**4. Über die Abhängigkeit der Permeabilität
der Eisendrähte von der Frequenz im Wellen-
längenbereich von 54 bis 705 m;
von B. Wwedensky und K. Theodortschik.¹⁾**

§ 1. Einführung.

Die magnetische Permeabilität der Eisendrähte wurde eingehend in Wellenlängenbereichen von 1,3– 72 cm (Arkadiew²⁾, in langen Wellen bis etwa 1000 m herab (Schames³⁾ und bis etwa 200 m herab (L. Wilson⁴⁾) untersucht. So blieb das ganze Wellenlängenintervall von etwa 1 m bis 200 bzw. 1000 m ohne systematische Erforschung, worin der äußere Grund zur Unternehmung der vorliegenden Untersuchung zu sehen ist. Der zweite Grund war der folgende: Von Arkadiew²⁾ wurde im Gebiete seiner kurzen Wellen ein anomaler Verlauf der Permeabilität beobachtet, welchen er durch die Annahme von Eigenperioden der Elementarmagnete deutete. Ferner ergaben die Untersuchungen von Wwedensky⁵⁾, daß die Magnetisierung der Eisendrähte bis zur Hälfte des Anfangswertes in einer Zeit $\Theta = 10^{-6}$ bis 10^{-7} Sek. abfällt (magnetische Viskosität). Wenn nun diese Erscheinung ebenfalls durch die Existenz von Eigenperioden gewisser Bestandteile des Eisens erklärt werden kann (nur muß hier die Dauer dieser Perioden von der Ordnung 10^{-7} bis 10^{-6} Sek., also viel länger, als die von Arkadiew gefundene, gesetzt werden), so ist es zu erwarten, daß in Wellenlängenbereichen, die den genannten Perioden entsprechen (also bei Wellenlänge $\lambda = \text{ca. } 100 \text{ m}$), die Permeabilität ebenfalls eine Anomalie aufweisen wird.

1) Die vorläufige Mitteilung vgl. W. Arkadiew, *Physik. Zeitschr.* **22**. S. 511. 1921.

2) W. Arkadiew, *Ann. d. Phys.* **45**. S. 133. 1914; **58**. S. 105. 1919. Vgl. auch W. Kartschagin, *Ann. d. Phys.* **67**. S. 325. 1922.

3) L. Schames, *Ann. d. Phys.* **27**. S. 64. 1908.

4) L. T. Wilson, *Proc. Inst. Radio-Eng.* **9**. Nr. 1. S. 56. 1921; uns bereits nach Beendigung der Untersuchung bekannt geworden.

5) B. Wwedensky, *Ann. d. Phys.* **64**. S. 609. 1921; **66**. S. 102. 1921.

Aus diesen Gründen führten wir die vorliegende Untersuchung der Permeabilität im Wellenlängenbereich von Wellenlänge $\lambda = 705$ m bis $\lambda = 54$ m aus, wobei ungedämpfte Schwingungen (Elektronenröhren) und hauptsächlich sehr schwache magnetische Felder (wenige Hundertstel Gauss) angewandt wurden; das heißt, daß wir mit der Anfangspermeabilität zu tun hatten.

§ 2. Die Methode.

Zwei Röhrengeneratoren I und II (vgl. Fig. 1) hoher Frequenz wirken gleichzeitig auf den Gitterkreis eines Dreiröhrenverstärkers V, wobei, bei kleiner gegenseitiger Verstimmung der Kreise, im Verstärkertelephon T ein Schwebungston entsteht. Diesem wird eine Schwingung hörbarer Frequenz vom Röhrengenerator III überlagert, wodurch „Schwebungen zweiter Ordnung“ (d. h. zwischen zwei hörbaren Schwingungen) entstehen. Das Einbringen einer kleinen Zahl Eisendrähte in die Spule L (im Schwingungskreis des Hochfrequenzgenerators I, Fig. 1), verändert die Selbstinduktion L und die Zahl der

Fig. 1.

Schwebungen zweiter Ordnung pro Sekunde. Daraus könnte die Änderung der Selbstinduktion ermittelt werden.¹⁾ Wir zogen es aber hier vor, die Änderung ΔL durch die entsprechende Änderung ΔC der Kapazität C des Schwingungskreises zu kompensieren, bis die anfängliche Schwebungszahl (zweiter Ordnung) wieder hergestellt wurde; dabei wurde auch die anfängliche Hochfrequenz ν wieder hergestellt. Dann erhalten wir bei der vorhandenen kleinen Dämpfung der Schwingungskreise²⁾

1) L. Pungs und G. Preuner, Physik. Zeitschr. 20. S. 543. 1919.

2) Die Größe $R^2 C / 4 L$ war im ungünstigsten Falle gleich $1,10 \cdot 10^{-4}$

$$\nu^2 = \frac{1}{LC} = \frac{1}{(L + \Delta L)(C + \Delta C)},$$

woraus die einfache Beziehung folgt:

$$(1) \quad \frac{\Delta L}{L} = - \frac{\Delta C}{C},$$

wo L und C die wirkende dynamische Selbstinduktion und Kapazität bedeuten.

