8. *Über den Widerstand von Spulen für schnelle elektrische Schwingungen; von Thomas P. Black.*

(Aus der Straßburger Dissertation des Verfassers.)

A.

Bei ihrer Untersuchung der oszillatorischen Entladung von Kondensatorkreisen haben Battelli und Magri¹⁾ den Widerstand von aufgespulten Drähten bei schnellen Wechselströmen bestimmt und gefunden, daß der Widerstand höher ist als der Widerstand derselben Drähte, wenn sie geradlinig gestreckt sind. Sie haben die Erscheinung auch richtig interpretiert. Ihre Spulen hatten sehr geringen Drahtradius und sehr kleine Ganghöhe, wie man sie wohl nur zu ganz speziellen Zwecken verwendet. Andere experimentelle Untersuchungen liegen mit Ausnahme einer von F. Dolezalek²⁾, die sich nur auf Wechselzahlen bis 5000 pro Sekunde bezieht, und einiger wenigen Angaben von K. E. F. Schmidt³⁾ nicht vor.

Theoretisch behandelt wurde der Widerstand von Spulen durch M. Wien⁴⁾ und A. Sommerfeld.⁵⁾ Die Theorie von Wien aber zieht nur den Fall verhältnismäßig langsamer Schwingungen in Betracht, während Sommerfeld seine Untersuchung auf beliebig hohe Wechselzahlen ausdehnt, wie sie etwa in der drahtlosen Telegraphie Verwendung finden. Er substituiert in seiner Arbeit, welche, wie das Folgende zeigen wird, die Verhältnisse in fast allen Beziehungen *qualitativ* richtig wiedergibt, für die praktisch gebrauchten Spulen endlicher Länge und Ganghöhe unendlich lange Röhren mit zyklischer Strömung. Dadurch erreicht er den großen Vorteil, daß eine exakte mathematische Behandlung nicht auf extreme

1) A. Battelli u. L. Magri, Phil. Mag. 5. p. 19. 1903.

2) F. Dolezalek, Ann. d. Phys. 12. p. 1142. 1903.

3) K. E. F. Schmidt, Abhandl. d. phys. Gesellsch. Oktober 1904.

4) M. Wien, Ann. d. Phys. 14. p. 1. 1904.

5) A. Sommerfeld, Ann. d. Phys. 15. p. 673. 1904.

mathematische Schwierigkeiten führt. Auf der anderen Seite aber liegt es im Wesen der Sache, daß seine Theorie einen Einfluß von Spulenlänge und -ganghöhe nicht ergeben kann: daß sie die Werte des Widerstandes nicht *quantitativ* richtig liefert, hat Sommerfeld selbst an der Hand der experimentell ermittelten Werte von Battelli und Magri festgestellt. Unter diesen Umständen schien eine systematische experimentelle Untersuchung, die einen Überblick über die Verhältnisse bei schnellen Schwingungen geben sollte, von Wert.

I. Methode der Untersuchung.

Die Methode der Untersuchung ist die folgende: Der effektive Widerstand w der Längeneinheit einer Leitung bei Schwingungen sei dadurch definiert, daß $w \int_0^{mT} i^2 dt$ die Wärmemenge ist, die während m voller Perioden T in der Längeneinheit der Leitung entwickelt wird, wenn i der gesamte Strom ist, welcher zur Zeit t den Leitungsquerschnitt q durchfließt: d. h. wenn $i = \int_q \mathfrak{S} dq$ ($\mathfrak{S}$ = Strömung) ist.

Setzt man in denselben Schwingungskreis einen geraden Draht und eine aus demselben Draht gewickelte Spule, so verhalten sich demnach die in einer gewissen Zeit entwickelten Wärmemengen zueinander wie der effektive Widerstand der Spule zu dem effektiven Widerstand des geraden Drahtes.

