

Da die Größen H und J im absoluten Maßsystem ausgedrückt sind, erhalten wir demnach den Energieverbrauch in Erg ausgedrückt.

Wollen wir die Temperaturerhöhung, welche ein magnetisches Metall wenn es einen magnetischen Kreisprozeß durchläuft, berechnen, so haben wir den Wert des Integrals / H d J in Wärme-Einheiten auszudrücken und durch die Dichte und spezifische Wärme der magnetischen Substanz zu dividieren. 42.000.000 Erg sind einer Gramcalorie äquivalent. Die Dichte des Eisens ist im Mittel 7.7 und die spezifische Wärme 0.11. Die durch einen magnetischen Kreisprozeß erzeugte Temperaturerhöhung ist danach

$$\frac{\int H d J}{42.000.000 \times 7.7 \times 0.11} = 2.81 \times 10^{-8} \int H d J \dots 6)$$

Das Integral / H d J hat für weiches Eisen, welches gut ausgeglüht ist, bei einem Cycles ungefähr den Wert 10.000 Erg. Gleichzeitig mit der cyclischen Magnetisierung entstehen Wirbelströme, die die Erwärmung des Eisens nur noch begünstigen:



(Fig. 1.)

Die Entstehung dieser Wirbelströme, die auch Foucaultsche Ströme genannt werden, obwohl Foucault mit deren Entdeckung nichts zu thun hat, kann durch entsprechende Verkleinerung gewisser Dimensionen des Objectes fast vollständig unterdrückt werden.

Um die Temperatur eines weichen Eisenkernes um 1° C. zu erhöhen, sind ungefähr 4000 Kreisprozesse notwendig. Ist in einem Kubik-Centimeter 7.7 gr Eisen enthalten und hat die zu magnetisierende Eisenmasse ein Gewicht von 200 kg, so erhalten wir für die bei einer cyclischen Magnetisierung in Wärme umgesetzte elektrische Energie

$$\frac{200.000}{7.7} \int H \cdot d J$$

Für / H . d J den Wert 10.000 Erg eingesetzt, ergibt

$$\frac{200.000}{7.7} \cdot 10.000 = 259.740.000 \text{ Erg.}$$

Die Anzahl der in der Sekunde stattfindenden Kreisprozesse sei gleich N; dann ist die in der Sekunde geleistete Arbeit in Erg

$$\frac{200.000 \cdot N}{7.7} \int H \cdot d J \dots 7)$$

Für unsern Fall N = 100 eingesetzt, ergibt

$$\frac{200.000 \cdot 100}{7.7} \cdot 10.000 = 2.5994 \cdot 10^{10} \text{ Erg}$$

die in Wärme umgesetzte elektrische Energie. Durch Division mit der Zahl 7.36 . 10<sup>7</sup>, welche einer Pferdekraft äquivalent ist, können wir diesen Ausdruck in Pferdestärken erhalten. Die Rechnung ergibt

$$3529 \text{ Pferdestärken,}$$

die durch magnetische Hysteresis in Wärme umgesetzt wurden.

Die Größe des / H . d J hängt von der Härte des Materials direkt ab. Für härtere Sorten des Schmiede-Eisens kann der Wert auf 16.000 Erg pro Kubik-Centimeter steigen. Bei weichem Stahl liegt derselbe nach Hopkinsons Versuchen zwischen 40.000-60.000. Für Stahlorten mit hohem Kohlenstoffgehalt kann der Wert des Integrals 60.000 überschreiten. Ausgeglühter Klaviersaitendraht ergab 94.000, während für den käuflichen Draht 116.000 und für glasharten 117.000 Erg für 1 cm<sup>3</sup> erhalten wurden.<sup>1)</sup>

Nach Hopkinson absorbiert ein Stück Wolframstahl, das 3.4% Wolfram, 0.5% Kohlenstoff und 0.6% Mangan enthält, sogar 216.800 Erg für 1 cm<sup>3</sup>, also das Zwanzigfache von weichem Schmiede-Eisen. Die für Gußeisen erhaltenen Werte sind bedeutend kleiner und haben für unsere Betrachtung weniger Interesse.