§ 3. Die Apparate.

Das allgemeine Schema der Anordnung ist in der Fig. 1 dargestellt.

Hochfrequenzgeneratoren. Die möglichst gleich gebauten Generatoren I und II enthielten Glimmer- oder veränderliche Kondensatoren mit verschiebbarer Glasplatte nach Nernst. Die abwechselbaren Spulenpaare des Generators I, in dessen Spule die Eisendrähte eingeführt wurden, sind in der Tab. I beschrieben. Sie bestehen aus je zwei (Zylinder- und Gitterkreis) einlagigen koaxialen zylindrischen Wickelungen aus Drahtlitze, die Gitterwicklung (Schwingungskreis) im Inneren der Zylinderwicklung gelegen.

Tabelle I.

Spulenkonstanten.

Bezeichnungen: l = Spulenlänge, n = volle Windungszahl,

S' = Querschnitt, R = Widerstand, L = Selbstinduktion.

Spule	Gitter					Anode				
	l cm	n	S' mm ²	R Ohm	$10^{-3} L$ cm	n	S' mm ²	R Ohm	$10^{-3} L$ cm	
A	6,0	60	2865	0,800	88,5	68	4301	0,92	427,2	
B	5,0	50	1984	0,313	36,6	55	3019	0,52	205,1	
C	4,0	9	1740	0,141	4,7	12	3959	0,182	12,4	
D	5,3	23	1301	0,218	18,8	36	2376	0,287	38,7	

Elektronenröhren waren französische Empfangsröhren.

Kompensationsvorrichtung. Die Möglichkeit kleiner, aber exakt bestimmbarer Änderungen ΔC der Kapazität C (vgl. § 2) bot folgende Einrichtung: zwei Kondensatoren, ein Nernstscher mit Kapazität C ($106 \text{ cm} \leq C \leq 210 \text{ cm}$) und ein Luftkondensator mit Kapazität x (zwei massive Messingplatten $1,7 \cdot 3,0 \text{ cm}$, mit Luftschicht ca. $0,1 \text{ mm}$) waren in Serie geschaltet. Die Kapazität des ganzen Systems $C' = Cx/(C+x)$

ändert sich bei ziemlich großen und daher leicht bestimmbaren Änderungen von C nur gering, kann aber genau ermittelt werden, z. B. nach zwei gemessenen Werten $C_{\max}$ und $C_{\min}$ und zwar für alle Werte von C . Ein auf diese Weise angefertigtes Diagramm (Hyperbelkurve) diente zur Auswertung der Messungen und konnte durch direkte Messung einiger Punkte geprüft werden (vgl. w. u.).

Der Verstärker war ein Dreiröhrenverstärker französischen Typus „3^{ter}“ in Hochfrequenzschaltung, so daß die Hochfrequenz nur auf das Gitter der ersten Röhre wirkte.

§ 4. Die Eichung der Kapazitäten.

Drei Nernstsche Kondensatoren: Nr. 1, 2 und 3 wurden parallel in den Schwingungskreis I (Fig. 1) eingeschaltet. Die Glasplatte Nr. 1 war dabei ein-, die Platte 2 ausgeschoben, die Platte (Pl.) 3 befand sich in der Mitte der Skala. Die Generatoren wurden auf den niedrigsten Schwingungston abgestimmt¹⁾ und darauf die Pl. 3 auf — 10 mm verschoben. Die damit verbundene Kapazitätsänderung wurde durch Einschieben der Pl. 2 kompensiert, was an der Wiederherstellung des anfänglichen Tones genügend genau erkannt wurde. Darauf wurde die Pl. 3 in ihre anfängliche Stellung zurückgeschoben, und die Kapazitätsänderung diesmal durch Ausschieben der Pl. 1 kompensiert. Dieses Verfahren²⁾ wurde fortgesetzt, bis die beiden Kondensatoren Nr. 1 und 2 in willkürlichen Einheiten geeicht wurden; bei der Kenntnis der maximalen und der minimalen Kapazität des betreffenden Kondensators, welche mit gewöhnlichen Methoden gemessen werden konnten, erhielt man auch die absolute Eichung.

Zur Eichung des Kompensationssystems kam es an Stelle von Nr. 1, wobei in Nr. 2 die gewöhnliche Glasplatte durch eine zuvor geeichte schmale (von 3,5 mm Höhe) ersetzt wurde. Die maximale Kapazitätsänderung des Systems betrug 0,610 elektrostatische Einheiten.

1) Der Niederfrequenzgenerator III wurde dabei ausgeschaltet.

2) Das Verfahren ist dem von Nernst angegebenen analog (Zeitschr. f. phys. Chem. 14. S. 622. 1894). Auf diese Weise können sehr wohl auch die Dielektrizitätskonstanten gemessen werden.

§ 5. Vorsichtsmaßnahmen gegen äußere Kapazitätsänderungen.

