

4.8 Feldverlauf in Werkstoffen

In Vakuum (bzw. Luft) besteht ein einfacher Zusammenhang zwischen Flussdichte und Feldstärke: $B = \mu_0 H$. Bei ferromagnetischen Werkstoffen sind die Verhältnisse komplizierter, μ ist hierbei wesentlich größer als μ_0 , und nichtlinear von H abhängig. Größere Permeabilität μ bedeutet bessere magnetische Leitfähigkeit, also kleineren magnetischen Widerstand. Wenn man den **Feldlinien** (Flusslinien) unterstellt, immer den Weg des geringsten Widerstandes zu "suchen", bekommt man eine anschauliche Erklärung für die Wirkung ferromagnetischer Materialien im Feld: Sie "saugen" sozusagen die benachbarten Feldlinien in sich auf, die dadurch – trotz des etwas längeren Weges – insgesamt einen kleineren Widerstand vorfinden. Die Fachliteratur bietet noch wesentlich tragfähigere Modelle an, in denen z.B. mikrokosmische Kreisströme als Ursache jeglichen magnetischen Verhaltens angenommen werden, für einfache Betrachtungen reichen aber einfache Modelle völlig aus.

Zur Beschreibung des magnetischen Verhaltens üblicher Gitarren-Tonabnehmer ist die vereinfachende Unterteilung in magnetische und unmagnetische Materialien sehr zweckmäßig, weil Para- und Diamagnetismus keine Rolle spielen. Luft, Holz, Kunststoffe, Lacke, Messing, Kupfer, Aluminium, Neusilber (u.v.a. mehr) sind somit unmagnetisch, Stahl^{*}, Nickel und Eisen sind (ferro)magnetisch. Eine Kupferplatte kann also nicht, wie manche beim Telecaster-Tonabnehmer vermuten, "das Magnetfeld reflektieren", denn für stationäre Magnetfelder besteht zwischen Luft und Kupfer kein Unterschied. Dass unter dem Tele-Pickup gar keine Kupferplatte, sondern eine *verkupferte* Stahlplatte sitzt, die gelegentlich auch verzinkt war, oder verzinkt, oder was auch immer – das ist eine andere Geschichte. Ignorieren wir also den dünnen Kupferüberzug, und unterstellen dem Rest ferromagnetisches Verhalten, dann haben wir einen magnetischen Werkstoff im Feld eines (bzw. mehrerer) Dauermagneten. Wie ändert sich hierdurch der Feldverlauf, was bewirkt dieser Werkstoff?

Ferromagnetika leiten Magnetflüsse viel besser als Luft, vergleichbar etwa einem Drainagerohr, das im Erdboden seine Umgebung entwässern soll: Mühsam sind des Wassers Wege, in der Erde fließt es träge, doch in Rohren aus Schamott, rauscht's von hinnen mächtig flott[♦]. Die Drainagerohre setzen dem Wasser weniger Strömungswiderstand entgegen als der Erdboden, und ähnlich ist's im Magnetfeld: Im Ferromagnetikum wird die Flussdichte erhöht, in der angrenzenden Luft erniedrigt. In **Abb. 4.28** ist die feldfokussierende Wirkung eines Ferromagnetikums für drei verschiedene Permeabilitätswerte (= Leitfähigkeiten) dargestellt: Je größer μ , desto größer die Wirkung. Jedoch nicht unbegrenzt: Selbst bei unendlich guter magnetischer Leitfähigkeit bleibt die Wirkung auf die am seitlichen Bildrand verlaufenden Feldlinien eher gering – sie sind schon zu weit entfernt.

