

# Die Elektrik der Fender Stratocaster, Teil 2

*Von Bernd C. Meiser*

Haben wir uns in der vergangenen Folge über die elektrischen Parameter des Fender Stratocaster Pickups informiert, sollten wir heute noch schnell einen kleinen Exkurs auf die eher unbekanntere magnetische Seite des Strat Pickups wagen, denn auch hier wird bestimmt, wie höhenreich das von den Saiten angebotene Frequenzspektrum in elektrische Signale gewandelt wird.

## Apertur

Auch ohne Studium der Physik erscheint es logisch, dass die Gitarrensaite irgendwie oberhalb des Pickups (kurz PU benannt) abgenommen wird. Erkennen kann man das alleine schon daran, dass der Hals-PU einen merklich anderen Klang produziert als der Steg-PU, da an anderer Stelle abgenommen. Dieses Abnehmen des Signals an einer bestimmten Saitenstelle wird auch als Abtasten tituliert. Jetzt schlage ich zweckmäßig einen Bogen zu der alten Tonbandtechnik. Da wissen wohl noch die Älteren unter der Leserschaft, dass die obere Grenzfrequenz des Tonbandapparates direkt (neben anderem) von der Spaltbreite des Tonkopfes abhing. Eine geringere Spaltbreite (übrigens im Mikrometer Bereich) führt zu mehr Höhen. Dieses Abtastverhalten beim Tonband trifft jetzt auch im übertragenen Sinne auf die Saitenabnahme zu. Je schmaler die Abtastbreite bei einem PU ist, umso mehr Höhen kann der PU magnetisch aufnehmen.

Dieser Fakt hat, schnell noch allgemein betrachtet, enorme Bedeutung in der Nachrichtentechnik. Es ist eine eigene mathematische Funktion, die „SI“ oder „Spalt-Funktion“, die auch bis in die Tiefen der digitalen Signalverarbeitung bzw. digitalen Filter hineinführt.

Aber wie groß ist jetzt dieses magnetische Abtastfenster, oft auch Apertur genannt, bei dem Strat PU? Errechnen lässt sich das nicht, man muss diese experimentell im Labor bestimmen. Da hat Prof. Zollner wertvolle Arbeit geleistet. Ich entleihe mir, mit seiner freundlichen Genehmigung, aus seinem Buch „Physik der Elektrogitarre“ die dazu generierte Grafik. Hier sind neben dem Strat PU auch noch andere single-coil Typen gelistet. In der Grafik [Bild 1] ist der PU-Magnet 2mm von der Saite entfernt, in dem [Bild 2] dagegen 4mm.

