

*7. Einige Versuche über Magnetisierung durch schnelle Schwingungen;  
von Ferdinand Braun.*

1. Die Versuche, welche ich im folgenden mitteile, sind bereits im Dezember vorigen Jahres (1901) entstanden, und zwar im Anschluß an solche, welche Hr. Brandes im hiesigen Institut auf meine Veranlassung anstellte. Ausgehend von der Rutherfordschen Beobachtung<sup>1)</sup>, wonach maximal magnetisierte feine Stahlnadeln durch elektrische Wellen, welche man um oder durch die Nadeln leitet, teilweise entmagnetisiert werden, sollte versucht werden, ob man nicht die dabei freiwerdende magnetische Energie in nützlicher Weise zur stärkeren Erregung eines Kohärrers benutzen könne, ähnlich wie es Marconi — wahrscheinlich ungefähr gleichzeitig — durch Benutzung der Hysteresis gemacht hat.<sup>2)</sup> Indem die permanente Magnetisierung sehr rasch verschwindet, mußte sie von einer starken zeitlichen Änderung der Kraftlinienzahl und einer dementsprechend großen — in einer Spule — induzierten elektromotorischen Kraft begleitet sein. Bei diesen Versuchen zeigte sich, daß auch der temporäre Magnetismus der feinen Stahlnadeln (Unruhfedern 0,025 mm dick, 0,15 mm breit) in einer, wenn auch bekannten, so doch mir auffallenden Weise den Schwingungen (von einigen Millionen pro Sekunde) folgte. Auch die Verluste durch Foucaultströme in den zwar sehr feinen und gut voneinander isolierten Drähtchen schienen mir geringer, als ich erwartet hatte, insbesondere nach den Beobachtungen von Birkeland<sup>3)</sup>, welcher eine außerordentlich starke Absorption der Schwingungen in Gemengen von feinem Eisenpulver mit Paraffin (5 bis 50 Volumprozent) fand. Er sagt, „alle elektromagnetische Energie sammele sich in dem

1) E. Rutherford, Phil. Trans. 189. p. 1—24. 1897.

2) G. Marconi, Proc. Roy. Soc. 70. p. 341. 1902. Vgl. übrigens genau dieselben Methoden bei E. Wilson aus dem Jahre 1897; *Electrician* 49. p. 917. 1902.

3) M. Birkeland, Compt. rend. 118. p. 1324. 1894.

betreffenden Materiale an und der andere Raum werde daher so von Energie befreit, wie die Luft von Wasserdampf in Gegenwart eines stark absorbierenden Mittels. Diese Absorption rühre wahrscheinlich von der Hysterisis der Zylinder und der Entwicklung Joulescher Wärme her.“

2. Ich selber wagte im Anfang nur ganz dünne Schichten von fein verteiltem Eisen (z. B. den einige Millimeter dicken Hohlraum zwischen zwei koachsialen Glaszylindern) zu verwenden, fand dabei auch einige Wirkung, überzeugte mich aber bald, daß dieselbe zunahm mit der Menge des verwendeten Eisens, z. B. stieg, wenn man den leeren Hohlraum immer mehr mit Probierröhrchen ausfüllte, welche mit Eisenpulver gefüllt waren.

Für die von mir benutzten Schwingungen (ca. 5 Millionen pro Sekunde) habe ich mit gleich gutem Erfolge das offizielle — offenbar mechanisch hergestellte — Pulvis ferri verwendet, wie das feinere, aber wesentlich teurere hydrogenio reductum. Dagegen zeigte die von mir selbst durch Sieben hergestellte feinste Eisenfeile fast keine Wirkung mehr. Dieses aus dem gewöhnlichen Material ausgesiebte Pulver war schon zu grob. Das Pulver wird zweckmäßig mit einem isolierenden Material, z. B. Vaselineöl verrieben; doch ist dies für die meisten Zwecke gar nicht nötig. Das trockene Material isoliert gegen die entstehende elektromotorische Kraft der Foucaultströme schon ebensogut.