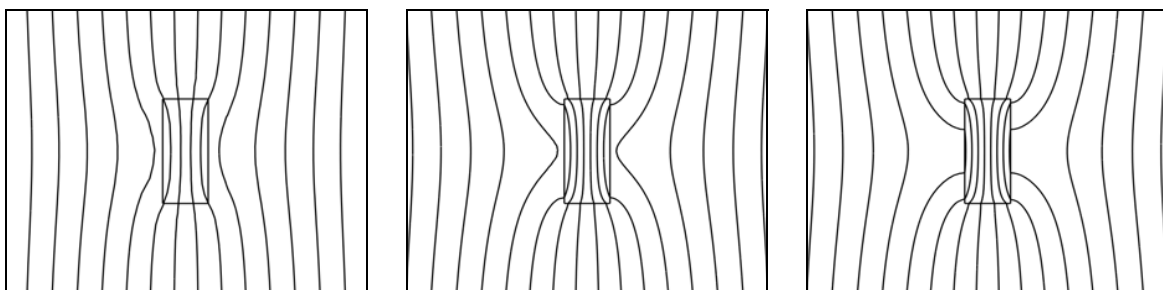


Abb. 4.28: Feldlinienverlauf in ferromagnetischen Materialien. Stationäres, parallelebeines Magnetfeld, keine Wirbelströme. Die Permeabilität ist vereinfachend als örtlich konstant angenommen. $\mu = 5, 50, 5e6$ (v.l.n.r.).

^{*} Einige Stahlsorten sind allerdings unmagnetisch [♦]Nein, nicht Schiller

Die Effizienz der feldverstärkenden (oder besser: flussverstärkenden) Wirkung des Ferromagnetikums wird mit der **Permeabilität** μ beschrieben (Kap. 4.3). Zwischen $\mu = 1$ (z.B. Luft) und $\mu = 5$ (Abb. 4.28) zeigen sich im Beispiel schon deutliche Unterschiede, zwischen $\mu = 5$ und $\mu = 50$ auch. Mit wachsendem μ fällt der sichtbare Gewinn jedoch immer geringer aus, und selbst mit $\mu = \infty$ ergibt sich (gegenüber $\mu = 50$) keine dramatische Veränderung mehr. **Abb. 4.29** verdeutlicht dies an einem Beispiel: Solange vor bzw. hinter dem Ferromagnetikum magnetische Widerstände (Luftspalte) verbleiben, treten Feldlinien in den Luftraum aus.

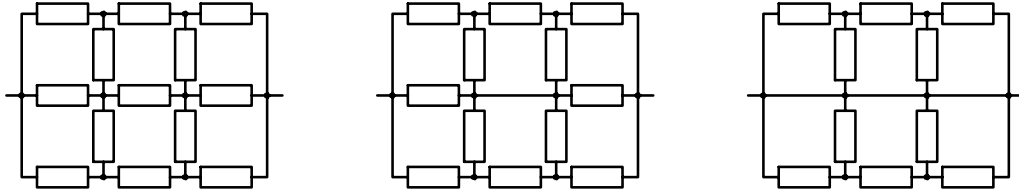


Abb. 4.29: Elektrischer Stromfluss durch ein ortsdiskretes Modell. Auch wenn der mittlere Widerstand auf null verkleinert wird, fließt noch ein Strom in den äußeren Zweigen (mittleres Bild). Erst bei totalem Kurzschluss (rechtes Bild) sind die äußeren Stromzweige stromfrei. Analogie: Elektrischer Strom \leftrightarrow Magnetischer Fluss.

Der oben angenommene Grenzfall $\mu = \infty$ ist zwar nicht realisierbar, gleichwohl hilfreich für Grenzflächenbetrachtungen: Unter dieser Extrembedingung wird die Feldstärke im Metall zu null, weil B nicht unendlich werden kann. Aus der Stetigkeitsbedingung wandparalleler Tangentialfeldstärken folgt, dass die am Metall entlang auftretende Luft-Feldstärke dann ebenfalls null werden muss. Und die Luft-Flussdichte natürlich auch, wegen $B = \mu \cdot H$. Die unmittelbare Umgebung der (seitlichen) Begrenzungsfläche ist folglich näherungsweise magnetfeldfrei. Die quantitative Größe der Flussdichte zeigt sich in Abbildungen wie Abb. 4.28 im Abstand benachbarter **Feldlinien**: Je dichter diese verlaufen, desto größer ist B . Da als Umgebung des Ferromagnetikums in Abb. 4.28 Luft angenommen wird, gehört zu Bereichen großer Flussdichte (über und unter dem Viereck) auch eine große Magnetfeldstärke, und entsprechend zu den Bereichen seitlich des Vierecks eine relativ kleine Flussdichte und Feldstärke. Welche bildliche Feldliniendichte (Linien pro Zentimeter) man nun einer bestimmten Flussdichte zuordnet, ist willkürlich, und von Liniendicke, Druckqualität und der Winkelauflösung durchschnittlicher Augen abhängig. Mit nur 1 Linie pro cm verschenkt man u.U. Platz, mit 100 Linien/cm überfordert man Drucker und Betrachter. Skalierungshinweise im Bild (z.B. 10 Linien/cm $\hat{=}$ 1 T) sind hilfreich, wurden in den Abbildungen aber weggelassen, weil hier nur Relationen interessieren. Zerlegt man die an einer **Materialgrenzschicht** (Wand) herrschenden Feldvektoren in je eine wandparallele (tangente) und je eine wandnormale Komponente, so gilt:

