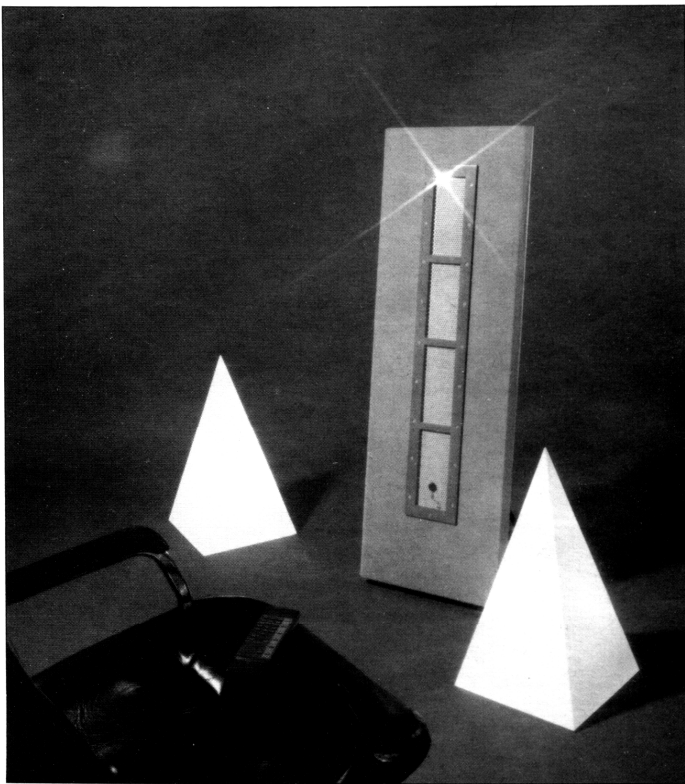


Elektrostat



Elektrostat + Subwoofer = Fullrange

Brettgeflüster

Michael Sombetzki

Es muß wohl auch mit der Gewöhnung an die traditionelle 'Box' zu tun haben, daß einen beim Anblick eines elektrostatistischen Lautsprechers zunächst einmal die blanke Skepsis überkommt. Da soll was Vernünftiges 'rauskommen?

Beim Hörtest verwandelt sich dann meistens die kritische Di-

stanz in freudiges Erstaunen — bis die Verkaufspreise genannt werden. Wer beim kostendämpfenden Selbstbau erfolgreich sein will, braucht ein wenig bastlerisches Geschick und darf sich von ein paar Tausend Volt Hochspannung nicht einschüchtern lassen.

Kaum ein anderer elektroakustischer Schallwandler wurde in der Vergangenheit so unterschiedlich beurteilt wie der elektrostatische Lautsprecher:

Seine Anhänger loben die Durchsichtigkeit der Darbietung, seine Impulstreue und die räumliche Ortbarkeit. Andere behaupten, ein Elektrostat (im folgenden mit ESL abgekürzt) liefere nicht genügend Schalldruck, und ein kräftiger Baß wäre aus ihm auch nicht herauszuholen.

Tatsächlich lassen sich einige Für und Wider gegenüberstellen: Der fast masselosen Membran, die an ihrer gesamten Fläche angetrieben wird, steht die schwere, einige Gramm wiegende, punktförmig angetriebene Membran des dynamischen Systems wie ein 'Luftikus' gegenüber. Auf der anderen Seite läßt sich der allgemein schlechte Wirkungsgrad nur durch 'leistungsstarke' Verstärker ausgleichen; im Grunde ist dabei nur eine genügend hohe Ausgangsspannung erforderlich, denn der Leistungsverbrauch des ESL ist relativ klein. Aber auch durch Aufteilung in ein Mehrwegesystem, wie man es von konventionellen Boxen gewohnt ist, kann der Wirkungsgrad verbessert werden.

Im Grunde ist der antreibende Verstärker nur am oberen Frequenzende des rein kapazitiv wirkenden ESL richtig angepaßt. Eine weitere Möglichkeit, den Wirkungsgrad zu verbessern, indem man mehrere breitbandige Systeme über eine künstliche Übertragungsleitung verbindet, ist (soweit dem Autor bekannt) nur als Labormuster der Firma QUAD verwirklicht worden.

Zusammenfassend kann also gesagt werden: ESL weisen in der Praxis eine geringere Tiefbaßwiedergabe als konventionelle Lautsprecher auf, oder sie erfordern einen hohen Materialaufwand mit den entsprechenden Kosten. Auch bei dem hier vorgestellten System sind Kompromisse eingegangen worden. So arbeitet der ESL nur im Frequenzbereich von 150 Hz... 20 kHz, wobei ein dynamischer Lautsprecher den Tiefbaß übernimmt. Damit dieses ungleiche Paar harmonisiert, wurde mit viel Sorgfalt ein Baßlautsprecher ausgesucht, der alle nachteiligen Eigenschaften eines konventionellen Lautsprechers möglichst gering erscheinen läßt. Aus den oben dargelegten Bedingungen entstand ein System, das zwar immer noch einen Kompro-

elrad 1987, Heft 7/8

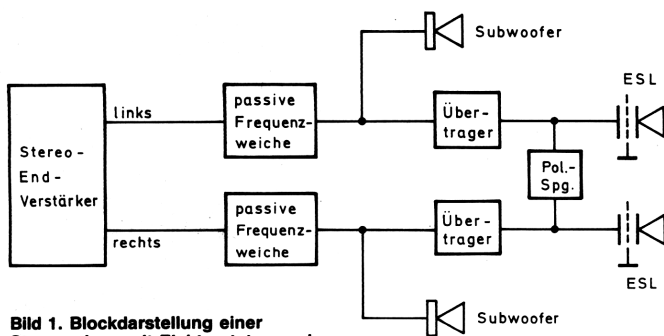


Bild 1. Blockdarstellung einer Stereoanlage mit Elektrostaten und Subwoofern.

miß zwischen Schalldruck und Wiedergabetreue darstellt, Disco-Lautstärken also auch mit dieser Kombination nicht erzielen läßt; wer allerdings das Tanzparkett gegen den Stereosessel eintauscht, wird vielleicht so manche seiner drehenden Scheiben klanglich ganz neu entdecken.

