

11. Lautsprecher

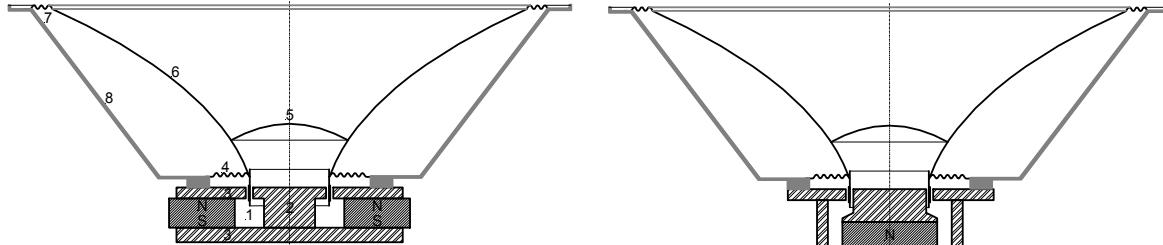
Wer Musik machen will, muss Luft bewegen. Bei der Akustik-Gitarre erzeugt vor allem der schwingende Korpus diese bewegte Luft, vulgo Schallwelle, bei der Elektro-Gitarre ist's der Lautsprecher. Der dynamische Lautsprecher, denn andere Wandlerprinzipien [3] kommen beim Gitarren-Lautsprecher nicht zum Einsatz. Der Durchmesser dieser Lautsprecher wird international in Zoll (engl. INCH) angegeben, 1" = 2.54 cm. Die meisten Gitarren-Lautsprecher haben 10" oder 12", gelegentlich auch 15"; in Übungsverstärkern sind auch 8"-Lautsprecher üblich. Der Gitarren-Lautsprecher ist Teil des Instruments – er soll klangformend wirken, was man auch so ausdrücken kann: Gitarren-Lautsprecher müssen einen grauenhaften Frequenzgang haben und sollen fürchterlich verzerren. Nun gut, vielleicht nicht gerade fürchterlich; aber zumindest "adäquat verzerren". Spielt man eine Elektrogitarre über eine HiFi-Anlage, entsteht ein sehr spezieller Klang, der zwar nicht gänzlich unbrauchbar ist, jedoch nicht im Entferntesten nach Hendrix, Clapton, Beck und Page klingt. Am typischen E-Gitarrensound ist neben dem Gitarristen (ja, auch der macht mit), neben der Gitarre und dem Verstärker auch der Lautsprecher beteiligt. Die "Physik der Elektrogitarre" hat vor allem diese zum Thema, in Folgenden soll aber auch dem Lautsprecher und seinem Gehäuse Platz eingeräumt werden.

11.1 Aufbau und Funktion

Physikalische Grundlagen des dynamischen Wandlungsprinzips sind zwei einfache lineare Abbildungen: 1) In einem Magnetfeld ist die auf einen stromdurchflossenen Draht einwirkende Kraft $F = B \cdot l \cdot I$, mit B = magnetische Flussdichte (Induktion), I = Stromstärke, und l = Drahtlänge. 2) Bewegt man diesen Draht (im Magnetfeld), wird in ihm eine elektrische Spannung induziert: $U = B \cdot l \cdot v$, mit v = Geschwindigkeit. Die Kraft wird **Lorentz-Kraft** genannt, nach dem niederländischen Physiker HENDRIK ANTOON LORENTZ (1853 – 1928), die **Induktionsspannung** wird zumeist mit dem englischen Naturwissenschaftler MICHAEL FARADAY (1791 – 1867) in Verbindung gebracht. Man sollte aber auch des amerikanischen Physikers JOSEPH HENRY (1797 – 1878) gedenken, der unabhängig von Faraday Induktionsvorgänge beschrieb.