Beim Betriebe von Dynamomaschinen ist wesentlich die magnetische Hysteresis die Ursache von Energievergeudung, die sich in der Erwärmung des Ankereisens zu erkennen gibt. Man sucht dieselbe in verschiedener Weise zu verkleinern, gewöhnlich durch sinnreiche Zerteilung des Ankereisens, indem man dasselbe aus Blechscheiben<sup>2)</sup> bestehen läßt, die untereinander magnetisch und elektrisch durch Papiereinlagen isoliert werden. Das geeignetste Eisenmaterial ist schwedisches Eisenblech, das nur 6000 bis 7000 Erg Verlust liefert.

Am größten und am lästigsten macht sich der Einfluß der magnetischen Hysteresis bei Wechselstrom-Generatoren, Motoren und Transformatoren mit Strömen von hoher Wechselzahl bemerkbar. Dies ist auch wesentlich die Ursache, weshalb man, um große Wechselzahlen zu erhalten, gezwungen ist, zu oscillatorischen Kondensatorenladungen zu greifen.

Die bei sehr schnellen Feldwechseln gefundenen Hysteresisverluste stimmen im allgemeinen mit den aus den Hysteresisschleifen berechneten mit ziemlicher Genauigkeit überein.

Bei Strömen von hoher Wechselzahl kann der aus der magnetischen Hysteresis resultierende Wärme-Effekt sehr groß werden. So beobachtete der eben so kühne als geniale Experimentator Nicola Tesla bei dem Hindurch-

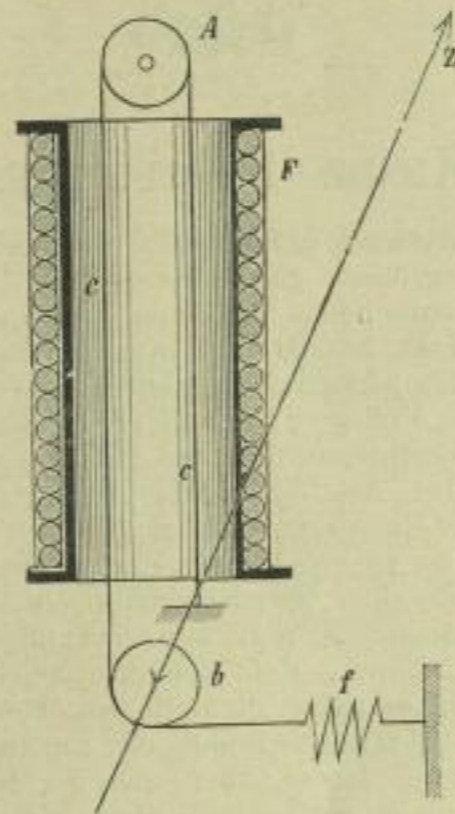
senden eines kräftigen Wechselstromes durch eine Spule von vielen Windungen, daß es kaum einer Sekunde bedurfte, um einen in dieselbe geschobenen dünnen Eisendraht auf etwa 100° C. zu erwärmen.<sup>3)</sup>

Dies ist auch aus den Gleichungen erhellend, da der Wärme-Effekt direkt proportional der Zahl der in einer Sekunde stattfindenden magnetischen Kreisprozesse ist.

Ebenso leicht wie wir, sobald uns die Wechselzahl des Stromes sowie der Wert des Integrals / H . d J bekannt ist, auf den durch die magnetische Hysteresis erzeugten Wärme-Effekt schließen können, geradeso leicht ist es uns möglich, aus den aus der magnetischen Hysteresis resultierenden Wärme-Effekt auf die Wechselzahl des Stromes zu schließen.

Die Messung von Wechselströmen bietet im allgemeinen mehr Schwierigkeiten als die der Gleichströme. Zur Bestimmung von Intensität und Spannung dienen uns gewöhnlich das Elektrodynamometer,<sup>4)</sup> das Elektrometer, calorische Meßinstrumente und unter gewissem Vorbehalte auch elektromagnetische. Es ist hier ferner noch auf Gustav Benischkes Wechselstromgerät<sup>5)</sup> und auf das Funkenmikrometer hinzuweisen. Aus der Länge des Funkens soll bei letzterem Instrumente auf die Spannung des Stromes geschlossen werden. Natürlich eine sehr unzuverlässige und unsichere Methode, da die Länge des Funkens von vielen Nebenumständen, wie Form der Elektroden, Feuchtigkeitsgehalt der Luft etc., abhängt.