Die Blockdarstellung in Bild 1 gibt einen Überblick über die gesamte Anlage. Man erkennt, daß ein ESL nicht ohne weiteres an einem gewöhnlichen Endverstärker betrieben werden kann. Es werden zusätzlich ein Übertrager und ein Polarisationsnetzteil benötigt. Um die Membran eines ESL in Bewegung geraten zu lassen, sind schon einige hundert Volt Signalspannung erforderlich. Da aber kaum ein Hifi-Verstärker Spannungen in dieser Höhe liefert, benötigt man einen Übertrager, der im Prinzip genauso arbeitet wie jener, der in einem Röhrenverstärker Dienst tut.

Letzterer soll allerdings hohe Wechselspannungen auf kleinere Werte heruntertransformieren — also genau das Gegenteil von dem tun, was für den Betrieb unseres Elektrostaten angebracht wäre. Vertauscht man folgerichtig einfach Primär- und Sekundärseite, hätte man schon einen elektrostatentauglichen Übertrager, der jedoch in unserem speziellen Fall nicht ausreicht, denn der hier beschriebene ESL soll mit Spannungen bis zu 2,5 kV_{ss} betrieben werden. Dafür ist eine Übertrager-Sonderanfertigung nötig, die aufgrund der hohen qualitativen Anforderungen auch noch in einem aufwendigen Mehrkammersystem verschaltet sein muß. Nur so kann eine breitbandige Wiedergabe bis 20 kHz erzielt werden.

elrad 1987, Heft 7/8

Wer nicht gerade Disco-Lautstärke erwartet, wird mit der Elektrostaten/Subwoofer-Kombination viele seiner drehenden Scheiben ganz neu entdecken.

Zum grundsätzlichen Aufbau:

In Bild 3 stellen E1/E2 die Lochblechelektroden, M die Membran und A₀ den Anpassungsübertrager dar. In Bild 3a befindet sich die positiv geladene Membran zwischen den beiden negativ geladenen Elektroden. Legt man eine Eingangswchelspannung an (Bild 3b), so wird eine Halbwelle (hier die negative an E1) die Membran anziehen, die andere Halbwelle (positiv an

E2) die Membran abstoßen. Der ESL arbeitet also nach dem Gegentakt- oder Push-Pull-Prinzip. Betrachtet man die Membran und die Elektroden als Kondensator, so läßt sich leicht einsehen, daß die Kapazität von E1/M wegen des verringerten Abstandes zugenommen hat. Dadurch steigt auch die Anzahl der Ladungsträger auf der Membran. Die auf die Membran wirkenden Kräfte sind von der Polarisierung

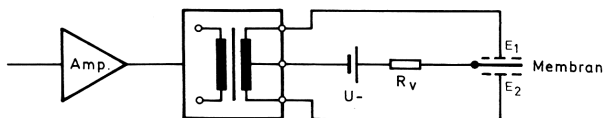


Bild 2. Prinzipschaltung eines ESL, der zum Betrieb eine Polarisationsspannung benötigt, die der Membran über einen hochohmigen Widerstand zugeführt wird.

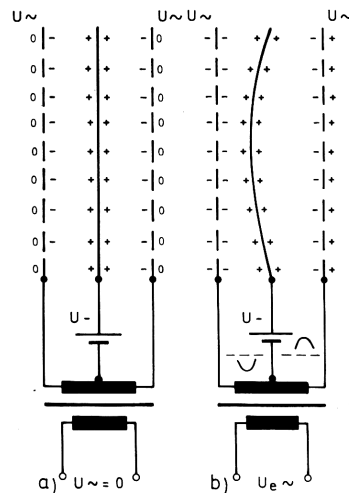


Bild 3. Bei Anlegen einer Wechselspannung wird die Membranfolie in der gezeigten Weise ausgelenkt. Da sich das NF-Signal größtenteils im Kilovolt-Bereich bewegen muß, ist ein spezieller Anpassungsübertrager erforderlich.

Elektrostat

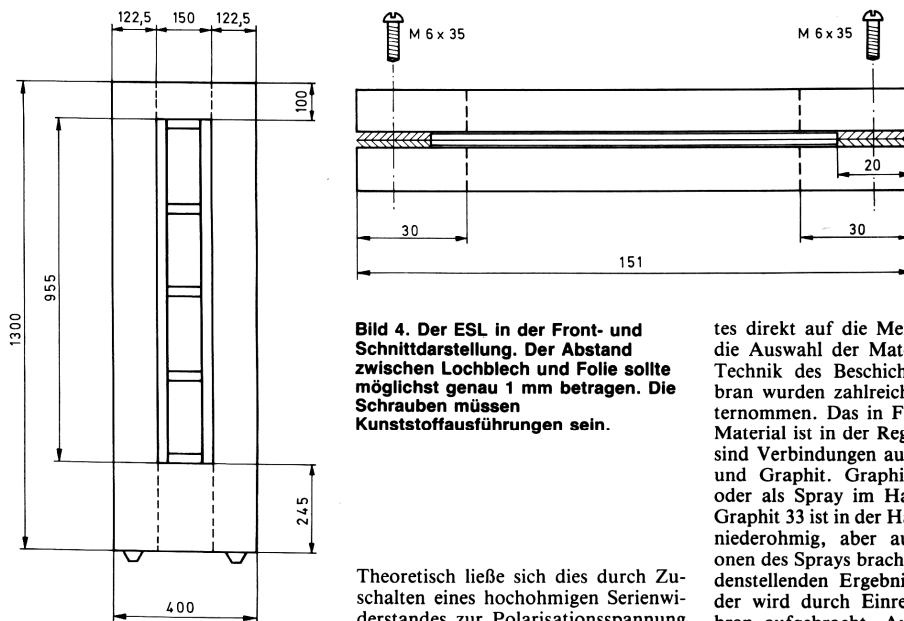


Bild 4. Der ESL in der Front- und Schnittdarstellung. Der Abstand zwischen Lochblech und Folie sollte möglichst genau 1 mm betragen. Die Schrauben müssen Kunststoffausführungen sein.