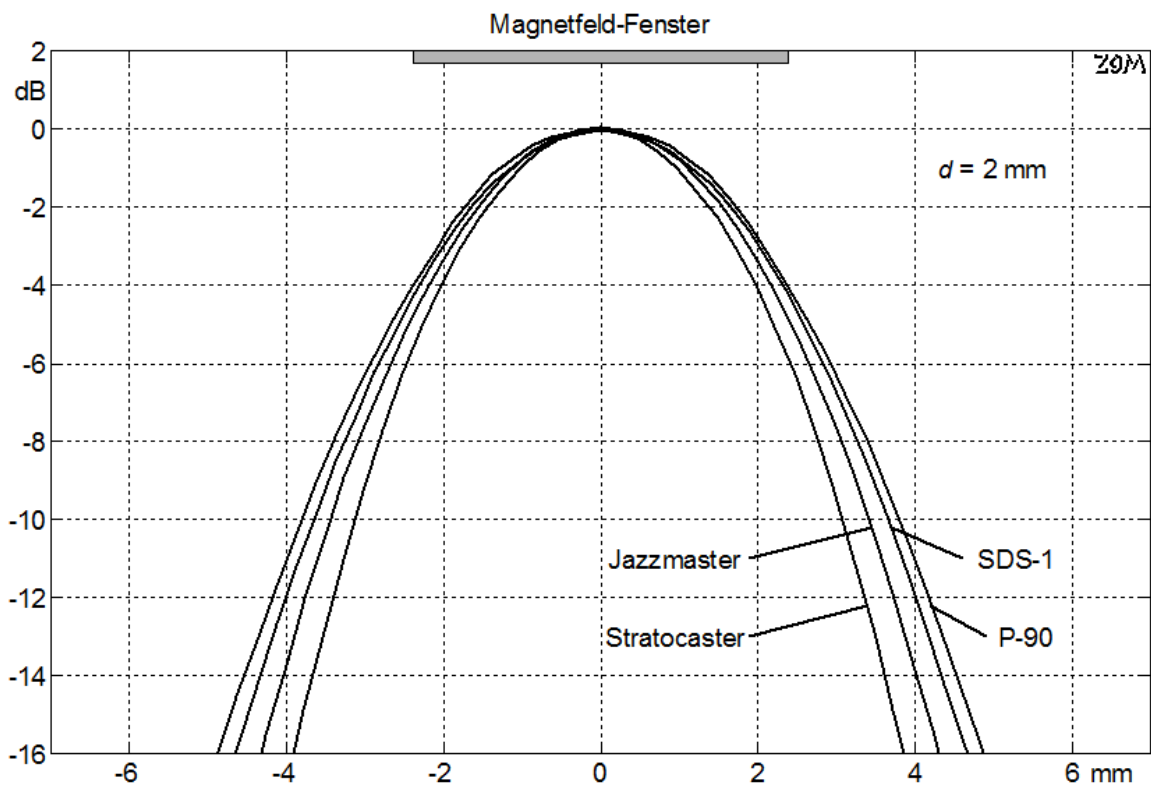


Bild 1

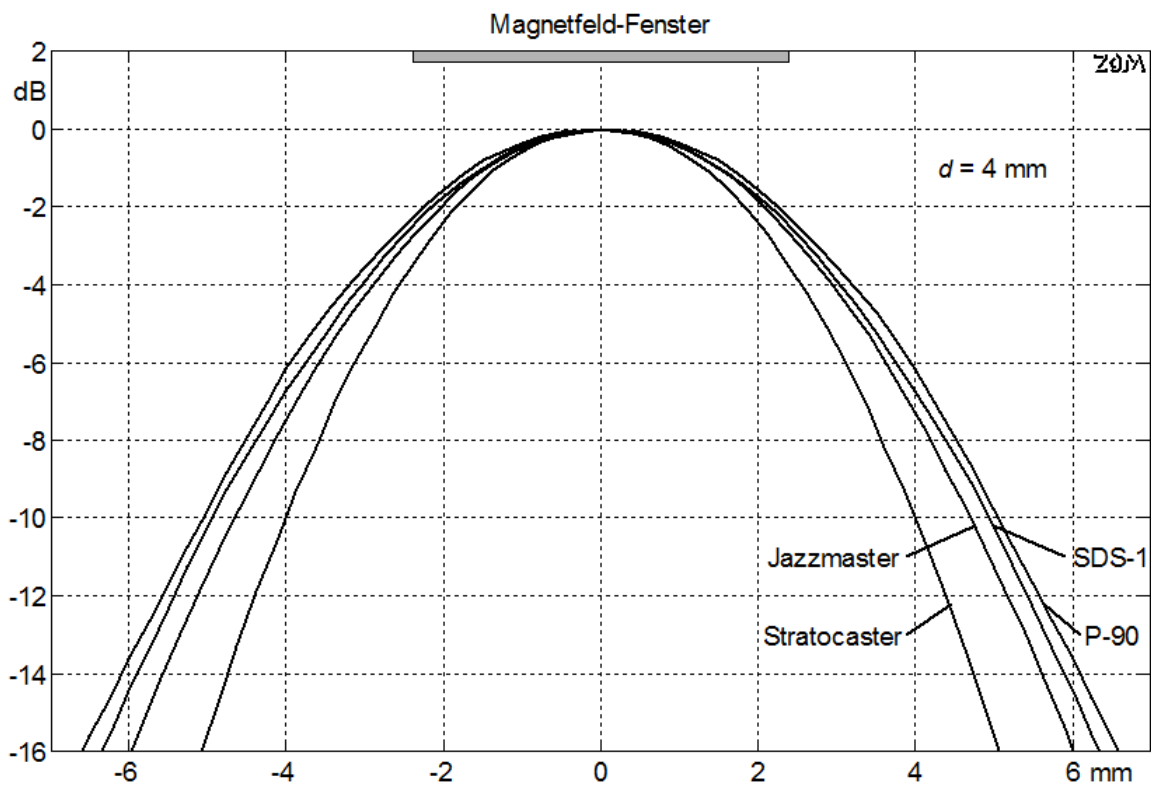
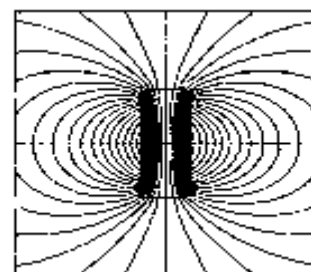