Um schädlichen Kapazitätsänderungen beim Einbringen von Eisendrähten in die Spule vorzubeugen, wurde nach Falkenberg¹⁾ in die Spule L (Fig. 1) ein Schutzgefäß aus Glas mit doppelten Wänden, zwischen denen sich verdünnte Schwefelsäure befand, gebracht; auf diese Weise führte sogar die Ausfüllung des Gefäßinneren mit Wasser oder das Einbringen eines Stücks Drahtlitze keine nennenswerte Änderung der Schwebungszahl mit sich.

Da geringste Verschiebungen von Zuführungsdrähten u. a. bereits bedeutende Kapazitäts- bzw. Selbstinduktionsänderungen verursachten, waren alle Teile aufs sorgfältigste befestigt und womöglich (z. B. Spulenwickelungen) mit Wachs angeklebt.

Die Verstellung der Glasplatte des Kompensationssystems erfolgte mittels eines Glasstabes von ca. 2 m Länge, dessen anderes Ende, mit einem Nonius versehen, an einer besonderen Skala vorbeiglitt. Da auf diese Weise der Beobachter sich von der Einrichtung nicht näher als 2 m befand, war ein besonderer elektrostatischer Schutz der Einrichtung überflüssig. Das Tönen des Telephons, dank der Anwendung eines Schallrohres, war durch das ganze Zimmer gut hörbar.

§ 6. Bestimmung von Wellenlängen und von wirkenden Kapazitäten.

Die Wellenlängen λ für $\lambda \geq 100$ m wurden mit einem Präzisionswellenmesser von Marconi & Co. mit einem Schleifer gemessen. Für $\lambda < 100$ m bedienten wir uns folgender Methode. Zwei Röhrengeneratoren erzeugen einen besonders deutlichen Schwebungston im Telephon, wenn die Wellenlängen λ_i des einen Generators annähernd gleich ganzen Vielfachen derjenigen Λ des anderen werden, d. h. wenn $\lambda_i = i\Lambda$ ist. Dann ist aber auch $\lambda_{i+\kappa} - \lambda_i = \kappa\Lambda$, wo κ eine ganze Zahl ist, $\lambda_i, \lambda_{i+1}, \dots, \lambda_{i+\kappa}$ die aufeinander folgenden Wellenlängen, bei denen ein lauter Schwebungston erfolgt, und Λ die zu messende Wellenlänge bedeuten. Die λ_i können immer > 100 m (also mit Wellenmesser meßbar) gewählt und κ einfach gezählt werden (bei allmählicher Vergrößerung der ent-

1) G. Falkenberg, Ann. d. Phys. 61. S. 167. 1920.

sprechenden Kapazität), so daß A , dessen Größe auch roh nach der Thomsonschen Formel geschätzt werden kann, numerisch ausgedrückt werden kann.

Außerdem wurde in manchen Fällen auch ein besonders konstruierter Wellenmesser für kleine Wellenlängen angewandt.

Die Kapazitätsbestimmung wurde folgendermaßen ausgeführt: es seien C_k und L (in Zentimeter) die unbekannte Kapazität und Selbstinduktion, die die Wellenlänge $\lambda_k = 2\pi\sqrt{LC_k}$ bewirken. Dann erhielten wir durch Parallelschaltung einer bekannten Kapazität $\mathfrak{Z}$ eine neue Wellenlänge $\lambda = 2\pi\sqrt{Z(C_k + \mathfrak{Z})}$, so daß: $C_k = \mathfrak{Z} \cdot \lambda_k^2 / (\lambda^2 - \lambda_k^2)$.

Fig. 2.

Durch Veränderung von $\mathfrak{Z}$ erhält man eine Reihe von C_k -Werten, deren Mittel als Kapazitätswert angesehen wird. Die wahrscheinlichen Fehler übersteigen dabei nicht 2 Proz. Unter Verwendung vom logarithmischen Maßstab sind die (C_k, L_k) -Kurven gerade Linien (Fig. 2), denen die C -Werte bequem entnommen werden können.

§ 7. Bestimmung der magnetischen Feldstärke.

Mittels eines Quadrantenelektrometers kleiner Kapazität in idiostatischer Schaltung wurde die effektive Potentialdifferenz V an den Klemmen der Kapazität C (Fig. 1) gemessen. Dann erhalten wir unter Voraussetzung einer konzentrierten Kapazität für die mittlere Stromstärke J in der Spule L (pro Viertelperiode):

$$J = \frac{4\sqrt{2}VC}{T} = \frac{4\sqrt{2}CV}{\lambda} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ el.-m. Einh.}$$

Dann berechnet sich die zeitlich-mittlere Feldstärke H für die Mitte der Spule mittels der Spulenkonstanten (Tab. I) und der bekannten Formel¹⁾ zu wenigen Hundertstel Gauss, wie ein Beispiel für die Spule A zeigt (Tab. II).

Tabelle II.