Die o.a. Abbildung elektrischer Größen (U , I) in mechanische (v , F) bzw. umgekehrt ist eine lineare Abbildung, zumindest, solange die Systemgrößen B und l signalunabhängig sind – was natürlich bei großer Aussteuerung nicht mehr der Fall sein wird. Trotzdem erhält man mit einem linear/zeitinvarianten Modell einen guten Einstieg in die Beschreibung des Übertragungsverhaltens dynamischer Lautsprecher. Dass gerade beim Gitarren-Lautsprecher auch die Nichtlinearitäten wesentlich sind, dass die Übertragung ja nicht nur zu einem Raumpunkt, sondern zu unendlich vielen erfolgen muss, dass letztendlich auch Zeitinvarianz nicht mehr gegeben ist – all das lässt ahnen, wie kompliziert ein Lautsprechermodell werden kann, wenn man "alle" Eigenschaften beschreiben möchte. Man möchte nicht – allein der Umfang einer profunden Literaturrecherche würde den gesetzten Rahmen sprengen. Die im Folgenden vorgestellte Theorie ist deshalb auf das Grundsätzliche beschränkt, die angeführten Beispiele und Messprotokolle wurden mit Bedacht ausgewählt, sind aber nicht statistisch repräsentativ.

Abb. 11.1 stellt einen Querschnitt durch einen Membranlautsprecher dar. Die im rechten Bild gezeigte Bauform kommt bei Alnico-Magneten (sehr hohe Flussdichte) zur Anwendung, die links abgebildete Bauform eignet sich für Keramikmagnete – sie brauchen wegen ihrer nicht ganz so großen Flussdichte eine größere Fluss-Querschnittsfläche.



1 = Luftspalt mit Schwingspule und -träger, 2 = Polkern, 3 = Polplatte, 4 = Zentrierung (Spinne), 5 = Kalotte, 6 = Membran, 7 = Aufhängung, 8 = Korb. N/S = Magnet.

Abb. 11.1: Querschnitt durch einen Membranlautsprecher. Links: Keramik-Magnet, rechts: Alnico-Magnet. Die Gestalt ist weitgehend rotationssymmetrisch, der Keramikmagnet ist eine Scheibe, der Alnico- ein Zylinder.

Der Dauermagnet erzeugt im Luftspalt ein radiales Magnetfeld, ringförmiger Stromfluss in der Schwingspule bewirkt eine axiale Antriebskraft auf die Membran. Die im Luftspalt erreichbare Flussdichte ist hoch, typischerweise 1 – 1.6 Tesla, gelegentlich sogar noch knapp darüber. Sowohl beim Induktionsgesetz als auch bei der Lorentz-Kraft wird als Systemgröße das Produkt aus Flussdichte B und Drahtlänge l benötigt; dies ist die **Wandlerkonstante Bl** . Beim 8- Ω -Lautsprecher liegt Bl häufig zwischen 10 – 20 N/A, das bedeutet, dass der Gleichstrom $I = 3\text{ A}$ in die Kraft $F = 30 - 60\text{ N}$ umgewandelt wird. Mit 60 N hält man ein 6-kg-Gewicht – erstaunlich, angesichts der Fragilität der verwendeten Materialien: Die Membran ist aus Papier, die Schwingspule aus dünnem Kupferdraht. Die geometrischen Daten dieser **Schwingspule** sind ihr Durchmesser D'' , zumeist in Zoll angegeben, ihre axiale Länge H , ihre Windungszahl N , ihre Drahtlänge l und ihr Drahtdurchmesser d , der häufig als Leiterdurchmesser angegeben wird; mit Isolation vergrößert sich d um ca. 10%. Der elektrische Spulenparameter ist der Widerstand R , zumindest, solange man bei tiefen Frequenzen bleibt. **Abb. 11.2** zeigt für eine zweilagige Wicklung die Abhängigkeit des Drahtdurchmessers d , der Drahtlänge l und der Windungszahl N von Schwingspulendurchmesser D und -länge H unter der Voraussetzung, dass der Kupferwiderstand immer $R = 6\ \Omega$ beträgt. Für eine 10 mm lange 1.5"-Spule benötigt man 11 m Draht ($\varnothing = 0.22\text{ mm}$), daraus ergibt sich mit $B = 1.5\text{ T}$ die Wandlerkonstante zu $Bl = 16\text{ N/A}$.

