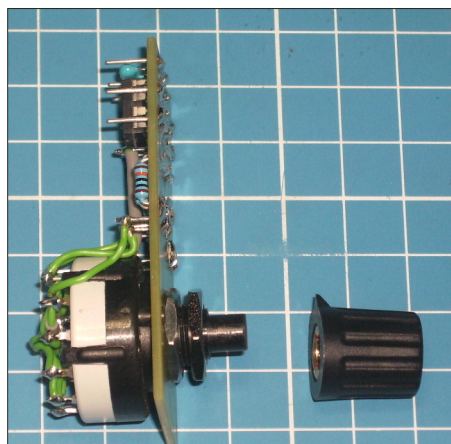
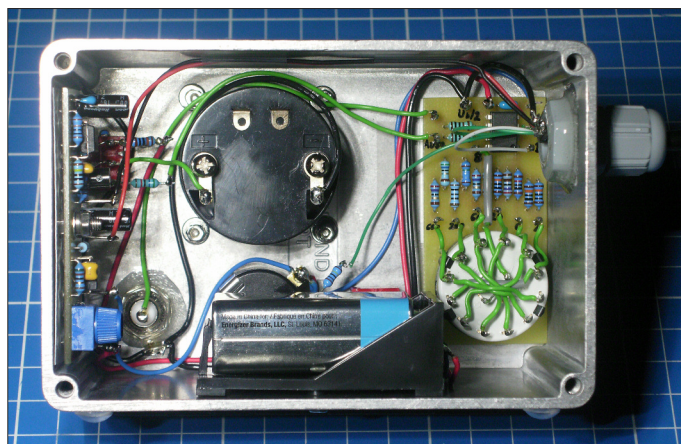


## Ergänzung zum Beitrag in FA 5/18, S. 442 f. „Teslameter für statische und dynamische Magnetfeldmessungen“

Bild 10 zeigt die Differenzverstärkerbaugruppe. Die Kontakte der beiden Ebenen des Drehschalters sind zur Erhöhung der Langzeitkontaktsicherheit parallelgeschaltet. Mit einer zusätzlichen Mutter dient das Gewinde der Achshülse auch zum Anschrauben des Moduls im Gehäuse. Dort ist zuvor ein Isolierstoffplättchen zu befestigen, das den Kontakt der Leiterseite zum Gehäuse verhindert.



**Bild 10:**  
Seitenansicht des  
Verstärkermoduls

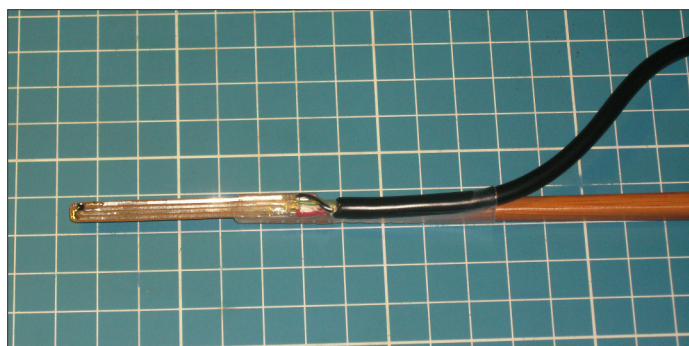


**Bild 11:**  
Blick in das fertig  
verdrahtete Gerät  
Fotos: Franke

Der schmale Platinenstreifen mit dem aufgelöteten Hallensensor (siehe Bild 5 des Beitrags) wird über einvieradriges abgeschirmtes Kabel durch die in Bild 11 rechts erkennbare M12-Kabelverschraubung direkt an die Lötösen A, B, C, D der Schaltung angeschlossen. Die Abschirmung verbindet die untere Kupferseite des Platinenstreifens mit Schaltungsmasse. Nach dem Anlöten des Kabels empfiehlt sich das Versiegeln der Streifenoberseite mit einer etwa 0,5 mm di-

ckers mittlerer Öffnung die Messspitze mit dem Hall-Element steckte. Verschieden große vorher aufgeladene Kondensatoren wurden über die Spule entladen, wobei ein 1- $\Omega$ -Reihenwiderstand als Shunt zur Erfassung der Stromstärke fungierte. Der dort abfallende Spannungsverlauf ist in den Oszilloskopaufnahmen jeweils oben in blau dargestellt. Die dazugehörige rote Kurve gibt das Ausgangssignal des Tesla-

sonanzfrequenz aus 1  $\mu$ F und der zuvor unabhängig ermittelten Induktivität der Spule. Der kleine negative Zacken am Beginn der roten Kurve wird größer, wenn die Messspitze tiefer in die Öffnung der Spule eintaucht. Ursache des Effekts ist die unerwünschte Induktion einer Spannungsspitze in der von den beiden mittleren Leiterzügen der Messspitze gebildeten einzelnen Windung.