Sowohl die wandparallele Feldstärke als auch die wandnormale Flussdichte sind immer stetig. Unterscheiden sich die Permeabilitäten diesseits und jenseits der Wand, sind die wandnormale Feldstärke und die wandparallele Flussdichte unstetig.

Im allgemeinen Fall, d.h. bei unterschiedlicher Permeabilität, verläuft die Feldlinie geknickt durch die Materialgrenzschicht – sie wird wie ein Lichtstrahl gebrochen. Je mehr sich die Permeabilitäten der beiden Materialien unterscheiden, desto stärker der Knick. Für die Winkel zur Grenzflächennormalen (α) und die tangente Flussdichte B_t gilt:

$$\mu_2 \cdot \tan \alpha_1 = \mu_1 \cdot \tan \alpha_2 \quad \mu_2 \cdot B_{t1} = \mu_1 \cdot B_{t2} \quad \text{Grenzflächenbedingungen [7]}$$

Weil die Permeabilität ferromagnetischer Materialien in der Regel groß ist, treten Feldlinien aus ihnen näherungsweise senkrecht, d.h. wandnormal aus.

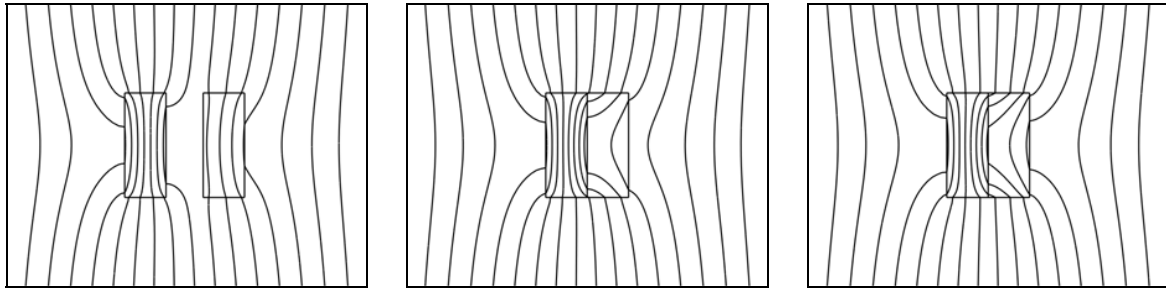


Abb. 4.30: Parallele Magnetleiter; $\mu = 500 / 5$ (links), $\mu = 500 / 5$ (Mitte), $\mu = 500 / 50$ (rechts).

Wie sich zwei Magnetleiter gegenseitig beeinflussen, zeigt **Abb. 4.30**. Bei (in Flussrichtung gesehen) paralleler Anordnung verbiegt jeder Magnetleiter den Flussdichteverlauf nicht nur in der umgebenden Luft, sondern auch im benachbarten Magnetleiter. Das magnetisch besser leitende Material (im Bild links) verringert den Magnetfluss im schwächer leitenden Material, und erzeugt damit eine Art Abschirmung. Bei fluss-serieller Anordnung (**Abb. 4.31**) wirken die Magnetleiter aufeinander flussverstärkend: Das Vorsetzen eines Magnetleiters wirkt wie eine "Sammellinse", die die Magnetlinien bündelt.