Theoretisch ließe sich dies durch Zuschalten eines hochohmigen Serienwiderstandes zur Polarisationsspannung erreichen (siehe Bild 2). Die Höhe des Widerstandwertes hängt von der unteren Grenzfrequenz f_{gu} und der Kapazität des ESL ab und errechnet sich nach folgender Formel:

$$RC > \frac{1}{f_{gu}}$$

In unserem Fall benötigen wir mindestens

$$R > \frac{1}{900 \text{ pF} \cdot 2(55) \text{ Hz}} \approx 10 \text{ M}\Omega$$

In der Praxis bringt man eine Widerstandsschicht des entsprechenden Wertes

direkt auf die Membran auf. Für die Auswahl der Materialien und die Technik des Beschichtens der Membran wurden zahlreiche Versuche unternommen. Das in Frage kommende Material ist in der Regel Graphit oder sind Verbindungen aus Eisenhydroxid und Graphit. Graphit ist als Pulver oder als Spray im Handel erhältlich. Graphit 33 ist in der Handelsversion zu niederohmig, aber auch Modifikationen des Sprays brachten keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Graphitpulver wird durch Einreiben der Membran aufgebracht. Ausreichend hohe Widerstandswerte erhält man allerdings nur mit viel Mühe und Ausdauer.

Eine andere Methode wurde beim legendären Shackman-Elektrostaten-Hochtöner angewendet. Eine hauchdünne Papierschicht bildet hier die Membran. Sie wird aus Isolations- und Stabilitätsgründen in zwei Folien eingebettet. Papier besteht aus organischem Zellstoff und hat einen Widerstandswert, der je nach Material zwischen 10^7 und $10^9 \text{ M}\Omega$ schwankt.

Versuche ergaben, daß Papier für unseren ESL nicht in Frage kommt, weil

tionsspannung U , der Wechselspannung u und dem Membranabstand zu den Elektroden abhängig. Wenn U , u , $d1$ und $d2$ konstant sind, die Ladung Q jedoch variiert, schwanken auch die Kräfte, die die Membran antreiben. Diese Nichtlinearität führt zu hörbaren Verzerrungen. Will man diese vermeiden (und man will!), so muß dafür gesorgt werden, daß die Spannungsquelle nach dem Aufladen der Membran abgeschaltet wird. Nur so läßt sich eine Ladungsänderung durch zu- oder abfließende Elektronen vermeiden.

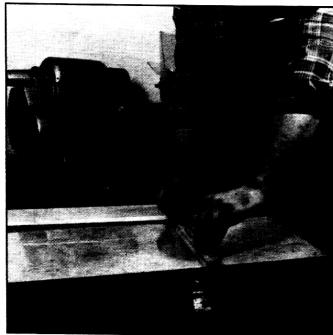


Bild 5. Zum Aufkleben der Folie auf den Spanrahmen muß eine plane Montagefläche vorhanden sein. Diese Aufgabe erfüllt am besten eine Glas- oder Kunststeinplatte. Darauf wird die Folie einfach ausgerollt, auf die man anschließend den Rahmen mit der Klebefläche (doppelseitiges Klebeband) legt.

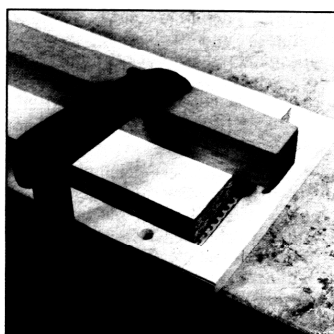
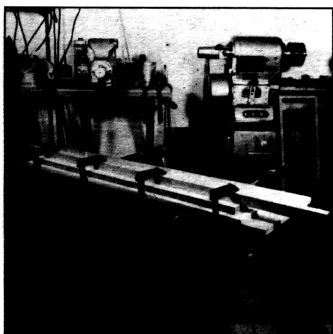


Bild 6. Eine solche Konstruktion aus Schraubzwingen und Spanplatte hilft beim Einkleben des Lochblechs in den Rahmen.

Resonanzen und Instabilitäten zu einem zu frühen Pegelabfall im unteren Frequenzbereich bzw. zu Unregelmäßigkeiten im Frequenzverlauf führen. Diese Nachteile lassen sich jedoch umgehen, wenn der Zellstoff in gelöster Form auf die Membran gebracht wird. Die im Handel erhältliche Methyl-Zellulose läßt sich für die Herstellung eines solchen Lösungsmittels sehr gut verwenden. Seine Hafteigenschaften auf der Membran haben sich bereits in mehr als hundert Stunden Dauertest bewährt.

Um die Membran eines ESL in Bewegung geraten zu lassen, sind schon einige hundert Volt Signalspannung erforderlich. In unserem Falle geht es bis zu 2,5 kV_{SS}.

Der ESL besteht aus zwei kunststoffbeschichteten Lochblechen — diese stellen die Außenelektroden dar — und einer Membran aus Polyesterfolie, die auf Isolierstegen gespannt wird (Bild 5). Zwei Rahmen aus Kunststoff oder beschichteten Spanplatten stabilisieren die Konstruktion. Die hier zur Verwendung kommenden Lochbleche aus Aluminium sollen eine Durchlaßfläche von ca. 40% besitzen. Bei diesem Wert ist der Wirkungsgrad des ESL am größten. Die Lochdurchmesser sind nicht kritisch, wenn sie sich zwischen 1 mm und 5 mm bewegen (Achtung: Bleche mit 1...2 mm Lochdurchmesser haben meist weniger als 30% Durchlaß).

elrad 1987, Heft 7/8

Von entscheidender Bedeutung für das Funktionieren des ESL ist die Ebenheit der Bleche. Weisen Sie also Ihren Händler auf die Bedeutsamkeit dieses Punktes hin. Die Bleche sollten möglichst geschnitten und nicht gesägt werden. Sollte Ihr Händler mit einer Säge arbeiten, so müssen die entstandenen Grate an den Sägekanten unbedingt entfernt werden. Nachdem die Bleche soweit vorbereitet sind, können sie zur Kunststoffbeschichtung gegeben werden.

Gemeint ist hier das Pulverbeschichtungsverfahren, bei dem mit Hilfe elektrostatischer Ladungen ein Kunststoffpulver auf die Bleche gebracht wird. Durch Erhitzen verbindet sich dann der Kunststoff mit dem Blech. Der Vorteil dieses Verfahrens:

- Gleichmäßige Dicke der Beschichtung auch an den Kanten der Lochränder und den Außenkanten.

- Die Schichtdicke (70...80 µm) ist ca. 3mal dicker als beim Spritzverfahren. Daraus resultiert ein höherer Isolationsfaktor.