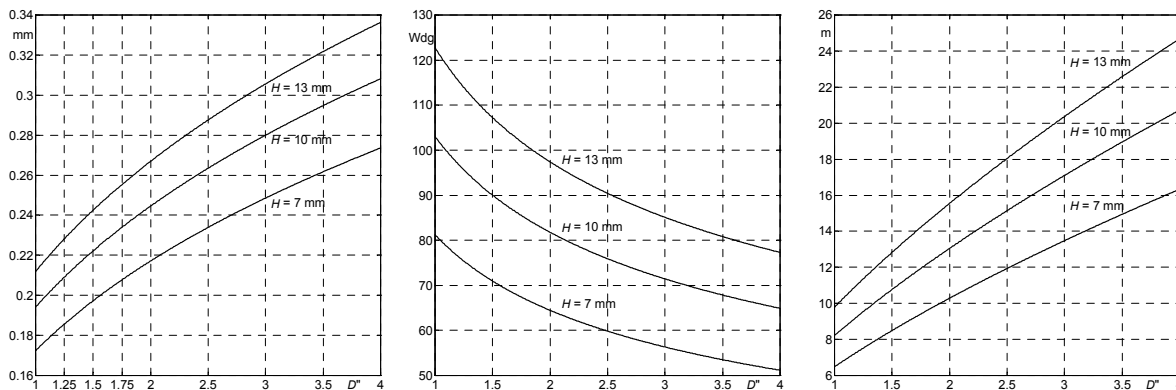


Abb. 11.2: Drahtdurchmesser d (links), Windungszahl N (Mitte) und Drahtlänge l (rechts) in Abhängigkeit vom Schwingspulendurchmesser. Gleichstromwiderstand $R = 6\ \Omega$. Scharparameter: $H =$ axiale Spulenlänge.

Die Drahtlänge lässt sich leicht aus Windungsumfang und Windungszahl berechnen, für das Bl -Produkt ist aber die magnetisch **effektive Drahtlänge** von Bedeutung, nicht die geometrische. In **Abb. 11.3** sind drei verschiedene Fälle dargestellt: Spulenlänge = Luftspaltlänge, sowie eine relativ längere und eine relativ kürzere Variante. Das Magnetfeld ist auf den Luftspalt fokussiert, nach außen hin wird es schwächer. Eine Spule, die gleich lang ist wie der von der oberen Polplatte gebildete Luftspalt, verlässt den (einigermaßen) homogenen Feldbereich, sobald Stromfluss die Spule auslenkt. Dies kann man formal berücksichtigen, in dem man entweder die Flussdichte oder die Spulenlänge auslenkungsabhängig definiert. Im zweiten Fall ist die Spule länger als der Luftspalt, als magnetische Spulenlänge müsste man hier ungefähr die Luftspaltlänge ansetzen. Im dritten Beispiel entsprechen sich geometrische und magnetische Spulenlänge. Für linearen Betrieb sind b) oder c) zu wählen, da hierbei der die Spule durchdringende Fluss auch bei Auslenkung näherungsweise konstant bleibt. Nachteilig macht sich mit Blick auf den Wirkungsgrad bei b) bemerkbar, dass eine Spulenteilmasse bewegt werden muss, die – da im schwachen Randfeld – nur wenig Kraft aufbringen kann. Bei c) ist zwar immer die ganze Spule im starken Feld, zur Erzeugung des (wenig genutzten) Randfeldes ist aber zusätzliche Magnetenergie nötig. Bei a) liegt offenbar ein effizienter Optimalfall vor, solange man nicht auf die nichtlinearen Verzerrungen schaut. Da deren Minimierung bei Gitarren-Lautsprechern aber nicht an erster Stelle steht, findet man hierbei oft Spulenlängen, die in etwa der Luftspaltlänge entsprechen, wähen bei HiFi-Lautsprechern der Fall b) häufig anzutreffen ist.

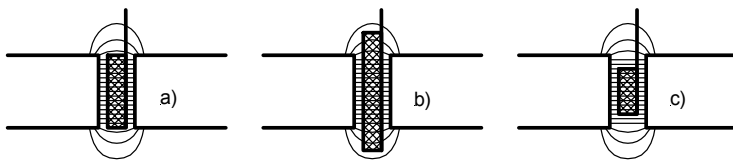


Abb. 11.3: Verschieden lange Schwingspulen im Luftspalt.