λ m	170	300	600	1000
Heizung E Volt . .	4	3,5	3,5	4
V Volt	< 1,2	< 1,2	1,2	< 1,2
C cm	78	254	1000	3160
$H \cdot 10^2$ Gauss . . .	< 0,9	< 1,7	3,3	< 6,2

Die Feldstärke des pulsierenden Zylinderstromes überstieg nicht die Größe von wenigen Tausendstel Gauss.

§ 8. Die Messungen.

Das Kompensationssystem wurde mit Genauigkeit von 0,1 mm, Skala auf minimale Zahl der Schwebungen zweiter Art (§ 2) pro Sekunde gestellt („erste Nullbestimmung“). Darauf wurden die Eisendrähte in die Spule gebracht (wobei der Beobachter aus einer Entfernung von 3–4 m zur Anordnung trat und sich darauf wieder entfernte); es erfolgte die „Arbeitsablesung“. Nach wiederholiger Entfernung der Drähte erfolgte die „zweite Nullbestimmung“. Als „Null“ wurde das Mittel aus beiden Nullstellungen betrachtet, wodurch das langsame Kriechen der Nullstellung unschädlich gemacht wurde. Das Verfahren wird durch die Tab. III erläutert (Beispiel des Protokolls), wo in erster und zweiter Spalte unter 0 — die aufeinanderfolgenden Nullstellungen und unter + — die Arbeitsstellungen angegeben sind; in dritter Spalte sind die „Nullen“, in vierter — die „Ablesungen“ angegeben. Die Mittel (Spalten drei und vier, unten) geben die mittlere Nullstellung und die mittlere Ablesung an, womit mit Hilfe des Kompensationsdiagrammes der Wert $-\Delta C$ bestimmt wurde,

1) Vgl. z. B. F. Kohlrausch, Lehrb. prakt. Physik, 11. Aufl. S. 518.

Tabelle III.

0	145,9			$d = 0,043 \text{ mm}$ $\lambda = 54 \text{ m}$ $-\Delta C = 0,061 \text{ cm}$ $C = 229 \text{ cm}$ $[\mu] = 1 + \frac{0,061}{229} \cdot \frac{1740}{87 \cdot 10^{-4}}$ $= 54,3$
+	130,6	145,0	14,4	
0	144,0			
+	129,2	143,3	14,1	
0	142,6			
+	128,4	142,3	13,9	
0	142,0			
0	141,8			
+	126,4	140,9	14,5	
0	140,0			
+	125,5	139,8	14,3	
0	139,5			
+	125,1	139,4	14,3	
0	139,3			
Mittel:		141,8	14,3	

der die Selbstinduktionsänderung ΔL kompensiert. Dann haben wir:

$$L + \Delta L = L + ([\mu] - 1) \frac{q}{S} L,$$

wo $[\mu]$ die noch mit Schirmwirkung der Wirbelströme behaftete Permeabilität, q und S die Querschnitte der Eisenstränge bzw. der Spule bedeuten. Daraus und aus Gl. (1) § 2 erhalten wir:

$$\frac{\Delta L}{L} = - \frac{\Delta C}{C} = \frac{q}{S} ([\mu] - 1)$$

und

$$[\mu] = 1 + \frac{S}{q} \frac{(-\Delta C)}{C}.$$

Nach dieser Formel ist auch die Rechnung in der Tab. III ausgeführt worden.

Die Permeabilität $[\mu]$ ist kleiner als die „echte“ Permeabilität in erster Linie wegen der Schirmwirkung der Wirbelströme; die von der Wirbelstromwirkung befreite Permeabilität bezeichnen wir mit „ μ “. Da haben wir nach Zenneck¹⁾

$$1) \quad [\mu] = \frac{\mu}{1 + \left(\frac{w'}{w}\right)^2 + \left(\frac{v p}{w}\right)^2},$$

wo w — der statische und w' — der dynamische magnetische Widerstand, v — die Kreisfrequenz und p — die magnetische

1) J. Zenneck, Ann. d. Phys. 9, S. 497. 1902.

Selbstinduktion bedeuten. Nach den Kurven von Zenneck¹⁾, die die Größen w'/w und rp/w in Abhängigkeit von dem Parameter

$$\alpha = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\pi \mu'' \sigma \nu}{2}} \text{ el.-m. E.}$$

darstellen (d der Durchmesser und σ die Leitfähigkeit des Drahtes) wurde die Funktion

$$\sqrt{\left(\frac{w'}{w}\right)^2 + \left(\frac{rp}{w}\right)^2}$$

graphisch dargestellt. Damit konnte nach den gemessenen $[\mu]$ -Werten die von den Wirbelströmen befreite Permeabilität „ μ “ durch Probieren ermittelt werden. Da wir es mit Anfangspermeabilität, die als unabhängig von kleinen Änderungen der Feldstärke betrachtet werden kann²⁾, zu tun haben, trägt dieses Verfahren wohl kein Bedenken.

Im ganzen wurden zur Erforschung des Intervalls von $\lambda = 705$ m bis $\lambda = 54$ m vier Spulenpaare angewandt; die dazu bezüglichen Punkte sind in der Fig. 4 verschieden markiert worden.