Als Isolatoren kommen eine ganze Reihe von Kunststoffen in Frage wie z.B. Polystyrol, Acryl, Epoxyd, Lexan und Pertinax. Im Prototypen kam Pertinax zur Verwendung, da dieses Material am preisgünstigsten ist und in der gewünschten Dicke (2 mm) zu bekommen ist. Das gleiche gilt für den Montagerahmen. Allerdings läßt sich hierfür auch eine kunststoffbeschichtete Spanplatte verwenden. Ein Tip für den Zuschnitt der 2 mm-Streifen:

Ein sauberer Zuschnitt wird dann erreicht, wenn man eine Holzleiste o.ä. am Anschlagwinkel so anbringt, daß die zu schneidende Platte so gerade

noch unterhalb der Leiste hindurchzuschieben ist. Aus Polyesterfolie von 12 µm Dicke wird die Membran hergestellt. Sie ist in der angegebenen Stärke nicht im Einzelhandel erhältlich. Der Großhandel liefert erst ab 5 kg (das sind immerhin schon ca. 300 m²), wobei manche Händler noch einen Mindermengenzuschlag fordern. Auch oh-

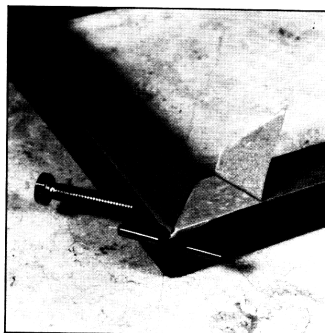
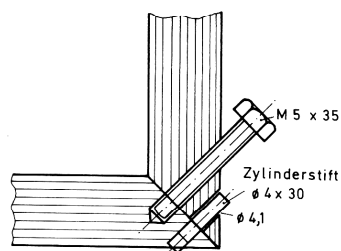


Bild 7. Der Folienspanner in Theorie (oben) und Praxis (unten). Wichtig ist eine sauber zugeschnittene Gehrung.

Elektrostat

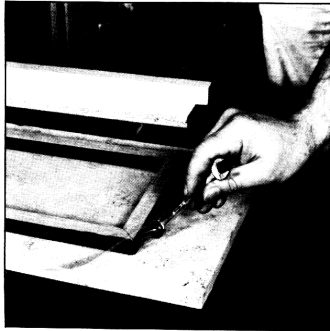


Bild 8. Die Spannschrauben werden reihum so lange angezogen, bis die Tonhöhe der Folie nicht mehr zunimmt.

ne diesen kostet eine 5 kg-Rolle schon ca. 150 D-Mark. Interessenten teilt die elrad-Redaktion auf Anfrage mit, wo ein speziell auf den Elektrostaten zugeschnittenes Stück Polyesterfolie erhältlich ist. An dieser Stelle muß davor gewarnt werden, eine dickere Folie, etwa Dekorationsfolie für Blumen zu verwenden. Auch dort wird Polyesterfolie, allerdings mit 20 oder 30 µm Dicke verwendet. Ihr Einsatz im Elektrostaten erhöht nicht nur das Membrangewicht — wodurch sich nicht unbedingt ein einschneidender Nachteil ergeben würde — sondern verstärkt auch die mechanische Spannung an den Isolierstegen, was zum Ausreißen der Verklebung führen kann.

Alle Verklebungen sollten mit Epoxyd-Kleber vorgenommen werden. Im Handel sind verschiedene Typen erhältlich, die sich grundsätzlich in der Topf- und Abbindezeit unterscheiden. Die Verklebung von Lochblechen und Montagerahmen sollte mit einem 24-Stunden (Abbindezeit)-Kleber gemacht werden. Dieser Kleber schafft eine wesentlich intensivere Verbindung und eine höhere Festigkeit als ein 10-Minuten-Kleber. Letzterer reicht allerdings für die Verbindung Folie/Isolierstege völlig aus. Wie bereits erwähnt, sollte der Montagerahmen aus mindestens 10 mm Kunststoff oder kunststoffbeschichteter Spanplatte bestehen (Bild 6). Darauf werden die Lochbleche und um diese herum die Isolierstege geklebt (Bild 7).

Aufgrund der Dickedifferenz von Lochblech und Isolierträgern ergibt sich später ein Folienabstand zum Blech von 1 mm. Dieser Abstand soll möglichst genau eingehalten werden. Deshalb sind folgende Hinweise zu beachten:

Den Epoxyd-Kleber gleichmäßig, jedoch nicht zu dick auftragen. Dazu eignet sich ein kurzer, harter Pinsel. Die zu verklebenden Teile während der Abbindezeit mit gleichmäßigem Druck zusammenpressen. Dazu kann man eine 5...10 mm starke Glasplatte aufs Blech bzw. die Kunststoffstege legen und mit ca. 15...25-kg-Gewichten beschweren. Obwohl hier kunststoffbeschichtete Bleche Verwendung finden, sollten die abgerundeten Lochränder der Bleche zur Membran zeigen; der Ionisationspunkt wird in diesem Fall in einen höheren Feldstärkebereich verschoben.

Alle Kunststoffteile sollten an ihren späteren Klebestellen mit 180er Schleifpapier aufgeraut werden.

Jetzt können schon einmal die elektrischen Anschlüsse an den Blechen installiert werden. Dazu wird an der nach außen zeigenden Seite ein wenig Kunststoff abgekratzt. Ein 100-W-Lötkolben liefert die nötige Wärme, um mit Hilfe eines speziellen Alu-Lotes die Verbindungen herzustellen. Die Lötstelle wird anschließend mit dem Epoxyd-Kleber überstrichen. Eventuelle Unterbrechungen in der Kunststoffoberfläche, die von der Aufhän-

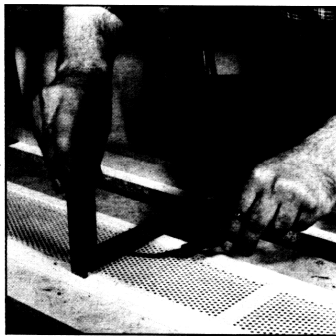


Bild 10. Mit Anschlagwinkel und mm-Lehre kontrolliert man den Abstand von Folie zu Lochblech.