3. Als Beispiel der Wirksamkeit sei ein Versuch angeführt. Die beiden Leydener Flaschen  $C_1$  und  $C_2$  (Fig. 1) von je 1800 cm Kapazität entladen sich durch die Primärspule  $P_1$ ; sie hat vier Windungen Kautschuk-isolierten Draht von 9,5 cm mittlerem Durchmesser und ist umgeben von acht Windungen ebensolchen Drahtes von 13 cm Durchmesser, welche die Sekundärspule  $P_2$  darstellen. In letztere ist entweder ein Rießsches Thermometer  $Th$  oder ein Funkenmikrometer eingeschaltet.

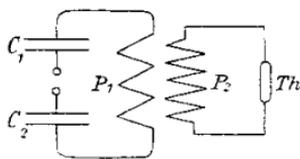


Fig. 1.

Das Thermometer zeige in dieser Schaltung 14 cm Ausschlag. Wird nun in die Primärspule ein Becherglas mit dem erwähnten Eisenpulver eingesenkt, so steigt der Ausschlag auf 20 bis 22 cm, also um ca. 50 Proz. Ein Funkenmikrometer,

welches vorher 9 mm gab, läßt sich auf 12 mm ausziehen. Das Gewicht des Eisenpulvers beträgt dabei etwa 1 kg.

4. Diese Tatsache, welche sich in vielen weiteren Versuchen bestätigt, könnte daraus erklärt werden, daß sich in allen diesen Fällen die Schwingungszahl des Primärkreises durch das eingeführte Metall verändert und vielleicht zu Gunsten eines besseren Energieumsatzes verschoben habe. Diese mögliche Auffassung wird durch den folgenden Versuch

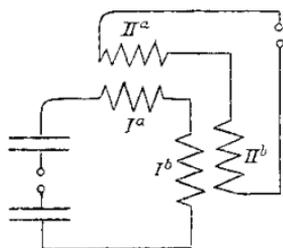


Fig. 2.

widerlegt (Fig. 2). In den Primärkreis sind zwei gleiche Spulen  $I^a$  und  $I^b$  gelegt; jede derselben ist umgeben von je einer Spule  $II^a$  und  $II^b$ , welche einander gleich sind. Die Maße sind: jede Primärspule hat vier Windungen von 6,5 cm mittlerem Durchmesser, gebildet aus etwa 2,5 mm dicker Kupferader; jede Sekundärspule 16 Windungen von etwa 8,2 cm mittlerem Durchmesser. Die Sekundärspulen werden gegeneinander geschaltet und ihre Enden zu einem Rießschen Thermometer oder einer Funkenstrecke geführt.

Nach den angegebenen Abmessungen ist der Strom im Primärkreis unzweifelhaft quasistationär. Ändert sich also durch Einschieben des Eisens in *einer* Primärspule die Stromstärke, so erfolgt dieselbe Änderung auch in der anderen, d. h. das Verhältnis des Energieumsatzes muß in beiden Transformatoren das gleiche bleiben, wenn die Änderung des Primärstromes die Ursache ist; heben sich also ohne eingeführtes Eisen die transformierten Ströme auf, so müßte das gleiche gelten nach Einführung des Eisens, wäre die Wirkung aus einer Änderung der primären Schwingungsdauer zu erklären.

Der Versuch dagegen zeigt:

a) *Thermometerwirkung.* Die Sekundärspulen mit Luft als Diamagnetikum geben gegeneinander geschaltet nahezu den Ausschlag Null (hintereinander 11 cm); wird in die eine ein Becherglas mit etwa einem halben Kilogramm Eisenpulver gebracht, so zeigt das Thermometer 1,7 cm.

b) *Funkenwirkung.* Ohne Eisen ein *sehr dünner* Funke von etwa 2—2,5 mm. Wird Eisen in die eine Spule gebracht, so wird der Funke *sehr intensiv* und kann bis auf 9 mm verlängert werden.

