

4.11.4 Feldbedingte Dämpfungen

Tonabnehmermagneten wird nachgesagt, sie würden durch ihre Anziehungskräfte das Ausschwingverhalten der Saite stören und das Sustain verschlechtern. Tatsächlich können – wie in Kap. 4.11.3 gezeigt wurde – durch die Magnetfeldsteifigkeit Änderungen bei den Schwingungsparametern auftreten; bei geringem Magnetabstand werden diese Änderungen auch hörbar. Eine (ideale) Feder ist aber nicht in der Lage, aus einem Schwingensystem Wirk-Energie zu entziehen. Drückt man eine ideale Feder (mit positiver Steifigkeit) zusammen, so speichert sie Energie. Beim Entspannen gibt sie diese Energie aber vollständig und verlustfrei zurück. Die Nachrichtentechnik spricht hierbei von **Blindenergie**, im Gegensatz zur **Wirkenergie**, die in einem Reibungswiderstand "verloren geht". Der Terminus "Energieverlust" ist natürlich nicht global zu sehen: Energie kann nicht wirklich verloren gehen, sie wird aber im Fall des Reibwiderstandes irreversibel (d.h. nicht umkehrbar) in Wärme umgewandelt und steht damit dem Schwingensystem nicht mehr zur Verfügung.

Energetische Betrachtungen sind beim Gitarrentonabnehmer allerdings gefährlich und können zu falschen Schlussfolgerungen führen: Der Tonabnehmer wandelt nämlich nicht die Schwingungsenergie der Saite in elektrische Energie, er partizipiert vielmehr von einer Schwingungskomponente. Handelsübliche Magnettonabnehmer reagieren vor allem auf griffbrettnormale Schwingungen; würde ein Magnet die Ebene der Saitenschwingung von griffbrettnormal auf griffbrettparallel drehen, so hätte dies keinen Einfluss auf die Schwingungsenergie – die Tonabnehmer-Ausgangsspannung würde sich aber trotzdem verringern. Glücklicherweise ist diese Drehung aber eher in Gegenrichtung festzustellen (von griffbrettparallel auf griffbrettnormal); in diesem Fall vergrößert der Magnet sogar die Tonabnehmer-Ausgangsspannung, ohne aber die Schwingungsenergie zu vergrößern.

An einer Stelle ist allerdings Wirkleistung vonnöten: Die vom Tonabnehmer gelieferte elektrische Spannung erwärmt die ohmschen Widerstände der elektrischen Beschaltung – und diese Wirkleistung muss der Saitenschwingung entzogen werden, da es sich beim Magnettonabnehmer um einen passiven Wandler handelt [3]. Auch sog. aktive Tonabnehmer sind bezüglich ihres Wandlungsprozesses passiv; lediglich die erste Verstärkerstufe sitzt bei ihnen an einem anderen Ort. Die **ohmschen Widerstände** im elektrischen Tonabnehmer-Lastkreis sind das Volume-Potentiometer, das Tone-Potentiometer, der Verstärker-Eingangswiderstand, und der Wicklungswiderstand. Die Grenzfrequenz der 250-k Ω -50-nF-Reihenschaltung (Tone-Poti) beträgt 13 Hz, für höhere Frequenzen stellt der Kondensator näherungsweise einen Kurzschluss dar. Bei der Standardschaltung liegen die beiden Potentiometer-Widerstände und der Verstärker-Eingangswiderstand somit parallel, woraus ein Gesamtwiderstand von 100-200 k Ω resultiert. Dazu ist noch der Wicklungswiderstand (4-15 k Ω) zu addieren. Im Bereich der Tonabnehmer/Kabel-Resonanz müsste bei genauer Berechnung noch eine Lasttransformation berücksichtigt werden, die folgende Orientierungsrechnung geht vereinfachend von 100 k Ω aus. Ein Tonabnehmer, der 100 mV erzeugt, produziert nach dieser Berechnung eine Wirkleistung von $P = U^2/R = 0,1 \mu\text{W}$. Das ist sehr wenig, muss aber in Relation zur Saitenenergie gesehen werden.