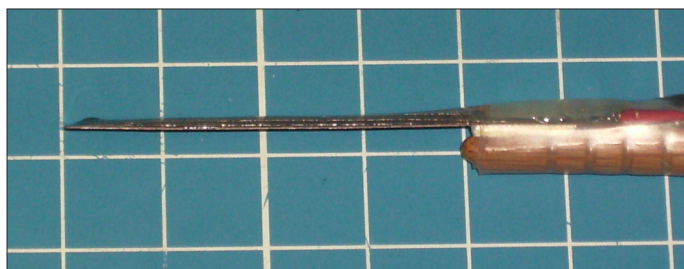
**Bild 12:**  
Einsatzbereite Hall-Sensor-Messspitze; zur bequemen Handhabung dient ein hölzernes Essstäbchen. Ein transparenter Schrumpfschlauch umschließt Kabel, Stäbchen und die hinteren 2 cm des Platinenstreifens.

cken Kleberschicht aus 5-min-Epoxydharz. Das versteift und stabilisiert die Messspitze und verhindert Kurzschlüsse beim Stochern in beengter metallischer Umgebung.

### ■ Messung transients Vorgänge

Hierfür fand die im Beitrag beschriebene Kalibrierzylinderspule Verwendung, in

**Bild 13:**  
Seitenansicht der  
Messspitze; die  
Dicke des Platinen-  
streifens von  
0,3 mm und die des  
Hallensors  
(0,6 mm) addieren  
sich zu knapp  
1 mm.



Für Bild 15 war der Kondensator auf 4,7  $\mu$ F vergrößert. Die jetzt geringere zeitliche Änderung der Magnetflussdichte dB/dt verkleinert erwartungsgemäß die kurze Induktionsspitze. Dass die Schwingung nun bereits nach einer Periode völlig abklingt, passt zu den Aussagen z.B. in [7], denen zufolge die Güte eines Reihenschwingkreises steigt, je kleiner die Kapazität  $C$  und je größer die Induktivität  $L$  ist. In Bild 16 ist die mit Messbereich 5 mT und geänderten Oszilloskopeinstellungen erfasste Entladung eine solch großen Kapazität dargestellt, dass eine Schwingung nicht einmal ansatzweise entsteht und lediglich die RC-Zeitkonstante wirksam wird.

### ■ Messungen an einer Drosselspule

Ein Transformator mit Eisenkern EI54 wurde als Drosselspule mit variablem Luftspalt hergerichtet (Bild 17), mit außen

zwischengelegten Eisenblechen von 1,2 mm oder 5 mm Dicke. Die Eisenweglänge (108 mm Tabellenwert ohne Luftspalt) vergrößert sich also auf 0,1092 m bzw. auf 0,113 m. Auf den Spulenkörper sind 600 Windungen aus 0,42 mm Kupferlackdraht gewickelt.

#### Fall a

Mit 1,2 mm Luftspalt und darin mittig platziertem Hallsensor war ein Magnetfluss von 500 mT bei 943 mA Strom messbar. Damit lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\frac{0,1092 \text{ m}}{A \cdot \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}}} + \frac{0,0012 \text{ m}}{A \cdot \mu_0} = \frac{943 \text{ mA} \cdot 600}{A \cdot 0,5 \text{ Vs/m}^2}$$

Der linke Term (magnetischer Widerstand des Eisens) kommt sinngemäß ähnlich zustande wie der elektrische Widerstand eines Drahts, welcher proportional zur Länge und reziprok zum Querschnitt A und

zur materialspezifischen Leitfähigkeit ist. Der zweite Term steht für den magnetischen Widerstand des 1,2 mm „langen“ Luftspalts. Eisen und Luft sind magnetisch in Reihe geschaltet. Der Gesamtwiderstand entspricht, analog zum ohmschen Gesetz, dem Quotienten aus magnetischer Spannung ( $943 \text{ mA} \cdot 600 \text{ Wdgn} = 565,8 \text{ A}$ ) und magnetischem Fluss (Flussdichtemesswert  $0,5 \text{ T} \cdot \text{Fläche A}$ ).