Das heißt es ist

$$(1) \quad \frac{Q_s}{Q} = \frac{\int_0^{mT} w_s \cdot l_s \cdot i^2 \cdot dt}{\int_0^{mT} w \cdot l \cdot i^2 \cdot dt} = \frac{w_s \cdot l_s}{w \cdot l},$$

worin Q_s die in der Spule entwickelte Wärmemenge, w_s den effektiven Widerstand pro Längeneinheit des Spulendrahtes, l_s die Drahtlänge der Spule bedeuten, und Q , w , l die entsprechende Bedeutung für den geraden Draht haben. Werden Spule und gerader Draht je in ein Kalorimeter gebracht, so entspricht der Wärmemenge Q_s ein gewisser Ausschlag α_s , der Wärmemenge Q ein Ausschlag α . Die Aufgabe ist

dann, aus diesen Ausschlägen das Verhältnis $Q_s:Q$ zu bestimmen.

Man verfährt am besten in folgender Weise: Man schickt Gleichstrom durch die Spule und den geraden Draht und reguliert durch Abzweigung die Ströme in beiden so, daß man in derselben Zeit dieselben Ausschläge α_s und α und demnach auch dieselben Wärmemengen Q_s und Q wie früher, als die Spule und Draht von demselben oszillatorischen Strom durchflossen waren, erhält. Dann ist

$$(2) \quad \frac{Q_s}{Q} = \frac{i_s^2 w_s}{i^2 w},$$

wenn i_s der Strom in der Spule, i derjenige im geraden Draht, und w_s bez. w die Gleichstromwiderstände der Spule und des geraden Drahtes sind. Das Verhältnis $w_s:w$ ergibt sich also, sobald man die Gleichströme i_s und i und die Gleichstromwiderstände w_s und w bestimmt hat. Der prinzipielle Vorteil der Methode liegt darin, daß sie keinerlei Korrekturen erfordert.

II. Versuchsanordnung.

Die *Kalorimeter*, im wesentlichen Riesssche Luftthermometer, bestanden aus zwei Glasröhren, in welche die Spule und der gerade Draht luftdicht eingekittet waren. Jede dieser Glasröhren stand durch Gummischlauch in Verbindung mit einem Alkoholmanometer, das in eine Kapillarröhre endete. Die zwei Kapillarröhren lagen nahe beieinander, um einen kleinen Winkel gegen die Horizontale geneigt. Mittels eines Fernrohres und einer vor den Kapillaren angebrachten Skala wurde die Änderung des Luftdruckes in den Röhren abgelesen. Die Röhren wurden in Watte eingebettet und die Versuche wurden in einem Kellerraum ausgeführt, wo die Temperatur ziemlich konstant war.

Um den Einfluß einer äußeren Druckänderung, der besonders bei starken Winden sehr störend werden kann, zu vermeiden, wurden die Kapillaren in Verbindung mit einem Glasgefäß gesetzt, welches während der Messung mittels eines Hahnes verschlossen wurde.

Die *Spulen*, deren Widerstand bestimmt wurde, waren auf Ebonitröhren mit eingeschnittenen Gewinden sorgfältig ge-

wickelt. Ihre Drahtlänge war vor dem Aufwickeln und nach dem Abwickeln gemessen und das Mittel daraus als Drahtlänge der Spule (l_s . Gl. (1)) angenommen.

Der Schwingungskreis ist in Fig. 1 schematisch gezeichnet.

AB ist die Spule, deren Widerstand w_s bestimmt werden soll. DE ist der gerade Draht. GH ist eine veränderliche Selbstinduktion, durch die man die Wechselzahl des Kreises

Fig. 1.

regulieren kann. C_1, C_2 sind Kondensatoren, Leidener Flaschen aus englischem Flintglas. F ist eine Funkenstrecke aus Zinkkugeln von 1,5 cm Durchmesser. I ist ein Induktor.

Der Induktor wurde meist mit Gleichstrom und Deprezunterbrecher betrieben (Entladungszahl ca. 50), bei großen Kapazitäten mit Wechselstrom der Zentrale beschickt (Wechselzahl = 100/Sek.).