Für eine große Wandlerkonstante Bl müssen Flussdichte und Drahtlänge groß sein. Die Flussdichte kann aber nicht beliebig groß gemacht werden, da die flussführenden Polstücke in die Sättigung kommen. Bei der Drahtlänge scheint sich hingegen eine einfache Lösung anzubieten: Großer Schwingspulendurchmesser, und große (effektive) -länge. Beide Maßnahmen bewirken aber eine Vergrößerung der schwingenden Masse, und damit eine Verringerung des Wirkungsgrades. Andererseits vergrößert eine hohe Wandlerkonstante die Antriebskraft, und damit den Wirkungsgrad. Der wichtig ist, aber nicht das alleinige Kriterium: Belastbarkeit und Hochfrequenzverhalten sollen ja auch zur Gesamtperformance passen. Die Hersteller haben ihre eigenen Wege gefunden, um marktgängige Lautsprecher zu entwickeln. Da gibt es die britische Philosophie, dass Gitarrenlautsprecher 12" Membrandurchmesser, und maximal 2" Schwingspulendurchmesser haben sollen. Und daneben gibt es den American way of life, der u.a. fordert, sich von niemand, und schon gar nicht von den Briten, etwas vorschreiben zu lassen. Und deshalb stellt man überlegen lächelnd 12"-Lautsprecher mit 4"-Spulen her. Britware wird zwar nicht mehr bei Boston ins Meer gekippt, ist aber doch irgendwie trashy. In der Werbung. Die Ussis, so sie E-Gitarre spielen, suchen dann aber doch trotz heimischer 600-W-Boliden (4"-Voicecoil, proud and loud) im Internet nach dem legendären blauen britischen Celestion, der mit seinem papierernen Schwingspulenträger gerade mal 15 W verträgt. Acht Stück davon in einem Marshall-Turm vertragen aber auch 120 W. Und wenn man die ganz originalen Blauen nicht mehr bekommen kann: Celestion hat angeblich die alten Maschinen wieder ausgegraben, und fertigt darauf *Original-Replikat*e. Die anno 2000 mit 584 Euro angeboten wurden. Nein, nicht DM, Euro! Pro Stück! $8 \times 584 = 4672$ Euro, das kann man sicher noch auf 4500 runterhandeln. Dann nur noch aufpassen, dass der Roadie nach einer durchräucherten Nacht nicht aus Versehen ein Netzkabel dranlötet ...

12"-Lautsprecher werden mit sehr unterschiedlichen Schwingspulen hergestellt: Die üblichen Durchmesser liegen zwischen 1" – 4", woraus bewegte Massen von 25 – 75 g resultieren. Denn natürlich ist eine große Schwingspule schwerer – sie ermöglicht aber auch eine größere Wandlerkonstante, und sie kann mehr Wärme dissipieren. Tieffrequent sind das schon die wesentlichen Parameter, im Bereich höherer Frequenzen beeinflusst die Schwingspule auch die Partialschwingungen der Membran (Chladni^{*}).

Ein **Beispiel** soll die Größen veranschaulichen: Ein 12"-Lautsprecher wird bei 200 Hz betrieben, das ist über der Resonanzfrequenz, somit Massehemmung, und unter der Abstrahlungsgrenzfrequenz, somit Massebelastung [3]. Nimmt man den Lautsprecherwiderstand vereinfachend zu 8Ω an, ist zum 1-W-Betrieb ein Strom von 0.35 A erforderlich. Mit der Wandlerkonstante $Bl = 14 \text{ N/A}$ ergibt sich eine Antriebskraft von 5 N. Diese Kraft erzeugt zusammen mit der bewegten Masse (z.B. 28 g) die Membranbeschleunigung $a = 177 \text{ m/s}^2$ – immerhin die 18-fache Erdbeschleunigung! Für einen Lautsprecher aber nichts Besonderes, bei Vollast wird's noch wesentlich mehr. Aus der Beschleunigung erhält man durch Integration die Membranschnelle (0.14 m/s), nochmaliges Integrieren ergibt die Auslenkung: 0.11 mm. Da es sich bisher um Effektivwerte handelte, muss für die Auslenkungs-Amplitude mit 1.4 multipliziert werden: Maximalauslenkung 0.16 mm. Erhöht man den Strom auf das Zehnfache (3.5 A), so steigt die Leistung von 1 W auf 100 W, und die Auslenkung auf 1.6 mm (Linearität vorausgesetzt). Ehe man nun aber die Auslenkung als unproblematische Größe einordnet, sollte man kurz in Erinnerung rufen, dass die Auslenkung (bei Stromeinprägung) Tiefpasscharakter hat: Reduziert man die Frequenz, erhöht sich die Auslenkung. Quadratisch! Schon bei 100 Hz ergeben sich damit 6.3 mm, bei 20 Hz sind's 16 cm. Nein, nicht wirklich, nun kommt die Resonanz ins Spiel: Hätte der Lautsprecher seine Hauptresonanz bei 100 Hz, wäre er bei Betrieb unterhalb dieser Frequenz steifigkeitsgehemmt, mit Proportionalität zwischen Kraft und Federsteifigkeit. Zurück zu den 200 Hz: Aus der oben berechneten Schnelle kann hieraus mit der effektiven Membranfläche (530 cm^2) und dem Realteil der Strahlungsimpedanz die in einen Halbraum abgestrahlte Wirkleistung berechnet werden: $P_{ak} = 48 \text{ mW}$. Verteilt man diese Schallleistung auf eine Halbkugel mit 1m Radius, so ergibt sich hieraus eine Intensität von 7.8 mW/m^2 , und daraus ein **Schallpegel** von $L = 99 \text{ dB}$. Dieser Wert gilt für nicht-bündelnde Abstrahlung in einen Halbraum.