Die kinetische Energie einer Teilmasse dm beträgt $dmv^2/2$. Hierbei ist v die Geschwindigkeit der Teilmasse. Die maximale **kinetische Energie der Saite** tritt beim Durchgang durch die Ruhelage auf. Integration über die gesamte Saitenlänge (bei sinusförmig ortsabhängiger Geschwindigkeit) liefert $W = mv^2/4$, mit m = Masse der gesamten Saite und v = Geschwindigkeit im Nulldurchgang.

Ein typischer Stratocaster-Tonabnehmer erzeugt mit einer 0,66-mm-Massivsaite (bei 2 mm Magnet-Abstand) eine Effektivspannung von $U = v \cdot 0,186 \text{ V}$; die Geschwindigkeit v ist als Effektivwert in m/s einzusetzen. Jedoch ist nicht die Geschwindigkeit aus der Energieformel gemeint, sondern die Geschwindigkeit der Saite *über* dem Tonabnehmer. Bei einer Schwingung in der Grundmode liegt das Maximum der Geschwindigkeit in Saitenmitte (12. Bund); über dem Halstonabnehmers ist v nur ca. 0,69 mal so groß. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass in der Energieformel die *Amplitude* der Geschwindigkeit steht, während für die Spannungsberechnung der *Effektivwert* der Geschwindigkeit benötigt wird. Hieraus ergeben sich mechanische Energie W und elektrische Leistung P zu:

$$W_{\text{mech}} = \frac{1}{4} m \hat{v}^2 \quad P_{\text{el}} = \frac{U^2}{R} = \frac{(0,186 \cdot 0,69 \cdot \tilde{v})^2}{100 \text{ k}\Omega} \quad \frac{P_{\text{el}}}{W_{\text{mech}}} = \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{m} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Die Leistung P ist der Quotient aus Energieverlust dW und Dauer dt (Leistung ist Energie pro Zeit), der relative Energieverlust ist somit $dW/W = P dt/W$. Mit der Saitenmasse 1,78g berechnet sich der relative Energieverlust pro Sekunde zu 0,019 %. Das zeitbezogene Dämpfungsmaß, die **Decayrate** D , ergibt sich damit zu:

$$D = 10 \lg \frac{W}{W - \Delta W} \frac{\text{dB}}{\text{s}} = -10 \lg(1 - \Delta W/W) \frac{\text{dB}}{\text{s}} \approx \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{\Delta W}{W} \frac{\text{dB}}{\text{s}} = 4,34 \frac{\Delta W}{W} \frac{\text{dB}}{\text{s}} \quad *$$

ΔW ist hierbei der Energieverlust über 1 s, der sich zu $P \cdot 1 \text{ s}$ berechnet. Mit der o.a. Saite erhält man eine Decayrate von 0,0008 dB/s. Dies ist der Pegelverlust, der sich aus der elektrischen Bedämpfung ergibt. Selbst wenn man viel effizientere Tonabnehmer mit z.B. zehnmal so großem Übertragungskoeffizient annimmt, ist dieser Effekt immer noch minimal und im Vergleich zu anderen Dämpfungsmechanismen sicher zu vernachlässigen.