§ 9. Prüfung möglicher Fehlerquellen.

1. Die mögliche Wirkung der Ungleichförmigkeit des Feldes in den Spulen wurde dadurch geprüft, daß die Eisendrähte abwechselnd in die Mitte und an der Peripherie des Spuleninneren angebracht wurden; es ergaben sich aber dabei merklich dieselben Resultate. Auch wurden in den weiter unten beschriebenen Messungen in enger Spule nahe dieselben Permeabilitätswerte erhalten.

2. Es wurde nach der § 4 angegebenen Methode die Dielektrizitätskonstante des Glases im Kompensationssystem untersucht; dabei ergab sie sich im betrachteten Wellenlängenbereiche merklich konstant.³⁾

3. Obertöne, die mittels Wellenmessers mit Schleifer (also ohne Verstärker) beobachtet werden könnten, waren nicht vorhanden.

1) J. Zenneck, Ann. d. Phys. 11. S. 1135. 1903.

2) Vgl. Lord Rayleigh, Phil. Mag. 23. S. 225. 1887; E. Gumlich und Rogowski, Ann. d. Phys. 84. S. 235. 1911.

3) Vgl. R. Jäger, Ann. d. Phys. 53. S. 409. 1917.

4. Bei der Länge der Eisendrähte von 15 cm und bei der Stärke weniger als 0,01 cm war wohl keine entmagnetisierende Wirkung der Enden zu befürchten; Drähte von 10 cm Länge ergaben dieselben Resultate, wie die längeren.

5. Um die Nullverschiebung möglichst herabzusetzen, war es erforderlich, daß die Akkumulatoren auf dem stabilen Teile der Entladungskurve arbeiteten, und daß die Röhren etwa eine Stunde vor dem Beginn der Messungen angezündet wurden; dazu waren die letzteren noch mit Baumwollkappen versehen. Jede Erschütterung, sowie jeder Luftzug waren zu vermeiden.

§ 10. Die Resultate.

Die Eisendrähte, entnommen den Drahtringen, die früher bei der Untersuchung der magnetischen Viskosität angewandt wurden, hatten eine Länge von 15 cm und wurden auf Glas-

Fig. 3.

stäben mit wenig Siegelack (ohne metallische Verbindung miteinander) in einer Anzahl von 4—6 angeklebt. Die drei dünnsten waren in CO_2 ausgeglüht. Die vier untersuchten Proben (aus einem Stück gezogen) sind in Tab. IV beschrieben; ihre Permeabilität für konstante Felder ist in der Fig. 3 dargestellt.

In der Tab. V — VIII sind sämtliche gemessenen und berechneten Größen zusammengestellt, mit deren Hilfe die Permeabilitäten $[\mu]$ und „ μ “ ermittelt wurden. Das

Zennecksche Parameter α ist zwecks technischer Bequemlichkeit für „ μ “ = 100 berechnet worden.

Die zufälligen wahrscheinlichen Fehler der Messungen von ΔC betragen nicht mehr als 0,3 Proz. (vgl. § 8); die Fehler bei der Bestimmung von C betragen nicht mehr als 2 Proz. Dabei verschwinden die möglichen Fehler im Kapazitäts-etalon gänzlich, da in der Formel nur das Verhältnis der

Tabelle IV.

Drahtprobe	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
Anzahl der Drähte	6	5	5	4
Durchmesser d mm	0,043	0,052	0,082	0,097
Querschnitt $q \cdot 10^4$ mm ²	87,1	106	264	294
Leitfähigkeit $\sigma \cdot 10^6$ el.-m. Einheiten	6,59	6,29	6,76	7,70

Kapazitäten vorkommt. Die Fehler in den Wellenlängen sind auch von der Größe von ca. 2 Proz. Da die Fehler in der Messung der Draht- und Spulenquerschnitte verschwindend klein sind, so sind auch die $[\mu]$ -Werte bis auf 2–2½ Proz. genau.

Fig. 4.

Die Kurven der Fig. 4 stellen die Abhängigkeit der Permeabilität $[\mu]$ von der Wellenlänge λ dar. Bemerkenswert ist der Verlauf von $[\mu]$ in der Nähe von $\lambda = 100$ m, wo sich ein scharfes Maximum zwischen zwei Minimis recht deutlich zeigt. Die Kurve ähnelt derjenigen des optischen Brechungsindex in der Absorptionsbande. Weiter sind die zu den Maximis gehörigen Wellenlängen nicht ganz identisch, was schwerlich

auf die Beobachtungsfehler zurückzuführen ist, da alle Drähte in einem Zuge gemessen wurden. Führt man Korrekturen auf Wirbelströme ein, so wird der anormale Verlauf noch deutlicher (vgl. Fig. 5), und die Kurven für verschiedene Draht-

Fig. 5.

Tabelle V.