Abb. 11.2 hatte schon gezeigt, dass für einen gegebenen Gleichstromwiderstand (z.B. 6Ω) Drahtlänge, -durchmesser und Windungszahl nicht unabhängig voneinander gewählt werden können. Ein Parameter ist die Schwingspulenlänge, ein anderer die Lagenanzahl. Abb. 11.2 wurde für eine **zweilagige Wicklung** berechnet, man könnte den Draht aber auch vierlagig wickeln, und würde dadurch Drahtlänge und -durchmesser vergrößern. Größere Länge käme der Wandlerkonstante zugute, und damit dem Wirkungsgrad. Gleichzeitig würde sich aber auch die zu bewegende Masse vergrößern, und der Luftspalt müsste breiter werden, um die doppelt so dicke Wicklung aufnehmen zu können. Verbreitern des Luftspaltes reduziert aber die magnetische Flussdichte, d.h. die Wandlerkonstante. Um die B -Abnahme zu kompensieren, müsste der Magnet vergrößert werden, die teuerste Komponente des Lautsprechers. Und auch bei der Belastbarkeit sind die Zusammenhänge nicht ganz trivial. Die der Schwingspule zugeführte Leistung muss größtenteils von deren Oberfläche durch Konvektion (= Wärmeübergang) abgegeben werden. Eine vierlagige Wicklung hat gegenüber einer zweilagigen bei gleicher Länge aber fast dieselbe Oberfläche – der diesbezügliche Gewinn wäre nicht nennenswert. Jeder Hersteller muss hier seine eigene Optimierungsstrategie finden, am Markt gibt es zwei- und vierlagige Spulen, und sogar solche aus gewickeltem Flachdraht, um noch ein Quäntchen mehr an Wirkungsgrad zu erzielen.

* Ernst Chladni (1756 – 1827), Begründer der experimentellen Akustik.

Es ist ja schon erstaunlich, dass eine 25 cm^2 große Drahtfläche 200 W aushält, dass durch einen dünnen Kupfer-Lack-Draht 5 A fließen können, ohne dass dieser schmilzt. Die Strombelastbarkeit entsprechender Drähte in einem Transformator liegt bei $3 - 5 \text{ A/mm}^2$, beim Lautsprecher übertrifft man leicht das zehnfache. Was üblicherweise als Belastungsgrenze angesehen wird, ist eine **Stromdichte**: Strom pro Querschnittsfläche – da scheint eine Grenze zu existieren, die nicht überschritten werden darf. Wenn durch einen Quadratmillimeter zu viele Ampere fließen, geht der Draht kaputt. So ist es aber nicht. Der Strom verursacht am Drahtwiderstand einen Spannungsabfall, der, multipliziert mit dem Strom, die aufgenommene Leistung darstellt. Z.B. (ohne Phasenverschiebung zwischen U und I): $2.83 \text{ V} \cdot 0.35 \text{ A} = 1 \text{ W}$. Anstelle der Einheit Watt kann auch auf die in der Thermodynamik übliche Kilokalorie umgerechnet werden: $1 \text{ W} = 0.86 \text{ kcal/h}$. Wird einem elektrischen Widerstand eine Stunde lang 1 W zugeführt, entspricht dies einer Energiezufuhr von 0.86 kcal . Diese zugeführte Energie kann nicht verschwinden; ein Teil davon wird an andere Objekte abgegeben, ein Teil führt zur Temperaturerhöhung des Widerstandes. Damit der Widerstand überhaupt Wärmeenergie abgeben kann, *muss* seine Temperatur erhöht sein: Aus der gegenüber der umgebenden Luft bestehenden Übertemperatur berechnet sich die durch **Konvektion** abgegebene Wärme-Energie (wichtig), aus der gegenüber benachbarten Objekten bestehenden Übertemperatur berechnet sich die durch **Strahlung** abgegebene Energie (eher unbedeutend). Ein Widerstand (bzw. ein Kupferdraht), der Wärme schlecht abgeben kann, erhitzt sich stark, und darin liegt die Gefahr: Wird er zu heiß, geht er kaputt. Zuerst verbrennen Isolierlack und Kleber, bei zu hoher Temperatur schmilzt sogar das Kupfer (Schmelzpunkt $1083 \text{ }^\circ\text{C}$). Für die Wärmeabgabe ist also nicht primär die Draht-Querschnittsfläche von Bedeutung, sondern die Oberfläche des erwärmten Objektes (zusammen mit weiteren Parametern). Deshalb ist ein Stromdichtewert kein adäquater Parameter, um die Belastbarkeit abzuschätzen. Wie man auch bei den Kupferbahnen auf Leiterplatten sieht: Da sind 200 A/mm^2 keine Seltenheit.