Damit scheinen sich einfache Verhältnisse zu ergeben: Das Magnetfeld wirkt vor allem auf die tiefen Harmonischen als Feder, die elektrischen Verluste sind vernachlässigbar. Ganz so einfach ist's aber doch nicht. Die Probleme beginnen schon bei der **Messung der Abklingkurven**. Es ist relativ einfach, geeignete DFT-Fenster zu wählen, die eine genügend schnelle und selektive Messung einzelner Harmonischer ermöglichen. Bei den meisten Messungen mit der CORTEX-Software *Viper* erwies sich das 50-dB-Kaiser-Bessel-Fenster mit $N = 4096$ und Zero-Padding = 2 als gut geeignet. Die Abklingkurven der Teiltonpegel sind aber häufig gekrümmt und erschweren dadurch eine Modellierung. In **Abb. 4.55** sind Pegelverläufe für die E₂-Saite dargestellt, gemessen ohne und mit Magnetfeld. Wie will man hier das Abklingen (das Sustain) mit einer Zahl quantisieren? Als Pegeländerung während der ersten Sekunde? Jedes Zeitintervall erscheint hierbei willkürlich. Dem Gitarrist wird es ziemlich egal sein, nach welcher Funktion der Pegel abfällt, für die Ursachenforschung spielt es aber schon eine Rolle, ob der Pegelabfall durch Dissipation oder durch Austausch von Schwingungsenergie zustande kommt. Im Fall relativ schneller Schwebungen (rechtes Bild) ist es noch einfach, aus den Maxima eine zeitliche Hüllkurve zu ermitteln. Falls die Schwebungsperiode aber 10 s oder noch länger dauert, kann die Messung unmöglich werden: Bis das nächste Schwebungsmaximum erreicht ist, hat die Schwingung wegen anderer Dämpfungsmechanismen u.U. zu stark abgenommen. Es ist auch nicht sonderlich praxisnah, aus einem 30-sekündigen Pegelabfall Mittelwerte zu extrahieren, da in der Musik Töne selten so lange ausgehalten werden. Na gut, *A day in the life*. Aber das war ein Tag! Und keine Gitarre, sondern ein Klavier!

* Näherung für $\Delta W \ll W$

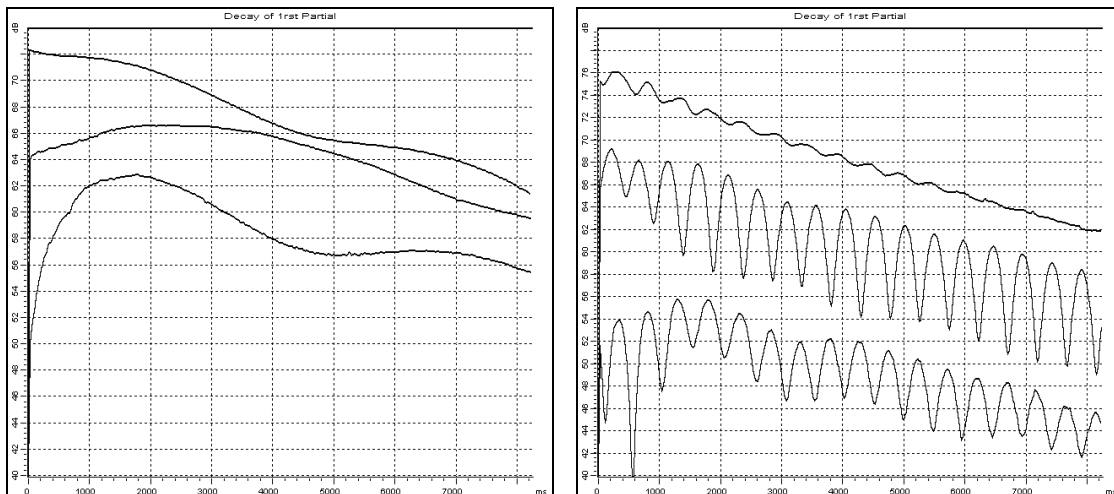


Abb. 4.55: Abklingen des Grundtonpegels der E₂-Saite nach unterschiedlicher Anregung; ohne Magnetfeld (links), mit Magnetfeld (rechts).