Weil die Feldlinien praktisch senkrecht und mit wenig Streuung durch den Luftspalt verlaufen, ist die Fläche A in allen 3 Termen der Gleichung dieselbe (= Eisenquerschnitt  $A_{\text{Fe}}$  des Kerns) und lässt sich wegekürzen. Nach dem Multiplizieren beider Seiten mit  $\mu_0$  und Ausrechnen des dritten Terms ergibt sich:

$$\frac{0,1092 \text{ m}}{\mu_{\text{rel}}} + 0,0012 \text{ m} = 0,001422 \text{ m},$$

woraus  $\mu_{\text{rel}} = 492$  folgt, ein für das Eisen plausibler Wert.

Der zweite Term (zuletzt 0,0012 m) und der dritte Term (0,001422 m) liegen recht nahe beieinander. Die Relation zeigt, dass der magnetische Widerstand des Eisenkerns gering ist und dass etwa 84 % der magnetischen Gesamtspannung über dem Luftspalt abfallen. Unter diesen Verhältnissen würde sich ein nennenswerter Flussdichte-Messfehler (z.B. infolge fehlerhafter Kalibrierung des Geräts) und somit Abweichung im dritten Term mehr als sechsfach verstärkt auf den ersten Term und damit auf den errechneten Wert für  $\mu_{\text{rel}}$  auswirken.

#### Fall b

Der Versuch wurde mit den dickeren Eisenplättchen (Luftspalt jetzt 5 mm) wiederholt. Beim gleichen Strom von 943 mA ließ sich eine Flussdichte von 136,5 mT im Spalt messen. Die Gleichung lautet nun:

$$\frac{0,113 \text{ m}}{A \cdot \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}}} + \frac{0,005 \text{ m}}{A \cdot \mu_0} = \frac{943 \text{ mA} \cdot 600}{A \cdot 0,1365 \text{ Vs/m}^2}$$

Nach Ausrechnen folgt

$$\frac{0,113 \text{ m}}{\mu_{\text{rel}}} + 0,005 \text{ m} = 0,005209 \text{ m}$$

und damit  $\mu_{\text{rel}} = 541$ .

Nun ist die Relation schon recht extrem: 96 % der magnetischen Spannung fallen über der Luftspalllänge von 5 mm ab.

Ein Kalibrierfehler hätte sich noch deutlicher ausgewirkt: Wären z.B. 10 % weniger Flussdichte als die 136,5 mT angezeigt worden, dann wäre der dritte Term 10 % größer gewesen und das Ergebnis für  $\mu_{\text{rel}}$  wäre abrupt auf 155 abgefallen. Umgekehrt hätte ein nur 4 % zu großer Messwert bereits  $\mu_{\text{rel}} = \infty$  ergeben.

Wenn man ohne die im Beitrag beschriebene Zylinderspule das Magnetometer kalibrieren möchte, dann ließe sich das auch mit der Eisenkernspule wie folgt tun: Jeweils eine Messung mit kleinem und größerem Luftspalt durchführen, dabei aber nicht denselben Strom fließen lassen, sondern denselben Anzeigewert in Millitesla (mT) herstellen. Dessen Absolutwert ist zunächst gleichgültig, aber es ist gewährleistet, dass das Eisen in beiden Messungen dieselbe Permeabilität  $\mu_{\text{rel}}$  annimmt. Jetzt beide gemessenen Stromwerte in die entsprechenden Gleichungen einsetzen und beide Rechenwerte für  $\mu_{\text{rel}}$  vergleichen.