Bild 2

Wir erkennen jetzt: Wenn sich der PU den Saiten nähert, verringert sich seine Apertur. Oder anders ausgedrückt: Ein nahe den Saiten platzierter PU generiert mehr Höhen (und ist, ohne Herleitung, auch lauter & verzerrter). Die Breite der Apertur generiert hier im Mittel final eine obere Grenzfrequenz von etwa 7kHz und liegt damit oberhalb der Betriebsresonanz des Strat PUs mit seinen etwa 3,5 kHz. Dieses Apertur-Verhalten (Grenzfrequenz der Apertur größer als Grenzfrequenz der PU-Betriebsresonanz) lässt sich bei allen gebräuchlichen single-coil PUs feststellen. Dies sieht bei Doppelspul PU Typen (z.B. beim PAF) jedoch ganz anders aus, wie ich in einem Artikel über diesen PU Typ noch erörtern werde.

## Verzerrungen

Alle gebräuchlichen PUs haben ein stark nichtlineares Magnetfeld [Bild 3], welches in den Raum hineinragt, in dem die Saitenschwingung stattfindet. Folglich wird die Magnetfeldänderung einer nichtlinearen Modulation im Takt der Saitenschwingung unterworfen. Es ist auch leicht einzusehen, dass je weiter der PU von den Saiten entfernt ist, das Feld dort schwächer und linearer wird, der Klirr dort also abnimmt.