5. Das Eisenpulver gestattet, wie nach seiner auch für diese Schwingungen noch unzweifelhaft merklich der Luft überlegenen Permeabilität zu erwarten ist, den magnetischen Kräften mehr oder weniger scharfe Bahnen vorzuschreiben, ähnlich, wenn auch voraussichtlich nicht in dem Maße wie das Eisen für stationären oder langsam variierenden Wechselstrom. Am einfachsten zeigt dies der folgende Versuch (Fig. 3):

Koaxial über der 12 cm langen Primärspule I (16 Windungen) befindet sich in einigem Abstand eine gleiche Sekundärspule II; jede im Lichten etwas über 7 cm weit. Eine unten geschlossene, 4 cm weite Glasröhre ist bis zu 12 cm (also so hoch, wie eine Spule lang ist) mit Eisenpulver gefüllt. Diese Röhre wird so in die Spulen eingetaucht, daß die Eisenmasse sich ganz in der unteren Spule befindet und die Funkenstrecke  $F_2$  so reguliert, daß keine

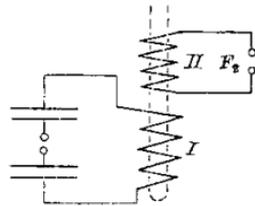


Fig. 3.

Funken mehr übergehen. Hebt man dann das Glasrohr, sodaß die Eisenmasse teils in die untere, teils in die obere Spule eintaucht, so treten wieder kräftige Funken auf, welche verschwinden, sobald bei weiterem Herausziehen das Eisen nur noch die obere Spule erfüllt. *Es leitet also das Eisen bei der mittleren Lage die Kraftlinien aus der unteren in die obere Spule.*

6. Eine im Eisenpulver vorhandene permanente Magnetisierung wird durch Schwingungen zerstört. Dies zeigt der folgende Versuch. Man bringt die Röhre mit Eisenpulver vorher in eine Magnetisierungsspule. Schickt man durch diese einen kräftigen konstanten Strom, so richtet sich das Eisen zu Strähnen, welche auch nach Öffnen des Stromes teilweise als tannenähnliche, gegen Erschütterungen sehr wenig empfindliche, etwa Zentimeter lange Nadeln aus der oberen Fläche der (mit Vaselineöl bedeckten) Eisenmasse herausschauen. Wird dieses remanent magnetisierte Eisen in die Primärspule des Flaschenkreises eingesenkt, so fallen, sobald eine Entladung durch die Spule hindurchgeht, die Nadeln sofort zusammen. Das Eisen wird durch die alternierende gedämpfte Entladung (im allgemeinen bis nahezu auf Null) entmagnetisiert. Dabei wird offenbar die im Eisen noch vorhandene magnetische Energie wieder als elektrische gewonnen.

Daß die Magnetisierung dabei bis in das Innere der Eisenmasse dringt, läßt sich leicht zeigen. Es wurde in ein Becherglas von 9 cm Durchmesser, welches 14 cm hoch mit dem öldurchtränkten Eisenpulver gefüllt war, achsial ein unten geschlossenes Glasrohr von etwa 3 cm Durchmesser gesetzt, welches den Boden nicht vollständig erreichte. In den so geschaffenen Hohlraum wurde ein 2 cm weites, auf eine Höhe von etwa 12 cm mit Eisenpulver gefülltes Glasrohr eingefügt. War dies letztere vorher magnetisiert, so fielen auch in ihm die Eisennadeln zusammen, wenn Schwingungen um das Ganze geleitet wurden durch eine Spule, welche die Eisenmasse ganz oder wenigstens nahezu bedeckte.

7. Das Eisenpulver habe ich auch durch Magneteisenstein ersetzen können, welchen man seiner geringeren Leitfähigkeit wegen in größeren Stücken verwenden darf.