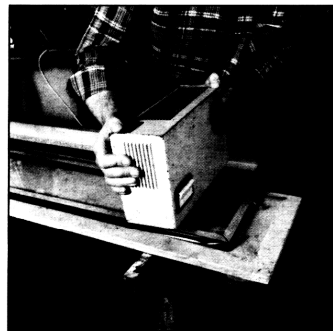


Bild 9. Bei dieser Heizlüfter-Prozedur verschwinden die letzten Fältchen von der Folie.

gung beim Beschichten herrühren, müssen ebenfalls mit Epoxyd geschlossen werden.

Da die Membran im gespannten Zustand auf die Isolierstege geklebt wird, benötigen wir als Werkzeug einen Folienspanner. Eine solche Vorrichtung zeigt Bild 8. Als Material eignet sich Stahl mittlerer Festigkeit. Am besten läßt man sich die einzelnen Teile vom Schlosser zuschneiden; das gewährleistet eine hohe Genauigkeit der 45°-Gehrungswinkel. Wer die Bohrlöcher selbst herstellen will, sollte vorher die zusammenliegenden Ecken der langen und kurzen Stücke kennzeichnen. Nachdem die beiden kurzen Stahlteile jeweils 4 Bohrungen erhalten haben, sollten die gekennzeichneten Pärchen zum Bohren der Stiftlöcher zusammen in einen Schraubstock gespannt werden. Nun sind noch die Sacklöcher zu bohren, die als Widerlager der Spannschrauben dienen sollen. Zum Abschluß sollte der Rahmen zaponiert werden, das schützt vor Rost, und außerdem läßt sich das Klebeband später leichter abziehen.

Auf einer glatten Unterlage (z.B. Glas oder Marmor) wird die Folie ausgebreitet und glatt gestrichen. Sie sollte etwas größer als das Spannwerkzeug sein und faltenfrei liegen. Kleine Delen sind jedoch unerheblich, sie werden später noch 'ausgebügelt'. Auf die 20 mm breiten Flächen des zusammengesteckten Folienspanners wird zweiseitig klebendes Band (Teppichklebe-

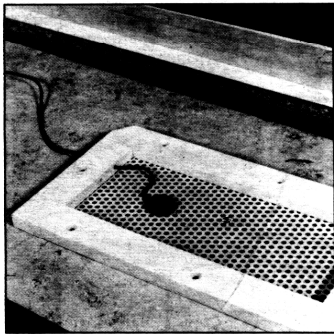


Bild 11. Den Lötspunkt bringt man am besten vor dem Pulver-Einbrennvorgang auf das Lochblech. Nach dem Kabelanschluß sollte man hier eine Isolierkappe anbringen.

band) aufgebracht und mit einem Teppichmesser an den Kanten abgeschnitten. Schneiden Sie die Gehrungsschlitzze frei, damit der Spannvorgang nicht erschwert wird. Der Spanner wird mit der Klebeseite nach unten auf die Folie gelegt. Mit etwas Fingerspitzengefühl sollte man es schaffen können, daß dieser mit der gesamten Fläche zugleich auf die Folie fällt. Ein Verschieben bzw. Aufwerfen der Folie wird dadurch verhindert.

Ist dieser Arbeitsgang geglückt, kann mit dem Spannen begonnen werden. Hierzu den Folienspanner umdrehen und die Spannschrauben reihum um

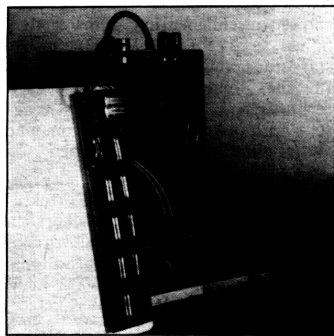


Bild 12. Das fertig aufgebaute und verdrahtete Hochspannungsnetzteil. Das Poti muß aus Kunststoff sein, da es direkt mit der Netzspannung verbunden ist.

elrad 1987, Heft 7/8

jeweils eine Umdrehung anziehen. Durch wiederholtes Klopfen an der Folie kann man verfolgen, wie beim Spannen die Tonhöhe zunimmt. Spannen Sie die Folie so weit, bis eine Zunahme der Tonhöhe nicht mehr wahrnehmbar ist. Das ist nach ca. 2 1/2 bis 3 Umdrehungen der Fall. Hier beginnt die Folie zu überrecken, d.h. durch weiteres Spannen des Rahmens ist keine höhere Folienspannung mehr zu erzielen. Sie sollten auf jeden Fall bei beiden Folien die gleiche Spannung erreichen, damit die beiden Lautsprecher gleichen Wirkungsgrad und gleiche Resonanzfrequenz erreichen.

An dieser Stelle sollte keine Arbeitspause eingelegt werden, denn das Klebeband wird in den nächsten Stunden der hohen mechanischen Spannung nachgeben, und somit wäre die oben beschriebene Arbeit zu wiederholen.

Um Verspannungen der Folie, die durch den Spannvorgang entstanden sind, auszugleichen, muß die Folie kurzzeitig auf ca. 150...180°C erhitzt werden. Ideal wäre ein entsprechend großer Ofen. Ein gewöhnlicher Heizlüfter ist jedoch ein brauchbarer Ersatz. Er wird bei voller Leistung (2 kW) und ca. 2...3 cm Abstand zur Folie mit gleichmäßig langsamer Geschwindigkeit an der Folie vorbeigeführt.

Und jetzt wird geklebt:

Der Spannerahmen wird wieder mit der Folie nach unten auf die glatte Unterlage gelegt! Die Kunststoffstege des vorgefertigten Montagerahmens werden mit dem angerührten Epoxyd-Kleber dünn eingestrichen. Sodann wird der Montagerahmen in den Folienspanner auf die Folie gelegt und mit Gewichten (15...25 kg) gleichmäßig beschwert. Die je nach Klebstoff angegebene Trockenzeit sollte unbedingt eingehalten werden. Ohnehin haben Sie sich jetzt eine Pause verdient.

Nachdem die Folie mit dem Montage Rahmenteil B verklebt wurde, kommen wir nun zum Beschichten mit einem elektrisch aufladbaren Material:

Normaler Tapetenkleister wird mit Wasser im Verhältnis 1:35 angerührt und nach Herstellerangaben 'ziehengelassen'. Dann den Kleister ca. 1 mm dick mit einem mittelgroßen, flachen Pinsel bis zum Außenrand der Folie auftragen. Nach dem Abtrocknen erhält man einen Klebefilm, der nur noch 1...2% seiner Stärke ausmacht.