**Bild 3**

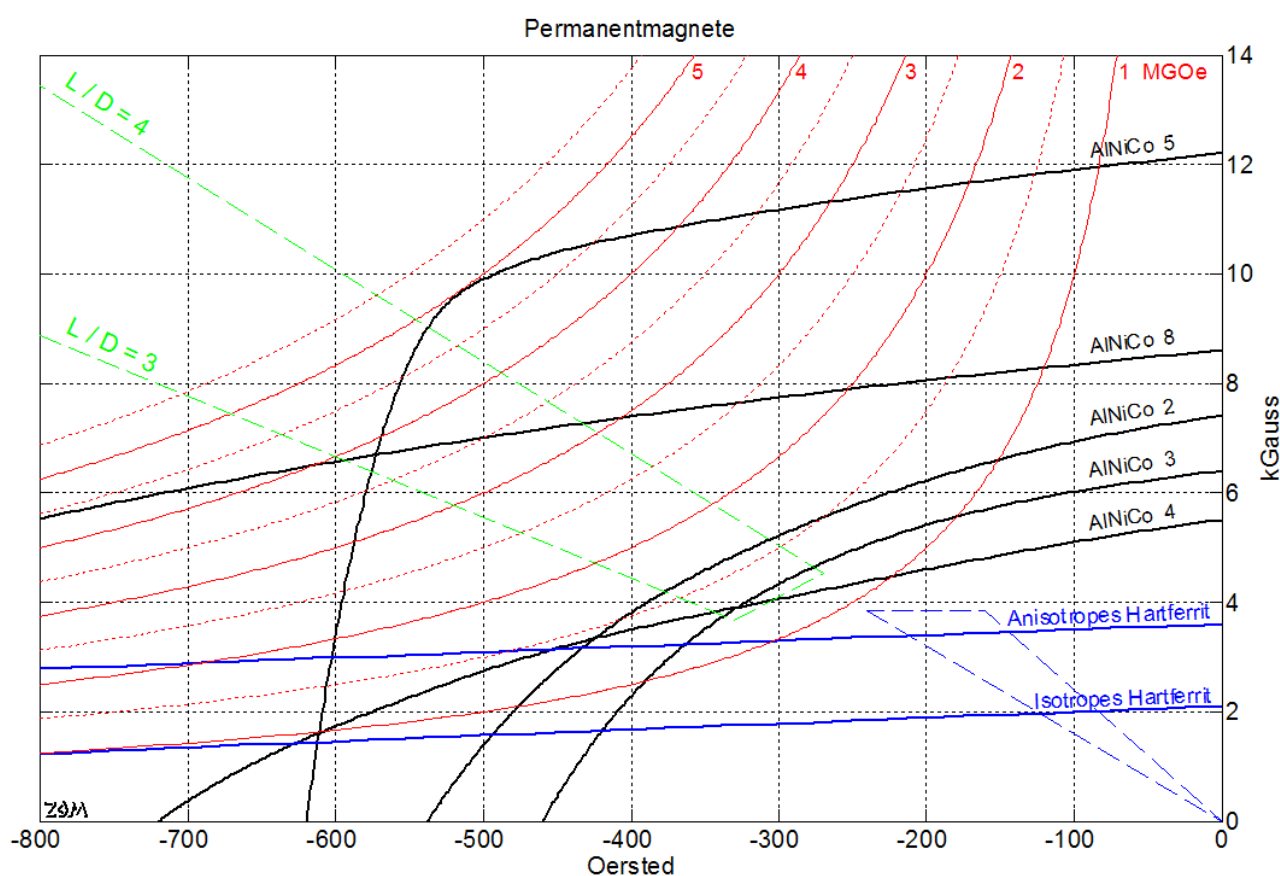
Die Mathematik zur Bestimmung des Klirr ist nicht sonderlich schwer herzuleiten, aber dennoch recht umfangreich. Ich überspringe diese und komme gleich zur Quintessenz daraus. Es existieren zunächst formal alle ganzzahligen Harmonischen im Oberwellenspektrum. In guter Annäherung existiert aber praktisch nur der K2 (aka: Quadratischer Klirrfaktor) mit nennenswerter Größe, der K3 und erst recht die höheren Klirrfaktoren sind kaum ausgeprägt. Der Wert des K2 kann schon mal beim harten Saitenanschlag 10% bei den Bass-Saiten betragen, fällt aber dann schnell mit der geringer werdenden Saitenamplitude ab. Ein solch hoch erscheinender Klirr ist übrigens bei allen magnetischen Gitarren/Bass PUs zu finden. Da hauptsächlich nur die „gutmütige“ K2 in Erscheinung tritt, ist das finale akustische Bewerten glücklicherweise weniger spektakulär als die Zahlenwerte es erscheinen lassen. Zusammen mit dem Grundton, der Größe des K2 und der in der letzten Folge kennengelernten elektrischen Filterung (Betriebsresonanz) bekommt der single-coil PU einen typischen Klang bzw. Sound. Hier beim Fender Stratocaster PU einen höhenreichen, brillanten Ton. Ganz so, wie Leo Fender sich das vorgestellt hatte. Durch andere Bauformen des single-coil PU - siehe z.B. Fender Jazzmaster, Gibson P-90, Rickenbacker Toaster ..., erhält man dann, da andere bauliche Parameter existieren, natürlich auch einen anderen Klang.

Während die elektrischen Parameter noch recht einfach (und mit preiswertem Mess-Equipment) zu ermitteln sind, insbesondere der Spulen-Gleichstromwiderstand DCR sowie die Spulen-Induktivität L, sind die magnetischen Parameter z.T. nur sehr schwer

ermittelbar. Das gelingt nur unter erheblich aufwendigen Laborbedingungen mit feinstem (Hochschul-) Mess-Equipment mit ihren astronomisch hohen Beschaffungskosten. Eine vorbildliche, sehr tiefgehende Laborarbeit leistete hier der mittlerweile emeritierte Prof. Dr.-Ing. Manfred Zollner (TH Regensburg).

## AlNiCo Magnete

Über die allgemeinen AlNiCo Zylindermagnete (Bestandteile hauptsächlich: Aluminium / Nickel / Kobalt + Eisen) ließe sich bezüglich ihrer Untergruppen sehr viel sagen, z.B. AlNiCo<sub>2</sub> (häufig auch kurz A2 genannt) oder AlNiCo<sub>5</sub> (kurz A5). Es führt aber leider schon vom Ansatz her schnell in ein für den physikalisch Ungeübten undurchsichtiges magnetisches Dickicht. Aber trotzdem ein paar einfache einführende Worte bezüglich dieser Thematik.