R4 in der Schaltung (Bild 4 des Beitrags) schrittweise solange verstellen und die Prozedur wiederholen, bis beide  $\mu_{\text{rel}}$ -Rechenwerte übereinstimmen. Dann wäre das Gerät automatisch richtig kalibriert. Ein kleiner Nachteil gegenüber der Luft-

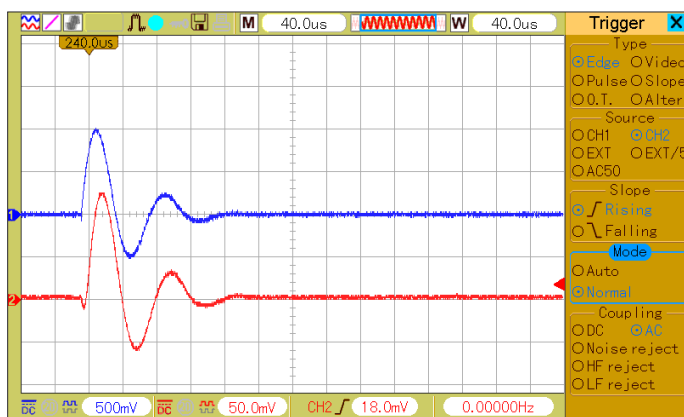


Bild 14:  
Entladung  
von 1 µF mit 16,7 V  
Anfangsspannung

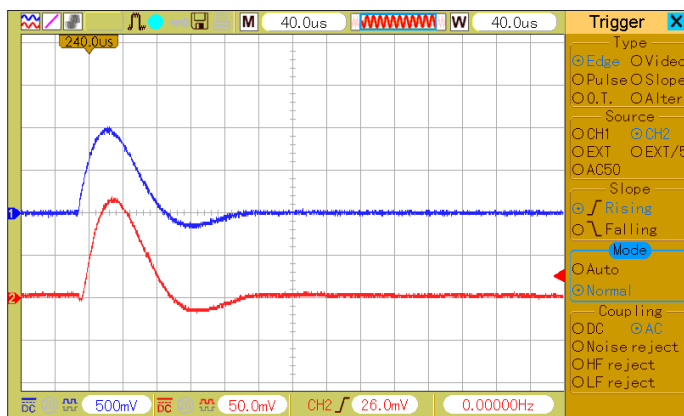


Bild 15:  
Entladung  
von 4,7 µF mit 10 V  
Anfangsspannung

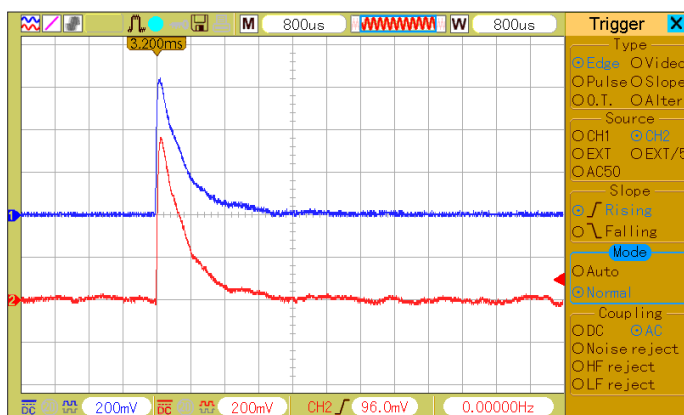


Bild 16:  
Entladung  
von 100 µF mit 4 V  
Anfangsspannung



spule ist die Hysterese des Eisens: So verblieb nach dem Ausschalten des Stroms ein Restfluss im Luftspalt, in Höhe von 4 mT (bei 1,2 mm Spalt) bzw. 1 mT (bei 5 mm Spalt), pauschal also rund 0,8 % des vorherigen Werts mit fließendem Strom.

## ■ Einsatz von Dauermagneten

In Bild 18 ist ein Aufbau aus sechs Neodymmagneten zu sehen. Zwei dicke Eisenscheiben bilden einen Rückschluss mit vernachlässigbar kleinem magnetischen Widerstand. Durch ein links unten eingefügtes 1,5 mm dickes Eisenblech entsteht rechts ein ebenso großer Luftspalt. Der Aluminiumsteg verhindert ein durch Anziehung verursachtes Zusammenkippen desselben.