Entscheidend für das Funktionieren des Elektrostaten ist die Ebenheit der verwendeten Lochbleche, die, sofern sie nicht ausgestanzt sind, unbedingt von den Sägegraten befreit werden müssen.

Prüfen Sie mit der Hand, ob eine zusammenhängende, raue Oberfläche entstanden ist. Andernfalls müssen die Lücken noch ausgefüllt werden.

Für die Verschraubung der Rahmenteile A und B kommen nur Kunststoffschrauben in Frage, da eine Schraubenberührung mit Teilen, die Polarisationsspannung führen, nicht ausgeschlossen ist. Dazu werden beide Hälften so übereinander gelegt, daß die Isolierstege deckungsgleich sind. Es muß hier sehr genau gearbeitet werden, ansonsten entstehen später Nebengeräusche. Dann werden die Rahmen rundherum mit Zwingen festgespannt, um die Schraublöcher zu bohren. Aus Sicherheitsgründen sollte mit einem 3 mm-Bohrer vorgebohrt werden. Anschließend kontrollieren, ob die Leitsilberbahn von einem Loch völlig durchtrennt wurde. Ist dies geschehen, so muß man Leitsilber um das entsprechende Loch herumpinseln.

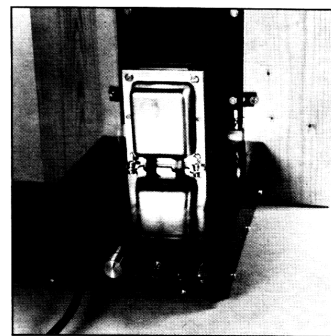


Bild 13. Der Anpassungsüberträger ist nicht ohne weiteres erhältlich. Anfragen hierzu bitte an die Redaktion richten.

Elektrostat

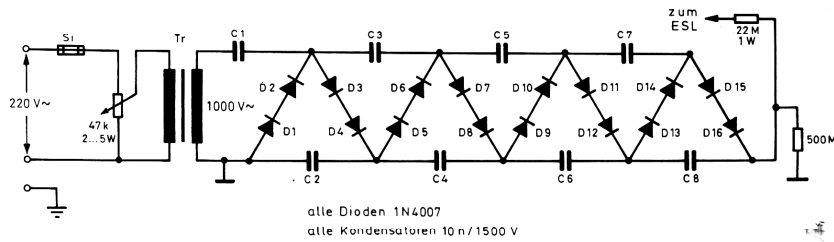


Bild 14. Am Ausgang der Spannungsvervielfacher-Schaltung stehen 6 kV zur Verfügung.

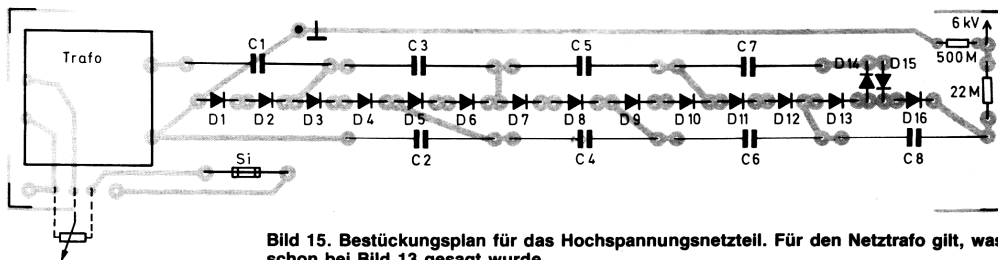


Bild 15. Bestückungsplan für das Hochspannungsnetzteil. Für den Netztrafo gilt, was schon bei Bild 13 gesagt wurde.

Stückliste

— Elektrostat —

Kunststoff	8 Zuschnitte 950 × 20 × 2 mm, 8 Zuschnitte 110 × 20 × 2 mm,	Rundstahl	120 mm lang, 2...3 mm Ø
Alu-Lochblech	4 Zuschnitte 910 × 110 × 1 mm Mindest- durchlaß 40%	Kunststoffschrauben (Polyamid)	5...6 mm Ø, 35 mm lang (40 Stück)
Spanplatte foliert oder Kunststoff	4 Zuschnitte 950 × 150 × 13(10) mm	Metallschrauben	4 Stück M5 × 35 mm
Polyesterfolie	2 Stücke 1100 × 300 mm (12 µ dick)	Anpassungsübertrager	Typ C187/8
Leitsilber selbstklebende	ca. 6 g	Netztrafo	Typ C187/1000
Kupferfolie	5,5 mm breit (Tiffany- Zubehör)	Marmor oder Glas	ca. 1200 × 300 mm (als Montageun- terlage)
Doppelseitiges Klebeband (ohne Gewebe)	10 m	Widerstände	2 Stück 22 M/1 W
Rechteckstahl	2400 mm lang, 20 × 15 mm	Potentiometer	2 Stück 47k/2...5 W Kunststoff(!)
		Kondensatoren	16 Stück 10n/1500 V
		Diode	32 Stück 1 N 4007
		Litze	0,14 mm ²

außerdem: Bananbuchsen, Netzkabel, Sicherungshalter mit Sicherung 32 mA, Epoxykleber, Platine 275 × 55 mm, Zapfenlack, Tapetenkleister

Verschrauben Sie jetzt den ESL und schließen Sie den Übertrager und die Polarisationsspannung an (Poti in Mittelstellung). Anschließend können Sie mit einem gleitenden Sinus über einen angeschlossenen Verstärker den ge-

samten Frequenzbereich durchfahren und beobachten, ob sich Nebengeräusche einstellen. Oft machen sich diese im Bereich der Resonanzfrequenz bemerkbar, denn hier erreicht die Membran ihre größten Auslenkungen.

Durch weiteres Anziehen der Schrauben könnte sich das Geräusch vermindern. Ist das nicht der Fall, müssen alle Schrauben noch einmal gelöst und die beiden Rahmenhälften um einige Zehntel Millimeter verschoben werden. Anschließend sind die Schrauben erneut anzuziehen.

Zum Schluß wird noch die maximale Polarisationsspannung nach folgendem Verfahren eingestellt:

Sinusgenerator mit $f = 1 \text{ kHz}$ am Verstärker anschließen und den Pegel erhöhen, bis 25 V ($= 78 \text{ W}/8\Omega$) am Verstärkerausgang liegen. Dann das Poti für die Polarisationsspannung nach rechts drehen, bis leichte 'Zirp'-Geräusche hörbar werden. Das Poti um eine viertel Umdrehung zurückdrehen.