Den Gleichstromkreis, der zur Bestimmung von $Q_s:Q$ nach Gleichung (2) diene, zeigt Fig. 2 in schematischer Darstellung.

Fig. 2.

AB und DE sind wie in Fig. 1 Spule und gerader Draht. KL ist ein veränderlicher Widerstand, durch den man den

Strom, der durch den geraden Draht DE fließt, regulieren kann. MN und PR sind Normalwiderstände aus Konstantan. ST ist ebenfalls ein veränderlicher Widerstand in dem Hauptstromkreise.

Legt man in bekannter Weise¹⁾ ein empfindliches Galvanometer (benutzt wurde ein Deprez-d'Arsonvalgalvanometer von Hartmann & Braun mit direkter Ablesung) mit hohem Vorschaltwiderstand der Reihe nach als Nebenschluß zu MN , AB , PR und DE , so erhält man das gesuchte Verhältnis $i_s^2 w_s : i^2 w$ (Gleichung (2)). Bei der Ausführung der Messungen wurde mit Rücksicht auf praktische Bedürfnisse der Normalwiderstand PR (Fig. 2) in dem Nebenzweig mit KL eingeschaltet. Prinzipiell ist dadurch nichts geändert.

Der Gang einer Messung war der folgende: Zuerst wurde durch Änderung der Kapazität (C_1 , C_2 , Fig. 1) und Selbstinduktion (GH , Fig. 1) der Schwingungskreis in Resonanz gebracht mit einem Normalschwingungskreis, dessen Wechselzahl bekannt war. Wenn die Manometer zeigten, daß alles im Wärmegleichgewicht war, wurde der Induktorstrom eine bestimmte Zeit geschlossen. Diese Zeit war niemals länger als 1,5 Min. und nur ausnahmsweise länger als 1 Min. Nachdem der Strom unterbrochen war, wurden die Ausschläge in den Kapillarröhren abgelesen. Dann wartete man, bis alles wieder im Wärmegleichgewicht war, und machte eine weitere Beobachtung in derselben Weise. Nachher wurde die Anordnung Fig. 2 hergestellt, Gleichstrom durch die Spule und den geraden Draht geschickt, und die Widerstände so reguliert, daß man dieselben Ausschläge in den Kapillaren in derselben Zeit erhielt, wie sie früher beobachtet waren. Dieses Regulieren der Widerstände, das auf den ersten Blick sehr umständlich zu sein scheint, geht, wenn man erst einige Übung erlangt hat, sehr rasch vonstatten. Schließlich wurde mittels der Normalwiderstände in dem Kreise und des Galvanometers das gesuchte Verhältnis $i_s^2 w_s : i^2 w$ (Gleichung (2)) bei demselben Strom bestimmt.

1) F. Kohlrausch, Prakt. Physik p. 388.

Tabelle I.
Resultate der Messungen.

Spule	Durchmesser des Drahtes in cm	Ganghöhe in cm	Länge der Spule in cm	Äußerer Durch- messer der Spule in cm	w_s/w		Korrektionsfaktor für die aus der Sommerfeldschen Theorie berechneten Werte von w_s/w
					aus der Sommerfeld- schen Theorie berechnet	experimentell bestimmt	
Wechselzahl der Schwingungen pro Sekunde = $1 \cdot 10^6$.							
1	0,15	0,25	20	1,7	3,35	1,89	} 0,56
2	0,15	0,25	20	3,2	3,35	1,88	
3	0,15	0,3	10	0,75	3,35	1,55	
4	0,15	0,3	10	1,7	3,35	1,63	
5	0,15	0,3	10	3,2	3,35	1,60	} 0,50
6	0,15	0,3	10	7,2	3,35	1,52	
7	0,15	0,3	20	0,75	3,35	1,55	
8	0,15	0,3	20	1,7	3,35	1,66	
9	0,15	0,3	20	3,2	3,35	1,66	
10	0,15	0,3	20	7,2	3,35	1,59	
11	0,15	0,5	10	1,7	3,35	1,25	} 0,38
12	0,15	0,5	10	3,2	3,35	1,26	
13	0,15	0,5	10	7,2	3,35	1,20	
14	0,15	0,5	20	1,7	3,35	1,29	
15	0,15	0,5	20	3,2	3,35	1,30	
16	0,15	0,5	20	7,2	3,35	1,25	
17	0,3	0,5	20	2,0	3,44	1,87	} 0,54
18	0,3	0,5	20	3,5	3,44	1,87	
19	0,3	0,5	20	7,6	3,44	1,85	
20	0,3	1,0	20	2,0	3,44	1,30	} 0,38
21	0,3	1,0	20	3,5	3,44	1,30	
22	0,3	1,0	20	7,6	3,44	1,28	
Wechselzahl der Schwingungen pro Sekunde = $5 \cdot 10^6$.							
8a	0,15	0,3	20	1,7	3,46	1,72	0,50
17a	0,3	0,5	20	2,0	3,51	1,86	0,53

