gie zu liefern. Dazu muß die Membran die umgebende Luft genauso in Bewegung setzen wie die ursprünglichen Musik erzeugenden Instrumente. Weil die Membran aber einen ganz anders geformten Körper darstellt als etwa eine Geige, Trompete oder Klavier, kann sie niemals die gleiche Abstrahlung erreichen. Allein schon die energetische Ankopplung der Membran an die Luft macht Schwierigkeiten und verlangt für die jeweiligen Frequenzen des Gesamtspektrums unterschiedliche Membranflächen, die wiederum verschiedene Massen, und in der Membranhaltung un-

terschiedliche mechanische Gegenkräfte bedeuten; ganz abgesehen von der sehr differenzierten Form der Kontaktflächen zwischen Musikinstrumenten und der sie umgebenden Luft.

Die Sache mit den „Kraftspeichern“

Mit der Aufteilung des zu übertragenden Frequenzbereiches auf Spezialchassis für den Baß-, Mittel- und Hochtonbereich konnte ein beachtlicher Teil der geschilderten Schwierigkeiten in bezug auf die Lautstärke überwunden werden. Die grundsätzlich unveränderte Form des dynamischen Lautsprechers mit eingespannter und über eine Schwingspule angetriebenen Membran läßt jedoch die wesentliche Schwäche der Signalverformung weiter bestehen. Alle herkömmlichen Membranen enthalten zwei mechanische Kraftspeicherformen, gegen die die elektromagnetische Führung durch die Schwingspule arbeiten muß. Die eine wirkt infolge der Trägheit der Masse, die rhythmisch in Bewegung gesetzt, abgebremst und in entgegengesetzter Richtung wieder beschleunigt werden muß. Die andere stellt eine Feder dar, mit Brems- und amplitudenabhängigen Rückführkräften in der elastischen Membranaufhängung, wozu noch die Wirkung der eingeschlossenen Luft etwa bei Kalottensystemen gehört. Zu Beginn der Auslenkung muß sowohl gegen die Rückführkraft (Feder) als auch gegen die Trägheit der Masse gearbeitet werden. Beide Energiespeicher laden sich auf und verkleinern dabei die Membranbewegung. Schon vor der Umkehr des elektrischen Antriebes entlädt sich die Feder und beschleunigt die Masse zusätzlich in Gegenrichtung, wobei zunächst die kinetische Energie der Masse aufzuzehren ist. Der erste Nulldurchgang der Membranbewegung erfährt eine zeitliche Verkürzung gegenüber

dem des Signales. Am zweiten Umkehrpunkt der Sinuskurve ergibt sich dann für die Membran eine weit höhere Schwingungsamplitude mit anschließendem Überspringen weit über die Nulllinie hinaus.

Die zeitliche Verschleppung

Im Wechselspiel der beiden Energiespeicher werden Kräfte und damit Bewegungen immer wieder zeitlich verschleppt und die Membranbewegungen in ihrer Geschwindigkeit verändert. Weil aber der Schalldruck der Geschwindigkeit proportional ist, führt dies auch zu einer entsprechenden Änderung der Klangwiedergabe. Die dabei wirksame Zeitkonstante bestimmt zuerst eine Verkürzung und dann eine Verlängerung der abgestrahlten Wellenlänge. Man kann dies deutlich im oszillografischen Vergleich der antreibenden Sinusschwingung mit der über ein Meßmikrofon vor der Membran abgetasteten Luftdruckveränderung ablesen, die ein Abbild der Membranbewegungen liefert.

Zu diesen Verfälschungen kommen überdies noch weitere, die in den bisherigen Membranausführungen begründet liegen. Eine Membran arbeitet nur dann ideal, wenn auch jeder ihrer bewegten Punkte der Auslenkung der Schwingspule exakt gleichzeitig folgt. Man spricht deshalb auch von der kolbenartigen Arbeitsweise einer Membran, die nur zum Teil realisierbar ist. Dazu müßte diese nämlich unendlich steif sein und sich auch bei höheren Frequenzen nicht verbiegen. Weil die Praxis aber gleichzeitig wegen der Trägheitskräfte eine niedrige Membranmasse anstrebt, ist beides zusammen nicht erreichbar. Alle Membranen führen durch die Material-Federwirkung und die Membran-Körperform Eigenbewegungen aus.