Sollte die Stereobalance nicht ausgeglichen sein, lassen sich leichte Korrekturen von $1...2 \text{ dB}$ durch Zurückdrehen des Potis am lauterem Kanal vornehmen. Dabei darf die Polarisationsspannung einen Wert von 2500 V nicht überschreiten, weil sonst der Verzerrungsgrad erheblich ansteigen würde.

Im nächsten Heft wird zum Elektrostaten der passende Subwoofer vorgestellt, der die schließlich auch nicht ganz unwichtigen Frequenzen unterhalb von 200 Hz übernimmt. □



Der Würfel zum Brett

Einer treibt es innen

Frank Raphael

Der im letzten Heft vorgestellte elektrostatische Wide-Range-Lautsprecher bedarf noch einer würdigen Ergänzung im Tieftonbereich. Dabei ist es nicht ganz einfach, einen Subwoofer zu konstruieren, der einem Elektrostaten in Sachen Präzision und Schnelligkeit gerecht wird. Folglich sieht das Ergebnis dann doch nicht so schlicht aus, wie der erste Eindruck des unscheinbaren, schwarzen Würfels vermuten läßt. Wie so oft entscheiden die inneren Werte.

Die hervorragende Wiedergabequalität von elektrostatischen Lautsprechern ist bekannt. Bekannt sind aber auch ihre Probleme im Baßbereich. Zwar lassen sich die meisten Schwierigkeiten durch erhöhten Konstruktions- und Materialaufwand beseitigen, die Langzeitstabilität — Folien altern nämlich — stellt jedoch eine unbekannt, schwer kalkulierbare Größe dar.

Für dynamische Lautsprecher ist dagegen die Wiedergabe tiefer Töne eine leichte Übung — besonders in Anbetracht der Tatsache, daß das menschliche Ohr Verzerrungen bis etwa 300 Hz erst sehr spät wahrnimmt.

Eine Frage, die vorab geklärt werden mußte, war die des nutzbaren Übertragungsbereichs der Elektrostaten-Paneele. Einer alten Regel zufolge soll die tiefste noch zu übertragende Frequenz etwa eine Oktave oberhalb der Resonanzfrequenz eines Lautsprechers liegen. Dies gilt für Elektrostaten na-

türlich ebenso wie für Konus- oder Kallottenlautsprecher.

Die Resonanzfrequenz unseres ELS liegt bei 100 Hz. Also ist es sinnvoll, die Übergangsfrequenz auf 200 Hz zu legen. Dies gelingt auf beeindruckend einfache Weise mit einem 10- μ F-Folienkondensator (siehe Frequenzdiagramm, Bild 3a,b).

Dazu jedoch noch eine wichtige Anmerkung: Die Paneele wird, wie auf den Fotos im letzten Heft zu sehen war, in einen Holzrahmen montiert. Das hat nicht nur optische Gründe. Ohne eine derartige Maßnahme läge die untere Grenzfrequenz (wegen des akustischen Kurzschlusses bei Dipolstrahlern) bei rund 1000 Hz. Soll der Elektrostat bis 200 Hz arbeiten, so sind Seitenteile mit einer Breite von jeweils 20 cm anzubringen.

Weitaus schwieriger waren einige andere Probleme zu lösen, die für eine Arbeitsteilung zwischen Elektrostat und dynamischem Lautsprecher recht typisch sind:

●Der Wirkungsgrad. Bei Elektrostaten ist er nicht gerade hoch. Im Gegenteil — er liegt bei etwa 82-86 dB (abhängig u.a. von der Höhe der Polarisationsspannung).

●Die Größe. Für einen so dezenten, flachen Lautsprecher wie unseren Elektrostaten gehört es sich nicht, mit einem kühlenschrankgroßen Baßmonster aufzuwarten.

●Die Schnelligkeit. Bedingt durch die außergewöhnlich geringe zu bewegende Masse schwingen Elektrostaten so unbarmherzig präzise, daß ein herkömmlicher dynamischer Lautsprecher mit seinen Überschwängern unangenehm auffällt.

Die Elektrostatenfreaks können jedoch aufatmen. Es wurde eine Lösung gefunden, die zwar nicht neu, aber trotzdem gut ist.

In der Hifi-Industrie formulieren verschiedene Firmen den Anspruch der Erstentwicklung der zwei hintereinander montierten Baßchassis. Dynaudio bezeichnet es (mit großem Koppelvolumen) als Compound-, die schottische Nobelschmiede LINN bietet es (mit kleinem Koppelvolumen) als Isobarik-Prinzip an. Gemeint ist Ähnliches: zwei Baßtreiber arbeiten in einem geschlossenem Gehäuse, jedoch befindet sich einer der beiden hinter dem anderen im Boxeninneren (siehe Bild 2).

Unter den Lautsprecher-Profis herrscht in den letzten Jahren eine Auseinandersetzung über die Wirkungsweise dieses Prinzips. Während die einen meinen, der innere Treiber würde, da er dieselben Bewegungen wie sein Vordermann ausführt, diesem das Gefühl vermitteln, er arbeite auf einer unendlichen Schallwand und könne so bis zu seiner Resonanzfrequenz Töne von sich geben, so vertraten andere die Ansicht, beide Speaker stellten sozusagen ein neues Chassis mit neuen Parametern dar.

Als Musikliebhaber hat sich der Autor aus solchen physikalischen Diskussionen eher herausgehalten; als Subwoo-

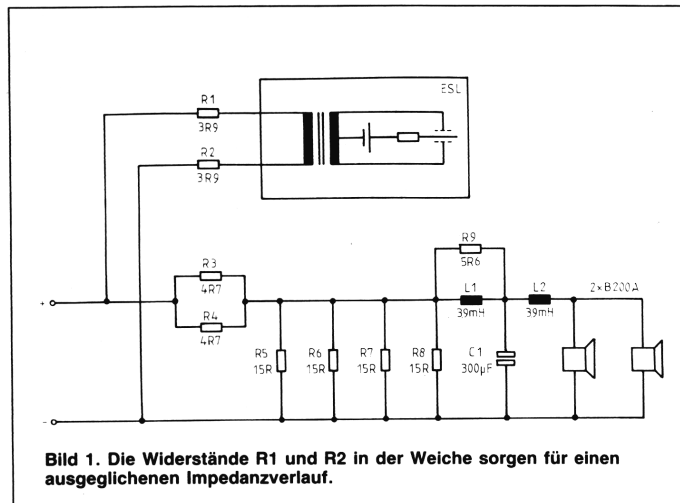


Bild 1. Die Widerstände R1 und R2 in der Weiche sorgen für einen ausgeglichenen Impedanzverlauf.