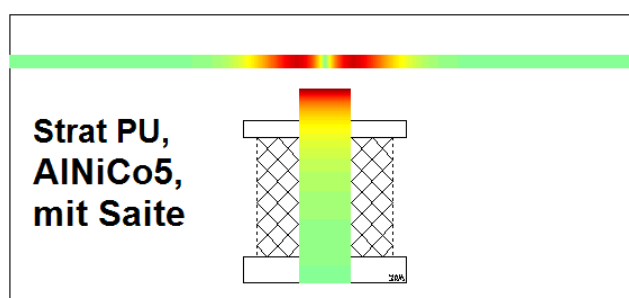
**Bild 4**

Die klassisch-historische Einordnung der AlNiCo-Klassen – siehe [Bild 4], geschieht über ihren Energieinhalt. Zumindest war das so angedacht. Leider gibt es hier aber einige Ausnahmen. Wenigstens bei den uns interessierenden Gruppen stimmt das Gesagte. D.h. die Gruppe „2“ hat einen geringeren Energieinhalt als die der Gruppe „5“. Der Energieinhalt eines Magneten hat übrigens nur mittelbar etwas mit seiner Magnetstärke (aka

Flussdichte) zu tun und darf begrifflich nicht verwechselt werden. Es ist erwähnenswert, dass große Schwankungen innerhalb einer AlNiCo Gruppe existieren, da ein jeder Produzent da seine eigenen Fertigungsprozeduren anwendet.

Es zeigt sich, dass das schwächere AlNiCo2 eine größere reversible Permeabilität (bedeutet: magnetische Leitfähigkeit) besitzt als der kräftigere AlNiCo5 Typ. Dies bedeutet für den magnetischen Kreis des Strat PU, dass ein mit A2 bestückter PU eine leicht größere Induktivität aufweist. Das hat zur Folge, dass die Betriebs-Resonanzfrequenz gegenüber dem A5 Kreis, bei gleicher Windungszahl sowie sonstiger gleicher Spulengeometrie, leicht geringer ist. Auch die magnetische Dämpfung des A2 ist größer gegenüber A5. Im elektrischen Ersatzschaltbild des PU erscheint demzufolge der  $R_m$  kleiner (siehe Teil 1 dieser Artikelserie). Der A2-PU klingt gegenüber dem A5 Typ eher einen Tick „wärmer“ - siehe Tabelle in letzter Folge. Auch hat der A5 Zylindermagnet gegenüber dem A2 ein etwas kleineres Aperturfenster, so dass besonders die Basssaiten mit A5-Magneten tendenziell einen Tick brillanter klingen.

Aufgrund der verschiedenen unterschiedlichen Permeabilitäten zwischen den beiden Magnettypen entsteht auch ein leicht anderes Magnetfeld. Ursache dafür ist der veränderte Brechungsindex an der Grenzfläche Magnet / Luft, mit der Folge einer leicht anderen Feldkrümmung im Raum des aus dem Magneten austretenden Feldes. Demzufolge sind auch die Klirrwerte etwas verschieden. Die bis jetzt getätigten Aussagen in diesem Unterkapitel beziehen sich auf den PU ohne Saiten – also quasi im magnetischen „Leerlauf“. Werden die Metallsaiten, welche ja aus magnetisch leitendem Material bestehen, in üblicher Weise in den PU Kreis eingebracht [Bild 5], wird das dann entstehende Feld zwischen Magnet-Oberkante und den Saiten, sich zwischen den unterschiedlichen Magnetmaterialien zunehmend ähnlicher. Je geringer der Abstand Saite-Magnet wird, desto ähnlicher die Feldgeometrie an diesem Ort zwischen A2 und A5.

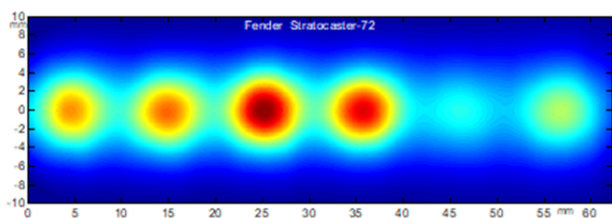


**Bild 5**

Ob die dann noch bestehenden kleinsten Unterschiede allerdings im Band-Live-Kontext akustisch noch zu unterscheiden sind, sei mal dahin gestellt bzw. darf wirklich bezweifelt werden. Entsprechend vorsichtig sollte man da bei der Bewertung respektive Bewertung der verschiedenen AlNiCo Materialien beim Strat PU Typ mit seinen Zylindermagneten sein. Denn nicht alles, was physikalisch an kleinen Abweichungen messbar ist, muss auch zwingend akustisch hörbar sein.