Da aber in Gitarristenkreisen immer wieder darüber diskutiert wird, ob und wie der Tonabnehmermagnet die Saitenschwingung bedämpft (und das Sustain verkürzt), soll doch noch ein Versuch zur Klärung unternommen werden. Hierzu wurde die Gitarre (Ovation EA-68) am Gurtpin aufgehängt und die E₂-Saite (Fender 3150) mit einem Pendel reproduzierbar angeschlagen. In einer Brücke über dem letzten Bund konnte ein Alnico-5-Magnet in unterschiedlichem Abstand über der Saite montiert werden. Gemessen wurde das vom Piezo-Tonabnehmer erzeugte Signal (**Abb. 4.56**). Bei der 1. Harmonischen verursacht der 2,5 mm entfernte Magnet nur eine geringfügige Pegelreduktion, die kaum auffällt. Bei geringerem Magnetabstand ist der Pegelverlust erheblich. Bei der 2. Harmonischen liegt ohne Magnetfeld eine starke Schwebung vor; ein schwaches Magnetfeld (b) erhöht den Pegel, ein starkes Magnetfeld (c, d) führt zu einem deutlichen Pegelverlust. Fast das gegenteilige Verhalten zeigt die 3. Harmonische: Hier kommt es im schwachen Magnetfeld (b) zu starken Schwebungen. Die Unterschiede bei den restlichen Harmonischen sind so gering, dass sie in der Größenordnung der Reproduziergenauigkeit liegen.

Aus diesen Messungen kann nur gefolgert werden, dass das Magnetfeld das Ausklingen der Teiltöne *verändert*; lediglich bei den ersten beiden Harmonischen ist der Begriff *Dissipation* bedingt gerechtfertigt – ihnen wird durch das Magnetfeld tatsächlich im wesentlichen Umfang Schwingungsenergie entzogen. Wobei aber zu berücksichtigen ist, dass in der Praxis der Hals-tonabnehmer-Magnet niemals auf 1 mm an die Saite angenähert wird: Die Saite würde sonst auf den Magnet aufschlagen. Die **geringen Abstände** wurden für die Messungen gewählt, um einen deutlichen Effekt zu erzeugen. Erst in dieser untypischen Situation zeigen sich eindeutige Dissipationseffekte (Abb. 4.56 links oben, Kurve c und d). Während der ersten Sekunden fällt der Grundtonpegel viel schneller als im späteren Verlauf. Dass die Schwingungsfrequenz mit 4 Hz höher ist als bei Kurve b, liegt an der größeren negativen Feldsteifigkeit, die zu größeren Verstimmungen führt. Die zeitabhängige Steigung der Hüllkurve muss auf einen nichtlinearen Dissipationseffekt zurückgeführt werden, also auf eine aussteuerungsabhängige Dämpfung. Möglicherweise handelt es sich hierbei um **Ummagnetisierungsverluste** in der Saite. Da die Feldstärke vor dem Magnetpol stark inhomogen (ortsabhängig) ist, ändern sich in der Saite beim Ausschwingen Feldstärke und Flussdichte. Die hierbei in der Mikrostruktur auftretenden Umorientierungsvorgänge sind teilweise irreversibel.