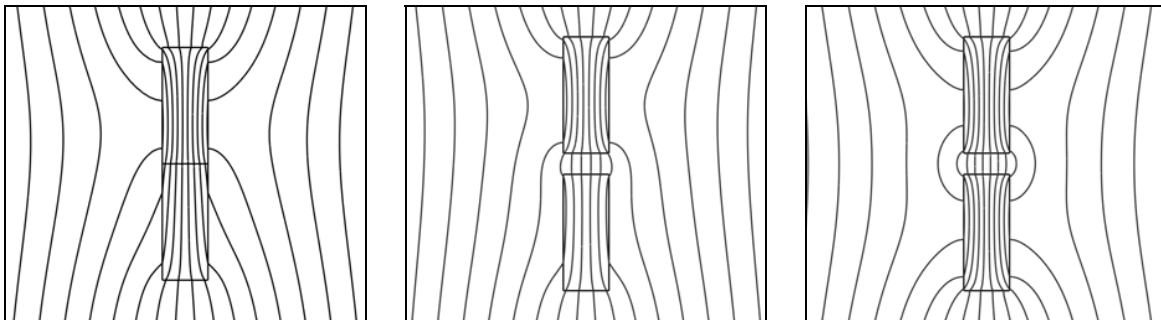


Abb. 4.31: Serielle Magnetleiter; $\mu_{\text{OBEN}} = 500$, $\mu_{\text{UNTEN}} = 5, 5, 5e6$ (v.l.n.r.).

Grenzen zwei Materialien mit guter magnetischer Leitfähigkeit aneinander, ist insbesondere bei fluss-serieller Anordnung dem dazwischenliegenden **Luftspalt** große Aufmerksamkeit zu schenken: Wegen der u.U. großen Permeabilitäts-Unterschiede können schon sehr schmale Spalten zu erheblichen magnetischen Widerständen führen: Bei Schalenkernen müssen Luftspaltmaße von z.B. 0.1 mm auf wenige μm genau eingehalten werden.

Zur Berechnung der Abb. 4.28 – 4.31 wurde die **Permeabilität** konstant angenommen – für einführende Betrachtungen durchaus zulässig. Genaue Analysen erfordern aber genaue Werkstoffparameter, und damit steigt der Rechenaufwand. Zwischen Flussverteilung und Leitfähigkeit besteht ja eine gegenseitige Abhängigkeit: Hohe Leitfähigkeit bewirkt hohe Flussdichte, diese bewirkt aber (über die degressiv gekrümmte Hysteresekurve) ein Abnehmen der Leitfähigkeit, weshalb die Flussdichte doch nicht so groß wird, was wiederum Auswirkungen auf die Leitfähigkeit hat – das ist ein ziemlich kompliziertes verkoppeltes System.

Nichtlineare FEM-Modelle nähern sich diesem Iterationsprozess in mehreren (u.U. sogar ziemlich vielen) Rechenschritten, die einen PC durchaus $\frac{1}{2}$ Stunde beschäftigen können. Oder auch wesentlich länger, je nach Komplexität der Aufgabe und Kapazität des Rechners. Und dann sind nicht alle Materialien magnetisch isotrop. Beim Einkristall ist **Anisotropie** sogar die Regel, nicht die Ausnahme: Wirkt ein Magnetfeld in eine der Vorzugsrichtungen, so ist die zur Magnetisierung aufzubringende Energie geringer als bei Magnetisierung in andere

Richtungen. Räumliche Gleichverteilung der magnetischen Kristall-Orientierungen kann zwar unter makroskopischer Betrachtung isotropes (richtungsunabhängiges) Verhalten ergeben, aber nicht immer sind die Kristall-Orientierungen räumlich gleichverteilt. Bei kornorientierten Alnico-5-Magneten perfektioniert man geradezu eine spezielle **Anisotropie**, bei Polstücken und/oder Saiten kann sie mehr oder weniger unabsichtlich als Nebeneffekt entstehen. Abb. 4.30 hatte schon gezeigt, dass Feldlinien im Material in sehr unterschiedlichen Richtungen verlaufen können. Bei anisotropen Materialien müssten zur FEM-Berechnung dann tensorielle Werkstoffparameter spezifiziert werden – die oft gar nicht genau genug bekannt sind.