Draht Nr. 1. $d = 0,043$ mm.

z	C	$-\Delta C$	Spule	$m = \frac{S}{q} 10^{-4}$	$[\mu]$	α	$„\mu“$
705	1486	0,550	A	32,9	122,8	0,358	125,3
550	895	0,333	A	..	123,2	0,405	126,5
538	863	0,321	A	..	123,2	0,410	126,5
349	347	0,117	A	..	112,0	0,508	119,0
305	265	0,086	A	..	108,0	0,544	117,0
227	143	0,041	A	..	96,0	0,631	108,0
217	320	0,133	B	22,81	95,6	0,646	109,0
184	214	0,082	B	..	88,3	0,700	103,0
170	78	0,019	A	32,9	81,1	0,729	95,0
170	442	0,248	D	14,9	85,6	0,729	103,0
157	374	0,202	D	..	81,2	0,756	98,0
149	335	0,162	D	..	74,1	0,776	89,0
120	93	0,028	B	22,81	69,6	0,867	89,0
120	234	0,109	D	14,9	70,2	0,867	90,0
118	216	0,100	D	..	70,2	0,874	91,0
112	199	0,098	D	..	74,2	0,897	104,0
105	176	0,099	D	..	85,0	0,928	147,0
100	162	0,098	D	..	92,1	0,950	178,0
91	147	0,070	D	..	71,8	0,955	118,0
90	571	0,131	C	20,0	46,8	1,00	56,5
80	456	0,090	C	..	40,4	1,06	48,5
67	341	0,090	C	..	53,7	1,15	89,5
54	229	0,061	C	..	54,3	1,29	115,5

Tabelle VI.

Draht Nr. 2. $d = 0,052$ mm.

λ	C	$-\Delta C$	Spule	$m = \frac{S}{q} 10^{-4}$	$[\mu]$	κ	μ''
705	1486	0,368	A	27,05	67,9	0,423	68,7
550	895	0,223	A	..	68,4	0,477	69,7
538	863	0,211	A	..	67,1	0,483	68,9
305	265	0,062	A	..	64,3	0,643	68,9
227	143	0,0315	A	..	60,5	0,745	66,4
217	320	0,093	B	18,72	55,5	0,762	60,0
184	214	0,0611	B	..	54,4	0,826	61,2
170	78	0,0148	A	27,05	52,3	0,860	59,3
120	93	0,021	B	18,72	43,3	1,02	51,8
112	199	0,072	D	12,3	45,5	1,06	57,0
100	162	0,061	D	..	47,9	1,12	68,0
91	135	0,070	D	..	63,5	1,178	134,0
90	571	0,107	C	16,41	31,8	1,18	37,7
80	456	0,054	C	..	20,4	1,25	27,0
67	341	0,063	C	..	31,4	1,36	42,7
54	229	0,043	C	..	31,8	1,53	55,8

Tabelle VII.

Draht Nr. 3. $d = 0,082$ mm.

λ	C	$-\Delta C$	Spule	$m = \frac{S}{q} 10^{-4}$	$[\mu]$	κ	μ''
550	895	0,438	A	10,85	54,1	0,782	59
538	863	0,414	A	..	53,1	0,792	58
305	265	0,104	A	..	42,8	1,05	52
227	143	0,0455	A	..	35,5	1,22	46
217	320	0,1406	B	7,52	34,1	1,25	44
184	214	0,085	B	..	30,8	1,35	41
170	78	0,021	A	10,85	30,3	1,41	43
120	93	0,030	B	7,52	25,25	1,67	42
112	199	0,102	D	4,97	31,3	1,73	70
100	162	0,087	D	..	27,6	1,83	60
90	571	0,150	C	6,60	18,65	1,94	31
80	456	0,097	C	..	13,9	2,05	19
67	341	0,106	C	..	21,5	2,23	53
54	229	0,088	C	..	20,57	2,49	60

stärken werden in ihrem Verlauf fast identisch, soweit es sich um die relative Größe der Maxima gegenüber den Werten für große λ handelt. Diese letzteren stimmen mit den Werten für schwache konstante Felder, soweit sie durch Extrapolation

Tabelle VIII.
Draht Nr. 4. $d = 0,097$ mm.

λ	C	$-\Delta C$	Spule	$m = \frac{S}{q} 10^{-4}$	$[\mu]$	π	m/t''
550	895	0,447	A	9,76	49,7	0,987	61,5
538	863	0,418	A	"	49,5	0,997	60,5
305	265	0,098	A	"	37,1	1,324	56,5
217	320	0,130	B	6,76	28,5	1,59	48,5
184	214	0,080	B	"	26,3	1,70	46,5
170	78	0,0187	A	9,76	24,4	1,77	43,5
120	93	0,028	B	6,76	21,3	2,11	47,5
120	234	0,114	D	4,38	22,3	2,11	52,0
112	199	0,100	D	"	23,1	2,18	59,0
100	162	0,097	D	"	27,2	2,32	88,0
90	571	0,148	C	5,93	16,4	2,44	37,5
80	456	0,096	C	"	13,4	2,58	28,0
67	341	0,103	C	"	18,0	2,82	58,5
54	229	0,068	C	"	18,6	3,15	74,5

aus den Kurven Fig. 3 gewonnen werden können¹⁾, gut überein.