Bis jetzt ist man noch immer über die Art der Ströme, die bei Teslas berühmten Experimenten über „das Licht der Zukunft“ zur Anwendung kommen, im Unklaren. Man weiß weder genau die Spannung noch die Frequenz des



(Fig. 2.)

Stromes anzugeben, sondern ist rein auf Abschätzungen und Kombinationen angewiesen, eben deshalb, weil uns ein derartiges Instrument fehlt, das die Ströme zu messen gestattet.

Im Folgenden soll nun ein Instrument beschrieben werden, das, vom Verfasser konstruiert, zum Messen der Wechselzahl von Strömen, gleichviel welchen Charakters, dienen soll.

Die Ausdehnung eines Eisenstabes, bzw. eines Eisendrahtes durch die von der Hysteresis entwickelte Wärme, gibt uns einen Schluß auf die Wechselzahl des Stromes, wenn wir die anderen Faktoren als Konstante des Instrumentes einführen. Wir hätten, wenn alles andere als bekannt vorausgesetzt werden darf, bei der Ablesung auf nichts anderes zu achten, als auf die Zeit, in welcher die Erwärmung des Eisens durch Hysteresis erfolgte. Unter Umständen, beispielsweise wenn es sich um einen dünnen Eisenstab handelt, der äußerst kleine Wärmekapazität besitzt, im Verhältnis zu dieser aber eine große Abkühlungsfläche, kann die Bestimmung der Zeit außer Acht gelassen werden.

Bei der Konstruktion des Instrumentes muß berücksichtigt werden, daß das Eisen niemals in so hohem Grade erwärmt werden darf, als die magnetische Aufnahmefähigkeit, das magnetische Leistungsvermögen, die Permeabilität es zulassen.

In Figur 2 ist der Apparat dargestellt. Ein dünner Stahldraht, c, c der an dem einen Ende befestigt, an dem anderen durch eine Feder f stets straff gespannt wird, befindet sich in dem Kraftfeld des vom Wechselstrom durchflossenen Solenoides S. Durch diesen erhält der Stahldraht cyclische Magnetisierung und die hierbei auftretende Hysteresis, die um so größer sein wird, je härter das Material des Drahtes und je zahlreicher die Stromwechsel in einer Sekunde erfolgen, erwärmt das Eisen. Infolgedessen wird sich der Draht ausdehnen. A und b sind zwei Rollen. Die Welle der Rolle b ist mit einem Räderwerk versehen, das den Zweck hat, die Ausdehnung des Drahtes wahrnehmbar zu machen. Das Räderwerk ist der Uebersichtlichkeit halber in der Figur fortgelassen. Dasselbe überträgt seine Bewegung auf den Zeiger z, der auf einer Skala spielt.

Nun ist die Ausdehnung des Drahtes direkt proportional der Wechselzahl des im Solenoid zirkulierenden Wechselstromes. Die Ausdehnung ist eine Funktion der Temperaturerhöhung, da die Beziehung

$$L_T = L_t (1 + \alpha [T - t]) \dots 8)$$

gilt. Man erhält für die Temperaturerhöhung den Ausdruck

1) J. A. Ewing: Magn. Induktion in iron and other Metals, p. 103, 1892.

2) Die Eisenblechdicke beträgt gewöhnlich ungefähr 0.3 mm.

3) Martin: „Nicola Teslas Untersuchungen über Mehrphasenströme etc.“ S. 118 u. 170, Halle 1895.

4) Blakesley: „Die elektr. Wechselströme.“ Das Elektrodynamometer, p. 73-82.  
5) Vergl. Patentschrift D. R.-P. Nr. 84.871; ferner die in dieser Zeitschrift darüber erschienene Abhandlung.