Die Schwingspule muss die ihr zugeführte Energie zum größten Teil als Wärme abgeben; der als Schwingungsenergie bzw. Schall abgegebene Teil ist demgegenüber fast schon vernachlässigbar. Stromfluss erwärmt die Schwingspule, diese erwärmt die umgebende Luft, und diese muss ihre Wärmeenergie möglichst gut an die feldfokussierenden Polplatten abgeben können. Aus diesem Grund (und nicht nur für eine hohe Flussdichte) ist ein enger Luftspalt wünschenswert. Ist die Schwingspule länger als der Luftspalt (Abb. 11.3.b), so ist der überstehende Teil besonders überhitzungsgefährdet, weil hier der Abstand zur kühlenden Polplatte größer ist. Gute Dienste leistet hier eine aufgesetzte Verlängerung, die aber aus nichtmagnetischem Material (z.B. Aluminium) bestehen muss (**Abb. 11.4**). Für das statische Magnetfeld hat dieser Extender keine Bedeutung, für die Wärmeabfuhr schon. Für das dynamische Magnetfeld allerdings auch, was durchaus erwünscht sein kann: Die in ihm induzierten Wirbelströme verdrängen das Wechselfeld aus dem Magnetkreis (Tiefpass), und verringern die durch Feldmodulationen bedingten Nichtlinearitäten. Ob eine **Kernbohrung** hilfreich ist, kann nur im Einzelfall entschieden werden: mit luftdichter Staubschutzkappe (Kalotte) entsteht eine Pumpe, die Kühlluft durch den Luftspalt pumpt – aber auch eine nichtlineare Feder. Die Bohrung verringert die Nichtlinearität, und die Kühlung [Klippel W., JAES Vol 52, 2004].

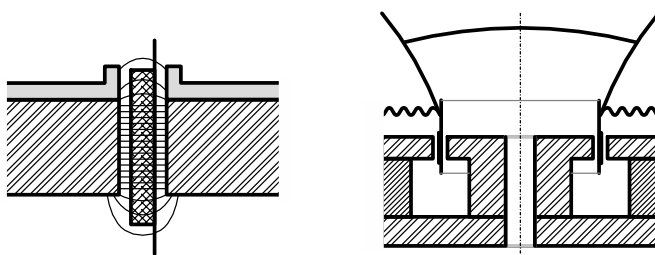


Abb. 11.4: Polplatte mit nichtmagnetischem Kühl-Extender (links), Polkern mit Lüftungsbohrung (rechts).

Die Schwingspule wird im Betrieb sehr heiß, ihr Metall (zumeist Kupfer, gelegentlich Alu) kommt mit dieser Belastung aber ganz gut zurecht. Nicht so Isolierung/Kleber und Träger. Zu Beginn der Lautsprecher-Ära war der Schwingspulenträger aus Papier; dünn, leicht, aber nicht sehr temperaturbeständig: Ca. 100 – 120°C durfte im Dauerbetrieb nicht überschritten werden, dementsprechend waren für die ersten 12"-Lautsprecher auch nur 15 W Belastbarkeit spezifiziert. Mit der Entwicklung neuer Kunststoffe hielten höherbelastbare Materialien Einzug, so z.B. das aus Polyamidfasern bestehende **Nomex** (Meta-Aramid), das schon Temperaturen bis 220°C aushält. Noch höheren Temperaturen hält **Kapton** stand, der Hersteller (DuPont) gibt für diese Polyimid-Folie eine Dauertemperaturbeständigkeit von 230°C an, die Lautsprecher-Hersteller nutzen aber gerne den bis 400°C spezifizierten Kurzzeitbereich. Falls auch das nicht reicht: Spulenträger aus Aluminium wären noch höher belastbar, sie konnten sich bei typischen Gitarren-Lautsprecher aber nicht durchsetzen.