§ 11. Prüfung der Resultate nach anderen Methoden.

Das Hauptresultat — die auffallende Form der Permeabilitätskurve bei $\lambda \approx 100$ m — wurde wegen seiner prinzipiellen Bedeutung nach drei verschiedenen Methoden geprüft, wobei wiederum ungedämpfte Schwingungen angewandt wurden.

A. Bei der ersten Prüfmethode wird wiederum die durch Einbringen eines Bündels Eisendrähte (20 Drähte $d = 0,097$ mm) in die Selbstinduktionsspule L (Fig. 6) (eine enge Spule $l=15$ cm, $d = 0,9$ cm, mit 45 Windungen Drahtlitze) bewirkte Selbstinduktionsänderung ΔL durch entsprechende Kapazitätsänderung ($-\Delta C$) kompensiert; nur wird die Resonanz mittels des Thermoelements T und des Galvanometers G festgestellt. In der Fig. 6 bedeutet I ein Röhrengenerator, II den damit lose²⁾ verbundenen Schwingungskreis mit Spule L und zwei Koppelungswindungen L' . Bedeutet nun S den Querschnitt der Spule L und q denjenigen der Eisendrähte, L und L' die

1) Wegen Mangel des Materials wurden keine direkten Messungen der Anfangspermeabilität in konstanten Feldern angestellt.

2) Um das „Ziehen“ zu vermeiden.

Selbstinduktion von Spulen L und L' und C die Kapazität des Schwingungskreises, so haben wir analog dem § 8:

$$[\mu] = 1 + \frac{(-\Delta C)}{C} \cdot \frac{L + L'}{L} \cdot \frac{S}{q}.$$

Die auf dem Diagramm Fig. 6 dargestellte Kurve, aufgenommen nach dieser Methode (für Feldstärke $H = 0,08$ Gauss), zeigt im allgemeinen dieselbe Form, wie die Grundkurven Fig. 4.

Fig. 6.

B. In der zweiten Methode wurde die Erwärmung des Eisendrahtes wie in den Messungen von Klemenčič gemessen.¹⁾ Im Resonanzkreis II (Fig. 7), der mit dem Röhrengenerator I gekoppelt war, befanden sich zwei gleich lange, in Serie geschaltete Drähte: aus Platin Pt ($d = 0,10$ mm) und aus Eisen Fe ($d = 0,097$ mm). Zwei Thermoelemente, T_2 und T_1 , mittels Tröpfchen Wachs auf den Drähten, isoliert von diesen, befestigt, konnten abwechselnd mit dem Galvanometer verbunden werden, wodurch die Erwärmung der Drähte gemessen werden konnte. Bezeichnen wir die Ausschläge für Pt und Fe mit α_2 und α_1 , so haben wir mit genügender Annäherung:

$$(1) \quad \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = A \cdot \frac{i^2 r_1}{i^2 r_2} = A \cdot \frac{w_1}{w_2} \left(0,997 \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\pi \nu \mu \sigma}{2}} + 0,277 \right),$$

wo A ein konstanter Faktor, i Stromstärke in den Drähten, r_1 und r_2 die dynamischen, w_1 und w_2 die statischen Widerstände der Fe- und Pt-Drähte bedeuten. Nun ist aber $r_2 \approx w_2$; die Messung mit Gleichstrom ergab für $A w_1/w_2$ den Wert 1,04.

1) I. Klemenčič, Ann. d. Phys. 50. S. 456. 1893.

Der Verlauf von „ μ “ nach Gl. (1) berechnet, ist in Fig. 7 als Kurve C dargestellt, wo ein schwaches Maximum bei $\lambda = 102$ m ersichtlich ist; zum Vergleich ist noch die $[\mu]$ -Kurve angegeben (C'), die mittels (1) § 8 berechnet ist. Die Schwäche des Maximums wird von uns der verhältnismäßig großen Feldstärke zugeschrieben, die, nach der gewöhnlichen Formel $H = 4i/d$ bestimmt, (i Stromstärke, d Drahtdurchmesser), etwa 10 Gauss betrug.

Fig. 7.

Fig. 8.

C. Bei der dritten Methode war ein System aus 10 Eisendrahten von 23 mm Länge und 0,043 mm Stärke im Wechsel-felde einer Doppelspule Z (Fig. 8) auf einem Quarzfaden aufgehängt; der Spulendurchmesser betrug 33 mm, die gegenseitige Entfernung der beiden Spulenhälften (jede mit 4 Windungen) 5 mm. Es wurde mittels Spiegel (auf dem Drahtsystem befestigt) und Fernrohr die Ablenkung aus der Ruhelage des Systems (45° gegen die Spulennachse) beobachtet, die die Wechselfeldwirkung verursachte. Um die Wirkung des pulsierenden Anodenstroms auszuschließen, war die Doppelspule in den Kapazitätszweig des Röhrengenerators eingeschaltet (vgl. Fig. 8). Da der Spulenstrom mittels des Thermoelements T und des Galvanometers G gemessen und mittels Regulierung der Heizung auf einige Promille konstant

gehalten werden konnte, waren die (kleinen) Ablenkungen bei verschiedenen Wellenlängen der Größe $[\mu]$ proportional. Die erhaltenen Kurven, D und D' , in der Fig. 8 für $H = 0,88$ bzw. $0,81$ Gauss zeigen auch hier den bei anderen Methoden beobachteten Verlauf; sie sind in willkürlichem Maße angegeben.