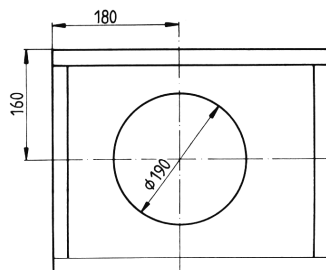
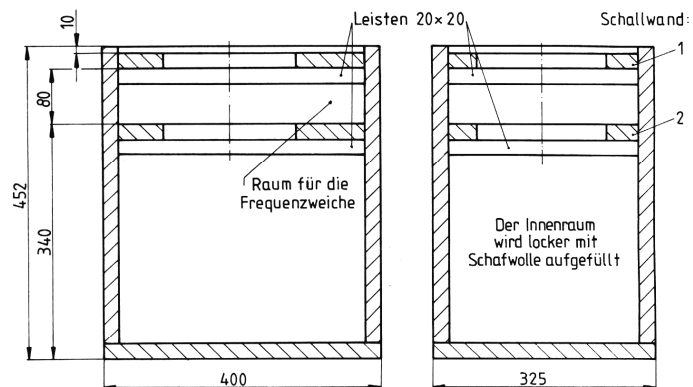


Bild 2. Der Subwoofer wird aus 22 mm starker Spanplatte hergestellt.

Stückliste

— Subwoofer —

Chassis	2 × KEF — B 200 A
R1,2	3R9; 7 Watt
R3,4	4R7; 9 Watt
R5-8	15R; 9 Watt
R9	5R6; 7 Watt
L1,2	3,9 mH; Luftspule
C1	300 μ; Tonfrequenzelko, s. Text

MS-Elektrostaten

Inh. Michael Sombetzki



**Bausätze
direkt vom
Autor**

Bausatz ESL:
564,50 DM (Stck.)

Bausatz Sub:
289,50 DM (Stck.)

Info anfordern!

Tel. 02 09/63 08 09

Schellstr. 9
D-4650 Gelsenkirchen

SOAR

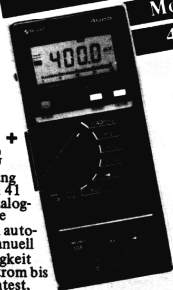
Die neue
Multimeter-Dimension
SERIE
4000

5 Geräte zur Wahl

... zum Beispiel

Modell

4020



DIGITAL + ANALOG

- Anzeigebereich bis 4000 und 41 Segmente Analogbalkenanzeige
- Bereichswahl automatisch + manuell
- Grundgenauigkeit 0,3% Volt, Strom bis 10 A, Diodentest, Durchgangstest, Adapterfunktion
- Meßwert- + Anzeigespeicher
- Batterie-Lebensdauer über 1500 Stunden
- Sicherheitseingangsbuchsen; Aufstellständer
- DM 302,10 (DM 265,- ohne MwSt.) inkl. Meßkabel

SOAR® Europa GmbH
Otto-Hahn-Str. 28-30, 8012 Ottobrunn
Tel.: (0 89) 609 70 94, Telex: 5 214 287

Subwoofer

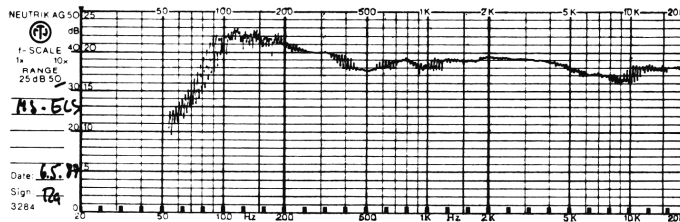


Bild 3a. ELS direkt am Verstärker ausgang.

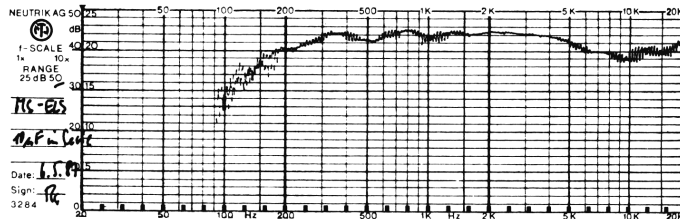


Bild 3b. Über 10 µF angekoppelt.

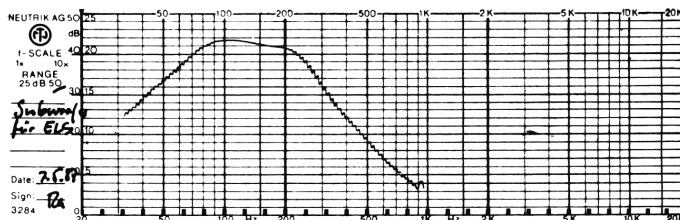


Bild 4a. Subwoofer mit C1 = 300 µF.

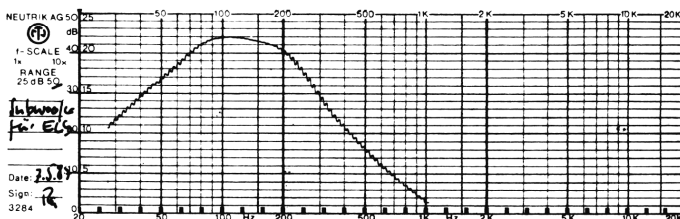


Bild 4b. Mit C1 = 400 µF.

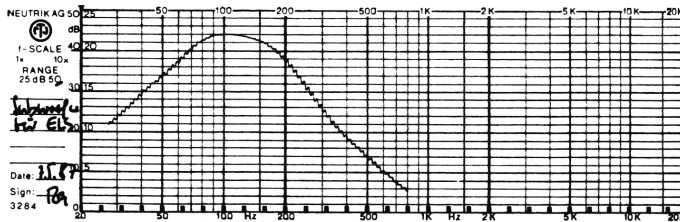


Bild 4c. Mit C1 = 500 µF.