## Magnet-Array

Die sechs in Reihe angeordneten AlNiCo Zylindermagnete, welche direkt von der Wicklung umgeben sind, stecken fest in den Vulkanfiberplatten und lassen sich nicht verschieben. Damit die Saiten, die wegen der unterschiedlichen Dicken auch etwas unterschiedlich laut abgenommen werden, elektrisch alle in etwa gleichlaut klingen, hat Leo Fender als magnetischen Ausgleich dazu die Magnete unterschiedlich lang gewählt. Ein etwas längerer Zylinder AlNiCo5 Magnet ist, ohne Herleitung, auch etwas stärker [Bild 6]. Da zum Zeitpunkt der Strat PU-Konstruktion (1954) die verwendeten Saitensätze, im Gegensatz zu heute, noch eine umspinnene G3 Saite besaßen, hat der umsichtige Fender diesem Umstand natürlich Rechnung getragen und den G-Magneten mit gleicher Länge gewählt wie den langen D-Magneten. Bei den heute üblichen Saitensätzen für den Rock-Gitarristen ist die G-Saite jedoch ein nicht umwickelter Typ, welcher magnetisch lauter ist als der umspinnene Typ. Sein zugehöriger Magnet müsste also kürzer ausfallen, etwa so wie der kurze H-Magnet. Trotzdem blieb der lange G-Magnet in der Neuzeit erhalten. Die G-Saite erscheint auf dem Strat PU dann, typisch Fender Stratocaster eben, etwas lauter als in einem ausbalancierten Magnet-Array, welches heutzutage von einigen Pick-up-Produzenten alternativ angeboten wird. Insbesondere ist im [Bild 6 rechts] zu erkennen, in welcher Stärke die Flussdichte auf der Zylinder-Oberseite auftritt. Tatsächlich ist dann der G3 Magnet, im Verhältnis zu den Verbleibenden, recht stark. Am stärksten wäre der D4, am schwächsten der H2 zu benennen.



Fender Stratocaster, Zylindermagnete unterschiedlicher Länge

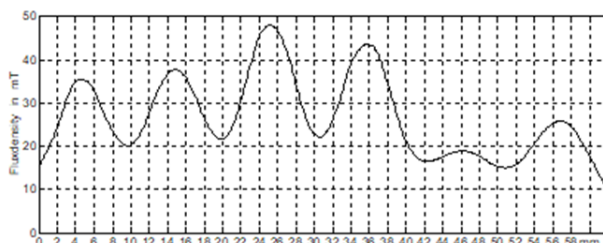
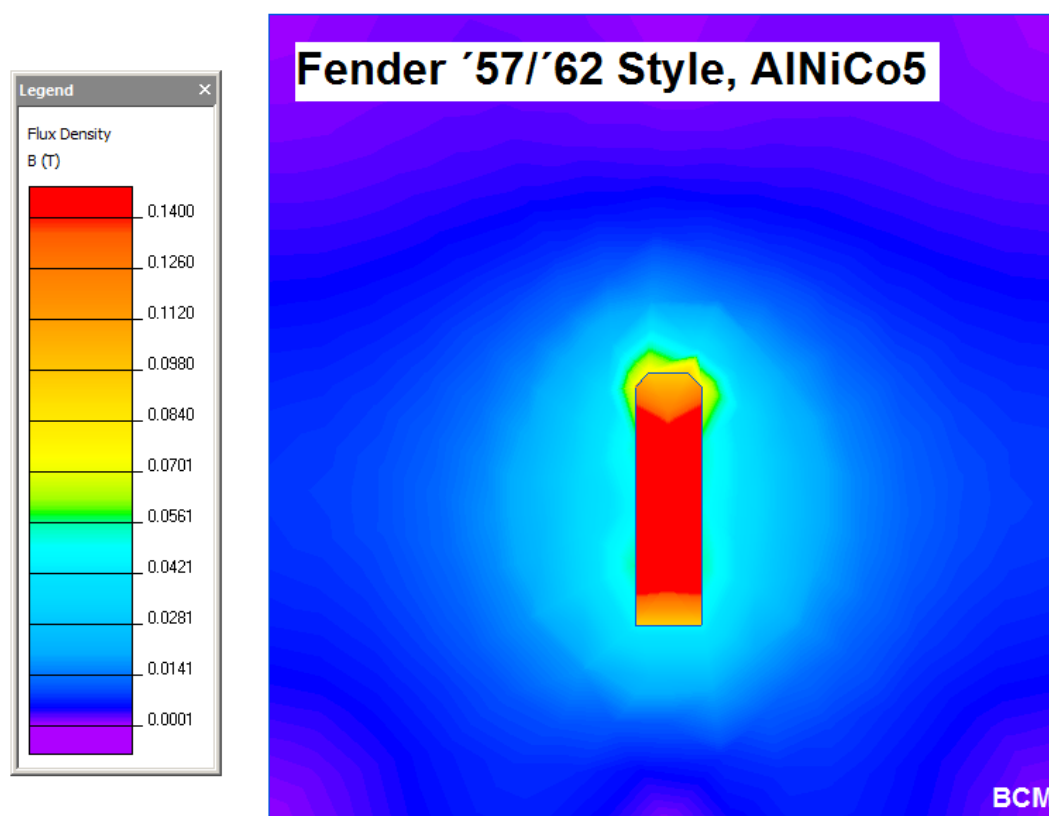