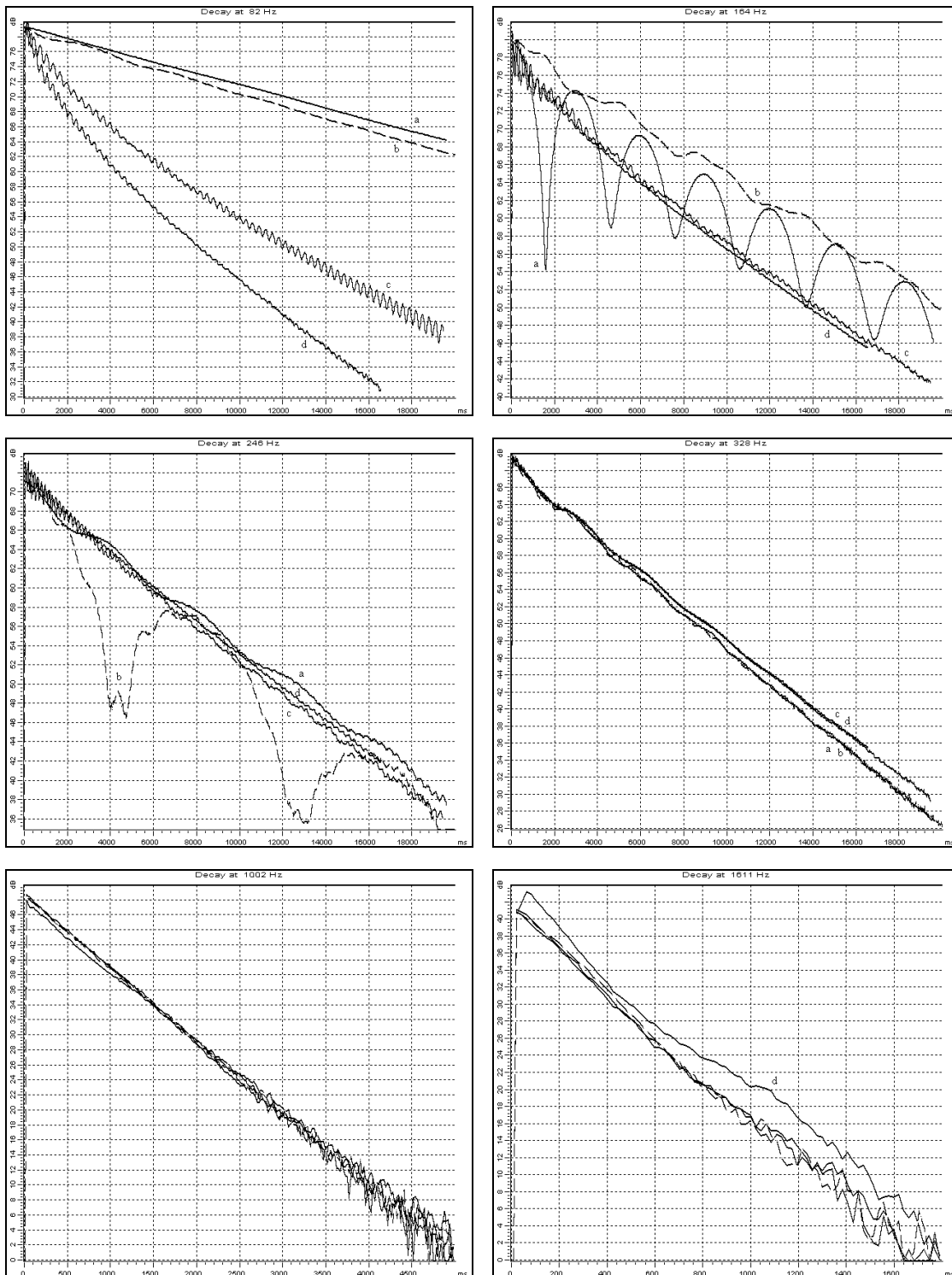


Abb. 4.56: Abklingen der Teiltonpegel der E2-Saite nach untereinander vergleichbarer griffbrettnormaler Anregung. Ohne Magnetfeld (a), Magnetabstand 2,5 mm (b, gestrichelt), Magnetabstand 1 mm (c), Magnetabstand 0,8 mm (d). Der höhere d-Pegelverlauf bei 1611 Hz ist auf eine geringfügig andersartige Anregung zurückzuführen, die sich nur hochfrequent auswirkt. Die Ergebnisse sind typisch für die untersuchte Gitarre, ihre spezifische Aufhängung und Anregung; sie dürfen nicht für andere Gitarren verallgemeinert werden.

Ummagnetisierungsverluste sind in erster Näherung frequenzproportional. Bei jedem Umlauf auf der BH -Hystereseschleife verliert das Magnetfeld die Energie ΔW ; je höher die Frequenz, desto mehr Umläufe pro Sekunde, desto größer die Verlustleistung. Bei der Saite ist allerdings zu berücksichtigen, dass höherfrequente Teiltöne schon durch andere Mechanismen stärker bedämpft werden, und dass die Stärke der Magnetflussänderung von der Auslenkung abhängt. Die Auslenkung nimmt zu hohen Frequenzen hin aber ab. Die unteren Bilder in Abb. 4.56 zeigen deutlich, dass das Magnetfeld im hochfrequenten Bereich keine Auswirkungen hat. Auch bei tiefen Teiltönen sollte man die feldbedingten Dissipationen nicht überschätzen. Zum Vergleich ist abschließend nochmals der Einfluss der **Greifhand** auf das Ausklingen der Teiltöne dargestellt (Abb. 4.57, linkes Bild). Die oberste Kurve zeigt eine Messung, bei der die Gitarre mit einem Stahldraht am Gurtpin aufgehängt war, bei den beiden darunter liegenden Kurven war die Gitarre am Gurtpin festgeklemmt. Bei den restlichen zwei Messungen umschloss die Greifhand unterschiedlich stark den Gitarrenhals, ohne die Saiten zu berühren. Alle Messungen erfolgten ohne Magnetfeld. Man sieht, dass bereits ohne Magnetfeld eine unterschiedliche Dissipation entsteht – der am Gitarrenhals anliegende **Handballen** ist als resistiver Dämpfungswiderstand zu interpretieren. Sein energetischer (!) Einfluss auf das Sustain ist wesentlich größer als der eines üblichen Tonabnehmer-Magnetfeldes (rechtes Bild).