Kapton hat sich bei neueren Lautsprechern als Standardmaterial bewährt, aber auch Nomex und sogar Papier sind immer noch im Einsatz. Hauptgrund: Der Sound. Hersteller wie z.B. Eminence attestieren dem Papier-Schwingspulenträger einen etwas wärmeren Sound, Kapton produziert demzufolge einen etwas brillanteren Sound, Nomex liegt dazwischen. Groß sind die Unterschiede aber nicht, Form und Aufbau der Membran haben diesbezüglich Priorität. So gibt es bei Eminence einen 12"-Lautsprecher (L-122) wahlweise mit Papier- oder Kapton-Schwingspulenträger. Die Belastbarkeit unterscheidet sich natürlich auch: 20 W oder 35 W, ein üblicher Wert für 1"-Schwingspulen. Daneben bietet Eminence aber noch 5 weitere 12"-Gitarren-Lautsprecher an, darunter auch einen 100-W-Lautsprecher mit 2"-Spule auf einem Kapton-Träger. Falls gewünscht aber auch 'britische' Membranen, auf Papier- oder Kapton.

Temperaturbeständigkeit und Wirkungsgrad sind sicherlich wichtige Größen eines Lautsprechers, das Hauptkriterium ist aber der Sound. Auch wenn die Schwingspule daran einen kleinen Anteil haben mag, abgestrahlt wird der Schall von der Membran, sie ist die für den Sound wichtigste Komponente. Nach der einfachen Kolbenmembran-Theorie erfolgt zwischen der Resonanz- und der Grenzfrequenz (z.B. 90 – 600 Hz) eine frequenzunabhängige Leistungsabstrahlung, im darüber liegenden Frequenzbereich nimmt die abgestrahlte Leistung mit $1/f^2$ ab. Tieffrequent strahlt der Lautsprecher die Schallleistung (nach der Kolbenmembran-Theorie) in einen Halbraum ab, ab ca. 600 Hz setzt Bündelung ein, und die mit $1/f^2$ abnehmende Leistung wird auf einen immer kleineren Raumbereich gebündelt. Die Kolbenmembran-Theorie gilt aber nur für die ideal formstarr schwingende Membran; die reale Membran schwingt hingegen bei mittleren und höheren Frequenzen nicht mehr formstarr, sondern "bricht auf", d.h. schwingt in **Eigenmoden** (stehende Wellen, Partialschwingungen). Dieses Eigenleben der Membran, das sich der einfachen Theorie zunächst entzieht, ist beim HiFi-Lautsprecher unerwünscht, beim Gitarren-Lautsprecher aber durchaus willkommen, reichert es den Gitarrenklang doch mit belebenden Hochtönen-Interferenzen an. Wie schon eingangs erwähnt: Eine neutrale, verfärbungsfreie Wiedergabe ist beim Gitarren-Lautsprecher nicht das Ziel der Entwicklung. Und so verbeult der Lautsprecher-Konstrukteur die Membran mit vielen Rippen (engl. CORRUGATIONS), auf dass sie bis ca. 5 kHz möglichst viele, charakteristische Partialschwingungen erzeugen möge. In **Abb. 11.5** ist eine dieser umlaufenden Rippen in eine aufgeschnittene Membran eingezeichnet. Bei den in Gitarrenverstärkern häufig eingesetzten Celestion-Lautsprechern sind's meistens deren 8, bei Jensen-Lautsprechern auch bis zu 12. Mehr Details zu Membranschwingungen folgen in Kap. 11.3.

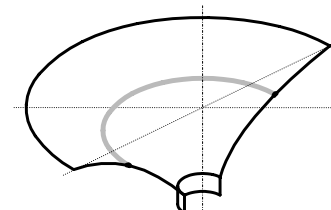


Abb. 11.5: Membran mit Rippe