Technische Daten

Membran-Durchmesser:	142 mm
Außen-Durchmesser:	185 mm
Gesamttiefe:	24 mm
Dauerbelastbarkeit:	
Weißes Rauschen, ohne Filter, ohne Amplitudenlimit; bei 20 °C Temperaturerhöhung am Magnetssystem gemessen in 20-Liter-Box – 1 System – eingebaut	
	25 W
Übertragungsbereich:	
mit gleitendem Sinus gemessen	
	100 Hz bis 18 kHz ± 2 dB
– nach DIN 45 500 Bl. 7	70 Hz bis 25 kHz
– Bandbreite	30 Hz bis 40 kHz
Betriebsleistung:	
1 m Abstand bei 1 kHz Schalldruckpegel von 96 dB	
	3,2 W
Wechselstromwiderstand:	
Zwei Spulen parallel bei 1 kHz	
	2,2 Ω
lt. Kurvenblatt	20 Hz bis 23 kHz
Gleichstromwiderstand:	
eine Spule	
	4 Ω
Resonanz:	
ohne Gleichstrom	
	≈ 45 Hz
mit Gleichstrom 60 mA	+ 3 Hz
Dämpfung:	
ohne R _i des Verstärkers	
	≥ 0,2

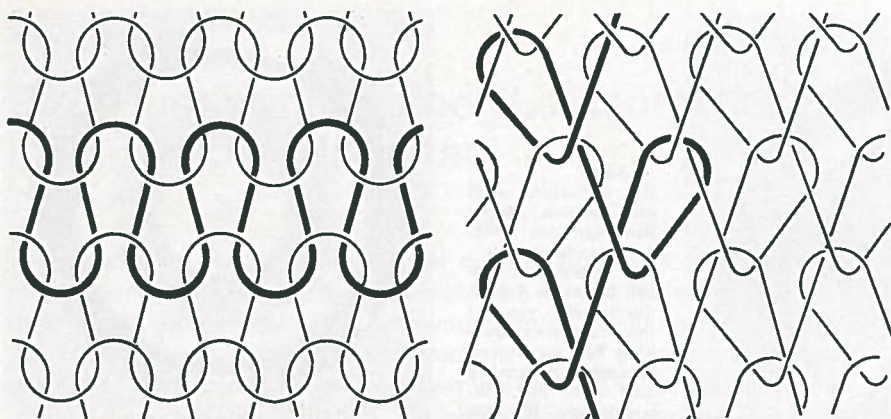


Bild 4. Struktur des nach allen Richtungen dehnbaren Trägergerüsts des JWM-Wandlers, das als gestrickte Maschenware (links) oder als Kettenwirkstoff (rechts) hergestellt sein kann

Der Kniff mit der neuen Membran

Zur Vermeidung der bisherigen Wiedergabefehler ist es also notwendig, alle Energiespeicher so klein zu machen, daß die zeitlichen Verschiebungen der Membranbewegungen im Hörfrequenzbereich praktisch nicht mehr wahrgenommen werden. Da die zur Bewegung der Membran erforderlichen Kräfte gleich der Summe der Trägheits-, Elastizitäts- und Reibungskräfte ist, kann durch eine wesentliche Verringerung aller Elastizitätskräfte mit einer gleichzeitigen Erhöhung der inneren Membranreibung dafür gesorgt werden, daß diese in jeder Phase willenlos und rückwirkungsfrei dem Antrieb folgt. Das bedeutet eine völlige Abkehr von der bisherigen Membranbauweise.

Das JWM-Schallwandlersystem (Bild 2) hat in der Tat durch konstruktive Maßnahmen und die Wahl des Membranwerkstoffes eine so kleine wirksame Masse und so niedrige Elastizitätskräfte, daß die für die Verzerrungen verantwortliche Energiespeicherung praktisch nicht mehr feststellbar ist. Die über die Schwingspule auf die Membran wirkenden Kräfte werden letzten Endes in allen Bewegungsphasen durch eine innere Dämpfung in Wärme umgesetzt (bis zu 40 °C) und sind damit aufgezehrt.

Die neue Membran (Bild 3) besteht aus einem in sich beweglichen Trägergerüst und einer Füllmasse. Als Träger wird eine Maschenware (Gewirk) aus Polyamidfäden verwendet, die nach allen Seiten äußerst dehnungsfähig ist (Bild 4). Bei der Membranherstellung wird sie bis zu einem bestimmten Grad radial vorgespannt und die viskoelastische Füllmasse als eine milchartige Dispersion aufgetragen, die lackartig auftröcknet und dabei vernetzt. Je nach ihrem Durchmesser ist die Membran durchschnittlich 0,3 mm dick und besitzt eine raue Oberfläche, auf der etwa drei Schlingen des Trägers pro Quadratmillimeter erscheinen. Man kann sie mit dem Finger örtlich ein bis zwei Zentimeter tief schlapp durchdrücken, ohne

daß Lageänderungen in radialer Richtung auftreten. Nach einigen Sekunden stellt sich dann die Membranfläche wieder von selbst glatt.