8. Auffallend war mir, worauf ich schon hinwies, der geringe Energieverbrauch durch Foucaultströme. Der ganzen auf einen Kreisumgang entfallenden elektromotorischen Kraft gegenüber sind die Widerstände offenbar zu groß; sie vermindern sich auch, meinen Erfahrungen nach, nicht etwa durch eine im Eisenpulver eintretende Kohärerwirkung, auf welche man gefaßt sein mußte. In sehr starken elektrischen Feldern freilich (z. B. wenn man Eisenpulver zwischen zwei auf große Spannungsdifferenz geladene Drähte bringt) tritt im Eisenpulver eine lebhaftere Funkenbildung ein. In schwächeren Feldern dagegen schien es sich merklich wie ein leidlicher Isolator zu verhalten.

Genauere Versuche ließen freilich auf einen größeren Energieverbrauch schließen, als die obigen qualitativen. Es wurde nämlich die Resonanzkurve des Flaschenkreises, mit und ohne Eisen, bestimmt nach der Anordnung, welche Fig. 4 schematisch zeigt;  $c_1$  und  $c_2$  sind die Kapazitäten des Primärkreises;  $s_1$  die Magnetisierungsspule,  $p_1$  eine variable Selbstinduktion. Die Spule  $s_1$  wirkt induktiv auf die (koachsial gelegene) Spule  $s_2$  von zwei Windungen (30 cm Durchmesser in etwa 20 cm Abstand von  $s_1$ ); die Spule  $s_2$  bildet mit dem Kondensator  $c_3$ , der variablen Selbstinduktion  $p_2$  und dem durch die Gleitschiene  $A_1 A_2$  in berechenbarer Weise veränderlichen Selbstinduktionskoeffizienten  $p_3$  der abgegrenzten

Fläche einen Resonanzflaschenkreis. Die Resonanzstellung wird erkannt entweder an dem Ausschlag des eingeschalteten Rießschen Thermometers  $Th$  oder der Größe der dem Kondensator  $c_3$  parallel geschalteten Funkenstrecke  $F$ ; die  $p_3$  bestimmende Fläche war hergestellt durch zwei Kupferdrähte

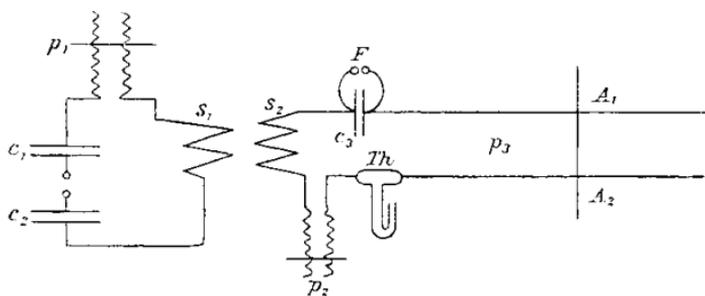


Fig. 4.

von 2 mm Durchmesser, die in 40 cm Abstand je 2 m lang ausgestreckt waren. Durch  $p_3$  läßt sich in leicht ersichtlicher Weise eine andere Selbstinduktion, z. B.  $p_2$ , empirisch aichen. Die obige Anordnung ist insofern nicht zweckmäßig gewesen, als durch Einführen von Eisenpulver oder anderen Vergleichs-

stoffen in  $s_1$  sich das Aussehen des induzierenden Magnetfeldes *sehr erheblich* ändern kann. Es müßte der Primärkreis angeordnet werden etwa wie Fig. 5 zeigt, d. h. es müßten in einer Spule  $s_3$ , welche so gelegen ist, daß sie die Gestalt des induzierenden Feldes nicht beeinflusst, die Änderungen vorgenommen

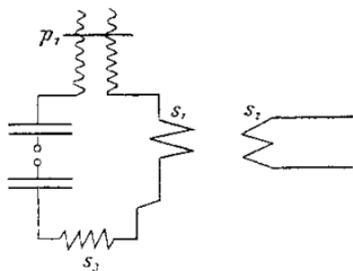


Fig. 5.