Solange – wie in Abb. 4.28 bis 4.31 – ein planparalleles Feld angenommen wird, lässt sich der Rechenaufwand noch einigermaßen in Grenzen halten, weil mit ebenen Gitterelementen gerechnet werden darf. Auch Rotationssymmetrie vereinfacht die Rechnung, aufwändig wird's jedoch beim allgemeinen 3D-Modell. Und genau das wäre erforderlich, um ein Tonabnehmer-Magnetfeld zu berechnen. Alle diese Widrigkeiten (Nichtlinearität, Inhomogenität, Anisotropie) erschweren die Berechnung, sie vereiteln sie aber nicht gänzlich: Der stationäre Fluss kann in durchaus brauchbarer Genauigkeit ermittelt werden. Doch die richtige Herausforderung kommt erst jetzt: Der für die Induktionsspannung wichtige Magnetfluss ist der Wechselfluss, d.h. die zeitliche Änderung des Gleichflusses! Der sich beim Gitarrentonabnehmer um vielleicht 1% ändert! Eine FEM-Berechnung mit "nur" 2% Fehler verliert da schlagartig ihre ursprüngliche Attraktivität.

Soll hingegen nur der grundsätzliche Magnetfluss-Verlauf dargestellt werden, z.B. für qualitative Betrachtungen, sind FEM-Modelle zumeist hilfreiche Werkzeuge. In **Abb. 4.32** ist eine U-förmige Metallschiene im Magnetfeld dargestellt. Eine ähnliche Anordnung findet man beim Humbucker-Tonabnehmer (Kap. 5.2, 5.7), mit dem zentralen Balkenmagnet und den beiden daran angrenzenden Polstücken. Das linke Bild zeigt auf einen Blick, dass es mit der Brummunterdrückung nicht weit her sein kann – auch wenn der gezeichnete Magnetfluss die Verhältnisse quantitativ vielleicht nicht mit besonderer Präzision darstellt.

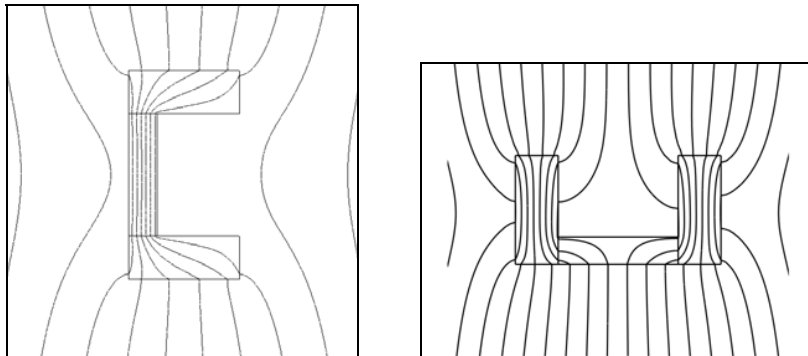


Abb. 4.32: U-Schiene.

Es ist kaum möglich, die Magnetflüsse des Gitarren-Tonabnehmers mit hoher Präzision darzustellen. Die Berechnung ist sehr aufwändig, weil ein nichtlineares, inhomogenes, zeitabhängiges und unsymmetrisches Feld vorliegt. Auch die Messung ist schwierig, weil die Abmessungen so klein sind: Der Durchmesser der Diskantsaiten beträgt nur wenige Zehntel Millimeter. Man braucht deshalb schon sehr kleine Hallplatten, die von Mikromanipulatoren auf definierten Bahnen bewegt werden, um die räumliche Ausdehnung der Felder auszumessen. Die in Kap. 5 dargestellten Messungen sind vermutlich die ersten ihrer Art, aber sicher nicht die genauesten. Grundsätzliches Verständnis wird hiermit ermöglicht, die Unterschiede ähnlicher Tonabnehmer erschließen sich daraus aber noch nicht – hierzu wären Messeinrichtungen erforderlich, die den derzeitigen Hochschuletat übersteigen.