Am Rande wird die Membran vom Lautsprecherkorb gehalten, allerdings ohne die bisherige Sicke. Dazu kommt noch eine sternförmige feste Stütze in der Mitte. Bei den Membranbewegungen kommt es nur darauf an, daß alle Massepunkte unabhängig von der Amplitude mit derselben Phase ausgelenkt werden, so daß die ganze Membranfläche in exakter Phasengleichheit schwingt. Die Amplitude wird durch die mechanischen Eigenschaften des Materials auf maximal 3 mm, also eine gesamte Weglänge von 6 mm begrenzt. Sie fällt vom Ankopplungspunkt der im Durchmesser 70 mm großen Schwingspule bis zum Rande hin ab. Dabei stellt sich der bewegte Teil entsprechend den Kraftübertragungsverhältnissen ein, weshalb die Membran auch ziemlich groß gebaut werden kann. Durch entsprechendes Verteilen der Massepunkte und zusätzliches Einfügen von Masseteilen kann der dynamische Gleichgewichtszustand zwischen Außen- und Innen-Membran relativ zur Schwingspule gewährleistet werden. Bei langsamen Auslenkungen bewegt sich die ganze Membran in gleicher Phase mit gleichmäßigem Schalldruck bis herunter auf etwa 100 Hz (Bild 5). Dann fällt der Schalldruck ab. Weil die Amplituden nach außen abnehmen, schwingt bei höher werdenden Frequenzen ein immer kleinerer Teil der Membran. So ergibt sich automatisch bei den Bässen die für die Er-

fassung einer großen Luftmenge erforderliche große Abstrahlfläche und bei den Höhen die für rasche Bewegungen günstige kleine Masse. Die für Eigenschwingungen kritische Randzone arbeitet bei hohen Frequenzen nicht mehr mit. Da die Membran aus einem leicht dehnungsfähigen hochgedämpften Material besteht, ergeben sich auch keine Rückwirkungen auf die Schwingspule.

Keine Zentriermembran mehr

Selbstverständlich entfällt bei diesem Bauprinzip auch die Zentriermembran. Die Einstellung der Schwingspule auf die Mitte des Spaltfeldes (achsiale Zentrierung) erfolgt auf elektromagnetische Weise. Dazu ist die Schwingspule in zwei Hälften geteilt, die in Serienschaltung mit einem Gleichstrom gespeist werden, während sie für die Speisung mit dem tonfrequenten Wechselstrom parallel liegen. Für die Trennung der beiden Speisespannungen sorgen zwischengeschaltete Kondensatoren. Die Schaltung kann auch umgekehrt, parallel für Gleichstrom und in Serie für Wechselstrom erfolgen. Die Zentrierung funktioniert als Langzeitstabilisierung automatisch, indem die Spulen mit ihren eigenen Magnetfeldern eine symmetrische Gleichgewichtslage auf den mit gleichen Gradienten verlaufenden beiden Flanken des Magnetfeldes innerhalb von etwa $\frac{1}{10} \dots \frac{1}{2}$ s je nach der Stärke des Gleichstromes aufsuchen. Die Gleichstromüberlagerung erhöht die Resonanzfrequenz nur um den geringen Betrag von einigen Hertz. Eine Zentrierung erfolgt aber auch mit reiner Wechselstromspeisung in Serien- oder Parallelschaltung der Schwingspulen.

Das neue Lautsprechersystem ist für eine Mittel/Hochton-Wiedergabe geeignet, wobei als Baßtreiber ein gutes Chassis üblicher Bauweise benutzt werden kann. In jedem Fall ist bei der Gehäusekonstruktion darauf zu achten, daß vor oder hinter der Membran keine eingeschlossene Luftmasse wieder einen Kraftspeicher bildet. Der Schallwandler schwingt im Audiobereich mit einer Abweichung von nur wenigen Promille phasen- und amplitudengenau in Übereinstimmung mit dem zugeführten Signal. Er sorgt bei der Stereowiedergabe deshalb ungeachtet der Aufstellung des Baßlautsprechers für eine überraschend genaue Ordnung der abgebildeten Schallquellen.

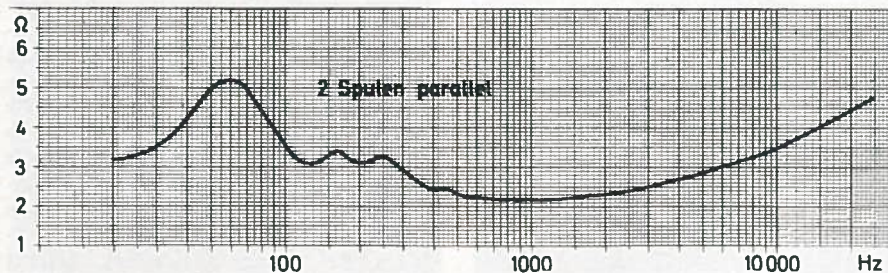


Bild 5. Impedanzverlauf von zwei für Wechselstrom parallel geschalteten Spulen