werden. Es sollen in dieser Weise Versuche gemacht werden, welche eine direkte allseitige Vergleichung zulassen. Aus den angestellten ergab sich:

a) daß die Resonanzkurve, wenn das Eisenpulver in den Flaschenkreis eingefügt war, wesentlich flacher verlief, als ohne dasselbe;

b) daß das eingeführte Eisen die Schwingungszahl ebensoviel vertiefte, als wie ein Einfügen von Selbstinduktion etwa gleich dem 3—4fachen Betrag der Selbstinduktion der Mag-

netisierungsspule (also wirkt das Eisen etwa wie ein Körper von der Permeabilität 4);

c) Gemenge mit weniger Eisen zeigen schwächere magnetisierende Wirkung, aber auch ganz erheblich weniger Energiekonsum.

9. Das fein verteilte Eisen verhält sich in den angeführten Versuchen, als wenn es eine stärkere magnetische Koppelung bedinge und läßt sich nach dem Ergebnis derselben für diesen Zweck, trotz der unzweifelhaften Energieverluste, nützlich verwenden. Gegenüber dem gewöhnlichen Transformator scheint mir aber ein Unterschied insofern vorhanden, als uns hier ein *gegebener* Energiebetrag zur Verfügung steht (während dort in dem Maße, wie Energie im sekundären Kreise abgegeben wird, solche vom Primärkreis mehr aus der Quelle geschöpft wird).

Im Zusammenhang damit steht die Folgerung, daß das Eisen die *magnetische Energie lokalisieren und damit* (da ihr Gesamtbetrag durch die gegebene elektrische Anfangsenergie des Kondensators bestimmt ist) *anderen Raumteilen entziehen muß*. In dieser Weise kann einer Zerstreung derselben und einer Ausstrahlung an nicht gewünschten Stellen vorgebeugt werden.

10. Jedes in einem Isolator fein verteilte Metall gibt mit demselben natürlich ein Material, welches sich wie ein Mittel mit sehr hoher Dielektrizitätskonstante (40 bis 80 *gibt z. B. fein verteiltes Eisen*) verhält. Durch Umgeben von Drähten mit diesem Material wird man daher bei ungeänderter Schwingungszahl die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und damit die Wellenlänge sehr erheblich verkleinern können.<sup>1)</sup> Diese Eigenschaft kann für wissenschaftliche wie praktische Zwecke sehr wertvoll sein. Für drahtlose Telegraphie z. B. ist man öfters in die Lage versetzt, Teile einer Wellenlänge durch gespannte Drähte herzustellen, die aber gleichzeitig Energie ausstrahlen und bisweilen an Stellen, wo man eine solche Strahlung nicht wünscht. Solche Energieverluste lassen sich damit reduzieren.

---

1) Wenn man auf die Mitwirkung der Magnetisierbarkeit verzichtet, verwendet man vorteilhafter besser leitende (und gleichzeitig hysteresisfreie) Metalle, etwa fein verteiltes Kupfer.

Es ist ferner offenbar, daß alle auf katoptrischen oder dioptrischen Analogien beruhenden elektrischen Vorrichtungen sich ungleich günstiger gestalten werden, wenn man durch Verwendung stark brechender Mittel *relativ kleine* Wellen erzeugt und in diesem Medium die Reflexion und Brechung vergehen läßt. Man nähert sich dadurch bei handlichen Dimensionen mehr den Voraussetzungen der geometrischen Optik. Dies kann geschehen durch Mischungen gut leitender Mittel mit Isolatoren oder natürlich auch durch flüssige homogene Körper (wie Alkohole, Wasser etc.). Ich bin mit Versuchen in dieser Richtung noch beschäftigt.

Straßburg, November 1902.

(Eingegangen 15. November 1902.)