Bild 6

## Der Einzelmagnet

Jetzt schnell noch einen Abstecher zu dem eigentlichen singulären Zylindermagnet. Der „perfekte magnetische Dipol“ aus AlNiCo Material, eingebettet in ein nichtmagnetisches, homogenes Medium z.B. Luft, wäre bezüglich Flussdichte (und anderem) ein Rotationsellipsoid, was sich mathematisch herleiten lässt. Allerdings ist diese Form nicht nur für die meisten Anwendungen sehr unzuweckmäßig, sondern schon gar nicht kostengünstig und schnell zu fertigen. Ein langer Zylinder mit Länge/Durchmesser (L/D) Verhältnis  $>5$  ist aber schon eine akzeptable Annäherung an diese theoretische Idealform.





**Bild 7**

Bei dem „Anfasen“, also Abschrägen (beveled), der im Übrigen sehr spröden AlNiCo Zylinderkanten - siehe [Bild 7], wird sich aus magnetischer Sicht die Annäherung an das theoretische Ideal nochmals merklich verbessern. D.h. bei gleichem L/D Verhältnis - also auch in etwa gleichem Magnetvolumen ergibt sich jetzt eine merkliche Steigerung der Flussdichte (übrigens mit etwas anders gestalteter Feldkrümmung im Raum, sprich: etwas anderem Klirrfaktor) an der angefasen Seite des Magnetpols. Vergleiche Oberseite mit Unterseite in besagter Grafik. Insbesondere der single-coil Fender 57/62 PU-Typ [Bild 8], welcher z.B. in der Fender „Rory Gallagher Signature“ Strat verbaut war, weist standardmäßig eine solch starke Anfasung der oberen Zylinderkanten auf. Leo Fender hat übrigens das Anfasen der Zylinderkanten um 1960 herum nicht aus magnetischem Optimierungsgedanken heraus eingeführt (davon wusste er nichts), sondern die so bearbeiteten spröden & teuren Magnete ließen sich einfach besser durch die Vulkanfiberplatten hämmern, ohne dass die Kanten abplatzten. Fender war da sehr pragmatisch orientiert.



**Bild 8**

## Magnet-Alterung

Eine natürliche Alterung (Selbstentladung) im ursprünglichen Sinn spielt bei den statischen Magnetdaten der AlNiCo-Magnete im Strat-PU keine wirklich große Rolle (siehe weiter unten) und sollte nicht mit der Prozedur der sog. „künstlichen Alterung“ verwechselt werden. Diese wird oft bewusst nach dem erstmaligen Aufmagnetisieren angewendet, um einige magnetische Eigenschaften bzw. den magnetischen Arbeitspunkt zu stabilisieren.

Insbesondere bei AlNiCo Magneten mit einem L/D Verhältnis  $< 5$ , also bei unseren Strat Zylindermagneten, tritt im Laufe der Jahrzehnte eine sehr leichte Selbstentladung auf und überschreitet bez. der Wahrnehmung ganz sicher ein Gitaristenleben. AlNiCo2 ist hier als empfindlicher anzusehen wegen seiner geringeren Koerzitivfeldstärke. Dabei kann dann durchaus die reversible Permeabilität (aka: Wechselfeld-Verhalten der magnetischen Leitfähigkeit) des Magneten etwas zunehmen, so dass die Spuleninduktivität  $L$  ansteigt, mit der Folge einer leichten Verminderung der Betriebs-Resonanzfrequenz des PU. Der Ton des Pickup wird dadurch formal einen Tick runder & mittiger/fetter, so man dies dann wahrnehmen sollte.