Wenn man die Herstellerangaben für Feldstärke und Flussdichte (bei der Magnetisierung N42 sind das  $H = 955 \text{ kA/m}$  und  $B = 1,32 \text{ T}$ ) in die Gleichung  $B = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot H$  einsetzt, dann findet man für  $\mu_{\text{rel}}$  Werte von kaum über 1, siehe hierzu auch [8]. Ohne Luftspalt wäre der magnetische Kreis ohne zusätzlichen Widerstand geschlossen, und die maximale Flussdichte von 1,32 T käme zustande. Weil die Permeabilität der Magnete kaum groer als die von Luft ist, kann man in Näherung einfach die Weglängen in Beziehung setzen:

$$B_{\text{Luftspalt}} = \frac{1,32 \text{ T} \cdot 60 \text{ mm}}{60 \text{ mm} + 1,5 \text{ mm}} = 1,288 \text{ T}.$$

Tabelle 1: Messwerte

Temperatur	Messwert
85 C	420 mT
100 C	310 mT
115 C	220 mT
140 C	160 mT
160 C	100 mT
190 C	60 mT
207 C	45 mT
240 C (im Sandbad)	fast Null

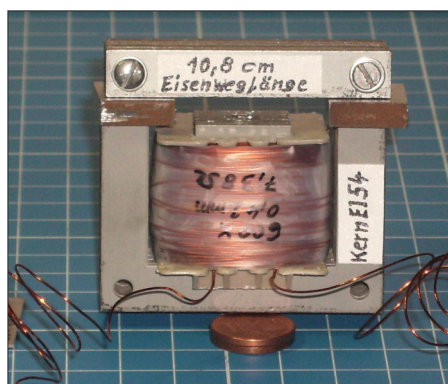


Bild 17: 108 mm langer Eisenkreis mit Luftspalt

Das Teslameter zeigte an der Anordnung einen Messwert von 1,26 T. Die Abweichung von 2,2 % liegt innerhalb der von den Lieferanten angegebenen Toleranzen für die Flussdichte. Sofern man sich auf deren Prospektwerte verlassen will, kann man also mit einem Aufbau ähnlich Bild 18 ein nicht so präzises, aber dafür starkes Kalibriernormal herstellen und sich das Wickeln von Spulen ersparen.

## ■ Einfluss von Hitze

Hierzu wurde ein Neodym-Zylindermagnet der Klasse N42 mit 10 mm Durchmesser und 6 mm Dicke untersucht. Bei mittig auf die Kreisfläche aufgelegter Messspitze betrug die Flussdichte 460 mT. Dass der Wert weit unter der Hndlerangabe von 1,3 T liegt, ist nach dem zuvor Gesagten klar: Der magnetische Rückschluss fehlt, die Feldlinien verlaufen „hochohmig“ auf weitem Weg durch die Luft, der Maximalwert der Flussdichte kommt nicht annähernd zustande.

Nun erfolgten für jeweils 3 min ein Eintauchen in immer weiter erhitztes und mit Quecksilberthermometer kontrolliertes Paraffinöl und nach dem Abkühlen erneute Messungen; Ergebnisse siehe Tabelle 1. Nach Erhitzung auf 240 C lag auf der kreis-



Bild 18: Anordnung aus sechs Neodym-Magneten

förmigen Oberfläche eine „fleckige“ Verteilung schwach magnetischer Areale wechselnder Polarität und Stärke vor, etwa in der Spanne von  $-1 \text{ mT}$  über 0 bis  $+1 \text{ mT}$ . Nach dem Versuch der Neumagnetisierung mit einer Anordnung ähnlich Bild 18 waren nur Areale mit bis zu 7 mT feststellbar. Der Magnet ist offensichtlich irreversibel zerstört.

## ■ Verlust der Magnetisierung durch Erschütterungen

Ein von einem alten M5-Spiralbohrer abgeschnittenes und geradegeschliffenes, 18 mm langes Schaftstck hatte nach dem Kontakt mit einem Neodym-Magneten etwa 4,5 mT Flussdichte an den Enden. Mit einem 1-kg-Hammer erfolgten nun auf einem kleinen Amboss Schläge in axialer Richtung auf den Stift. Ergebnis: noch 3,4 mT nach dem ersten Schlag, nach jedem weiteren Schlag abnehmend auf 1,4 mT, 1 mT, 1 mT, 0,8 mT, danach nicht weiter fallend.

emmmf@gmx.de

## Literatur

- [7] Friese, W., DG9WF: Operationsverstärker und Reihenresonanzkreise. FUNKAMATEUR 56 (2007) H. 11, S. 1192–1194
- [8] Webcraft GmbH: Magnetische Sättigung. [www.supermagnete.de](http://www.supermagnete.de) → Wissenswertes → Magnetismus A-Z