§ 12. Schluß.

So zeigen vier verschiedene Methoden¹⁾ übereinstimmend, daß die Permeabilität — und besonders die Anfangspermeabilität — des Eisens im Wellenlängenintervall von $\lambda = \text{ca. } 300$ bis $\lambda = 54 \text{ m}$ nicht konstant ist und daß in der Nähe von $\lambda = 100 \text{ m}$ der Verlauf der „ μ “-Kurve demjenigen des optischen Brechungsindex in der Absorptionsbande ähnelt. Dagegen kann die Permeabilität „ μ “ im Intervall von $\lambda = 300 \text{ m}$ bis $\lambda = 705$ als merklich konstant gehalten werden. Die „Absorptionsbande“ selbst ist in schwachen Feldern deutlicher, als in stärkeren.

Es erweist sich ein Parallelismus zwischen dem Verhalten des Eisens und demjenigen der Dielektrika in Wechselfeldern, das von Drude, Weichmann²⁾, Iwanow³⁾ und anderen untersucht wurde. Vom Standpunkt der Arkadiewschen Theorie⁴⁾ der Eigenschwingungen von Elementarmagneten könnten die beobachteten Tatsachen durch Annahme solcher Eigenperioden von der Dauer einiger Zehnmilliontel der Sekunde gedeutet werden; dies würde auch das Phänomen der magnetischen Viskosität erklären. Doch würde eine folgerichtige Durchführung der Anschauung wahrscheinlich auf große Schwierigkeiten stoßen.

1) Die Grundmethode hat vor den drei übrigen den Vorzug größerer Genauigkeit und Bequemlichkeit; sie läßt sehr kleine Feldstärken zu und verlangt wenig Material (Eisen). Doch verlangt die Anordnung viel Sorgfalt. Die Prüfmethode A ist weniger genau und mehr zeit- und materialraubend; auch läßt sie keine allzu kleine Feldstärke zu, obwohl innerhalb gewisser Grenzen die Feldstärke leicht variiert werden kann. Diese Methode eignet sich gut für technische Zwecke. Die Methode B ist wenig genau und läßt keine schwachen Felder zu.

2) R. Weichmann, *Physik. Zeitschr.* 22. S. 535. 1921.

3) K. Iwanow, *Ann. d. Phys.* 65. S. 481. 1921.

4) W. Arkadiew, *Physik. Zeitschr.* 14. S. 928. 1913; *Ann. d. Phys.* 65. S. 643. 1921.

Endlich ist noch zu betonen, daß vom Standpunkt der Arkadiewschen Theorie auch die Größe „ μ “, obwohl befreit von Wirbelströmen, doch nur „scheinbare“ Permeabilität bedeutet, da sie eine Funktion der wahren Permeabilität und der „magnetischen Leitfähigkeit“ ist.

Zusammenfassung.

1. Es wurde eine Anordnung zur Messung der magnetischen Permeabilität in sehr schwachen ungedämpft-oszillierenden Feldern im Wellenlängenintervall von 54—705 m ausgearbeitet.

2. Es wurden drei andere Methoden für denselben Zweck angegeben. Davon sind die zwei ersten zur quantitativen, die letztere zur qualitativen (relativen) Messung geeignet.

3. Es wurde gefunden, daß die magnetische Permeabilität im Wellenlängenintervall von etwa 300—54 m nicht konstant ist, sondern einen ziemlich verwickelten Verlauf zeigt.

4. In der Nähe der Wellenlänge $\lambda \approx 100$ m ähnelt der Verlauf der Kurve der Permeabilität demjenigen der Kurve des optischen Brechungsexponenten innerhalb der Absorptionsbande.

5. Das letztere Resultat wird durch alle vier Methoden bestätigt.

Zum Schluß sprechen wir unseren herzlichen Dank aus an den Hrn. Professor W. Arkadiew für sein reges Interesse gegenüber der vorliegenden Untersuchung, sowie auch für die Gewährung der Mittel, die von der Wissenschaftlichen Kommission der wissenschaftlich-technischen Abteilung des Obersten Volkswirtschaftsrates, von dem Moskauer Institut für Holzindustrie und dem Methodologischen Institut erhalten wurden; diesen Anstalten, sowie auch dem Moskauer Militär-Radiolaboratorium, von welchem einige Apparate erhalten wurden, sind wir auch unseren innigsten Dank schuldig.

Moskau, Physik. Inst. d. Universität, Januar 1922.

(Eingegangen 24. März 1922.)