Die Magnetstärke (aka: Flussdichte) kann aber aus den unterschiedlichsten Gründen, z.B. Abmagnetisierung durch starke Fremdfelder, etwas zurückgehen, denn gerade der Werkstoff AlNiCo5 bzw. AlNiCo2 ist gegen Fremdfelder nicht sehr resistent. Damit wird der magnetische Übertragungskoeffizient etwas geringer. Das bedeutet, dass die dem geschwächten Magnet zugeordnete Saite zunächst einmal leiser wird. Es verändert sich dann auch leicht der Wert des Parameters  $R_m$  (= magnetischer Dämpfungswiderstand, im elektrischen Kreis liegend). Auch lässt sich eine leicht breitere Apertur beim geschwächten Zylindermagneten gegenüber dem voll aufmagnetisierten feststellen. Dieses Verhalten der Aperturabhängigkeit lässt sich übrigens bei allen AlNiCo Magnet-Untertypen beobachten. Dies alles findet aber am Rande der akustischen Wahrnehmung statt.



## Kupferlackdraht

Im Laufe der Jahrzehnte wurde der 42AWG Draht zum Spulenwickeln mit verschiedenen Isolationslacktypen entsprechend der technologischen Weiterentwicklung versehen, z.B. „plain enamel“, „formvar“ oder „polysol“. Magnetische Differenzen zwischen den Lacktypen sind nicht festzustellen, Differenzen bei deren Dielektrizitätszahlen aber sehr wohl. Dadurch schwankt die PU-Systemkapazität des Pickups ein wenig. Diese wird ja im Betrieb final dem Kabel zugeschaltet und je nach der Kapazität des Kabels wird dann diese Gesamt-Kapazitätsänderung gegebenenfalls auch hörbar, insbesondere bei kurzen Kabeln, da sich hier die Änderung natürlich stärker bemerkbar macht.

Die Lack-Isolationsdicke hingegen beeinflusst geometrisch direkt die Dicke der Wicklung. Wird aber die Wicklung dicker, erhöht sich bei gleicher Windungszahl die Induktivität des PU mit der Folge, dass die Pickup-Betriebsresonanz etwas fällt.

Weiterhin werden die Pickups zwecks Erhöhung der mechanischen Festigkeit und Mikrofonierereduzierung gerne in Wachs getaucht. Wachs ist nicht dielektrisch neutral wie Luft (Faktor 1), sondern liegt höher. Das hat zur Folge, dass die PU-Systemkapazität ansteigt. Gegenüber der alles dominierenden Kabelkapazität sind aber nur geringe Kapazitätsänderungen, respektive Klangveränderungen, zu erwarten.

## Ausblick

Viel Interessantes gäbe es noch zu dem Magnetischen zu sagen. Aber schon das hier mit einfachen Worten vermittelte zeigt, dass da weder Voodoo noch Mystik im Spiel ist. Es ist alles auf der Basis der geltenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten erklärbar. Um sich dabei sicher zurechtzufinden, muss man Zugegebenermaßen schon recht tief in die Sache einsteigen, z.B. mittels Hochschulausbildung. Deswegen sind verständlicherweise auch die üblichen Gitarrenmagazine und/oder Werbeprospekte nicht die passenden Orte, darüber tiefergehend zu diskutieren.

In der kommenden Folge will ich mich dann aber endlich dem Tone-Poti und speziell dem Volume-Poti zuwenden.

Bernd C. Meiser

Dieser Artikel wurde ursprünglich in der Zeitschrift **guitar**, Heft 238 aus dem PPVMedien Verlag veröffentlicht.

Veröffentlichung im GITEC-Forum mit freundlicher Genehmigung.

**Alle Rechte liegen beim Autor**

GITEC hat sich zum Ziel gesetzt, das Wissen (wie in Wissenschaft) rund um E-Gitarre, Amps und alles was dazugehört unter die Menschheit zu bringen. Sozusagen als Gegengewicht zur allgegenwärtigen Voodoo-Magic Marktschreierei. GITEC will die Magie wieder dahin bringen, wo sie hingehört: raus aus der Technik, die wir erklären können, zurück in die Köpfe und Hände der Musiker.

GITEC: Keep the magic - cut the BS