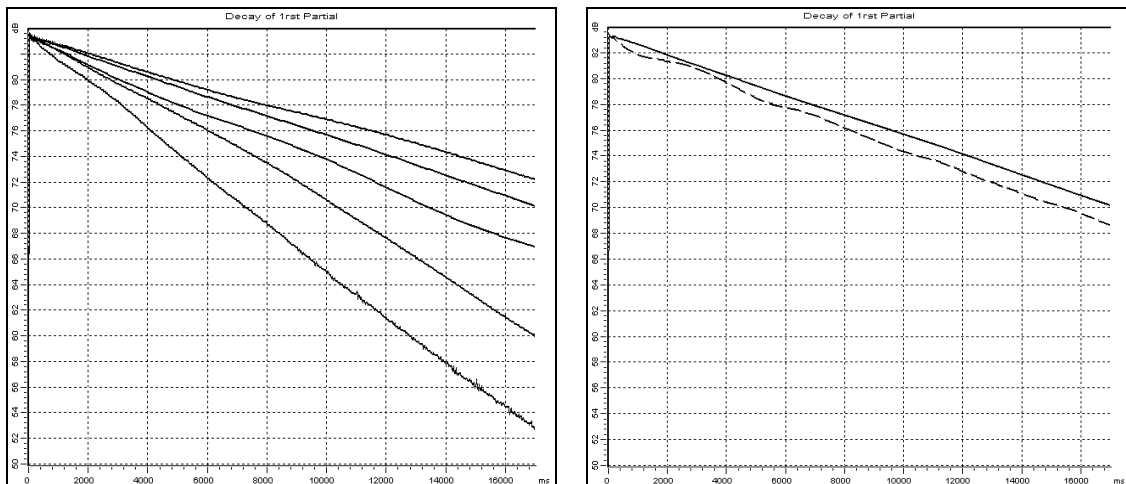


Abb. 4.57: Abfall des Grundtonpegels bei unterschiedlicher Handdämpfung (links). Rechts ist mit gleicher Skalierung der Einfluss eines in 2,5 mm Abstand befestigten Alnico-5-Magneten dargestellt (Halsposition).

4.11.5 Indirekte Auswirkungen auf den Klang

In Musiker-Fachzeitschriften werden Magneteigenschaften häufig ohne physikalische Begründungen veröffentlicht. Es ist zu befürchten, dass die im Folgenden zitierten Zusammenhänge reine Vermutungen sind, die wahrscheinlich beim Austauschen eines *kompletten* Tonabnehmers gewonnen wurden. Wobei man froh sein muss, wenn hierbei der Versuchsleiter nicht auch noch gleich neue Saiten aufgezogen hat (... der neue Pickup bringt viel mehr Höhen ...). So ist es z.B. bei einem alten Stratocaster-Tonabnehmer unmöglich, *nur* die Magnete auszutauschen. Die Wicklung liegt nämlich direkt auf den Magneten auf; sobald man diese herauszieht, zerstört man den haardünnen Wicklungsdraht. Wenn aber der ganze Tonabnehmer gegen einen anderen ausgetauscht wird, ändert sich hierbei u.U. auch die Windungszahl – dann wäre es falsch, Klangänderungen nur dem Magnetmaterial zuzuschreiben.