Die Zahlen, welche die Tabelle enthält, sind die Resultate der endgültigen Messungen. Es kann für dieselben eine Genauigkeit von etwa 3 Proz. garantiert werden, was durch Wiederholung der Versuche unter abgeänderten Bedingungen immer wieder kontrolliert wurde. Zum Beispiel wurde das Verhältnis $w_s:w$ für die Spule 8 im Dez. 1904 gleich 1,68 gefunden und im März 1905 mit einer etwas geänderten Anordnung des Apparates gleich 1,66. Ebenso ergab sich für die Spule 12 im Dez. 1904 $w_s:w$ 1,24 und im Mai 1905 1,26. Da die Messungen ziemlich zeitraubend waren, so habe ich dieselben so disponiert, daß sie trotz ihrer verhältnismäßig geringen Zahl möglichst klar hervortreten lassen, in welcher Weise das Verhältnis $w_s:w$ von den verschiedenen Größen abhängt (vgl. p. 164ff.).

Vorausgegangen waren diesen endgültigen Messungen eine große Anzahl von Versuchen, die zur Orientierung dienen sollten und bei denen sämtliche Bedingungen möglichst stark variiert wurden. Insbesondere wurde untersucht, ob das Verhältnis $w_s:w$ anders ausfällt, wenn die Spule frei in Luft steht, als wenn sie auf einem Ebonitrohr aufgewickelt ist. Aus diesen Vorversuchen ging hervor, daß das Vorhandensein eines Ebonitkernes einen merkbaren Einfluß nicht ausübt.

Allgemeines Ergebnis.

In dem Bereiche, in welchem sich die Versuche bewegen, gilt:

a) Der effektive Widerstand w_s von aufgespulten Drähten kann, wie schon aus den Messungen von Battelli und Magri hervorgeht, bis etwa zweimal größer sein als derjenige w von geraden Drähten unter denselben Bedingungen. Daraus folgt einerseits, daß es sich bei dem effektiven Spulenwiderstand keineswegs nur um eine kleine Korrektion an dem effektiven Widerstand von geraden Drähten handelt, andererseits, daß das Verhältnis des effektiven Spulenwiderstandes zu demjenigen von geraden Drähten bei weitem nicht dieselbe Größe erreichen kann, wie etwa das Verhältnis des effektiven Widerstandes von geraden Drähten bei Schwingungen zu dem Widerstand bei stationärem Strom.

b) Ist die Wechselzahl und der Drahradius so groß, daß

$$k^1) = r \cdot \pi \sqrt{\frac{n \cdot \sigma}{2}}$$

(r = Drahradius, n = Wechselzahl pro Sekunde, σ = Leitvermögen des Drahtes) groß ist gegen 1, mindestens etwa 6, d. h. daß bei einem geraden Draht die Strömung merklich auf eine dünne Oberflächenschicht beschränkt wäre, so ist das Verhältnis $w_s:w$ sowohl von der Wechselzahl als von dem Spulendurchmesser sehr wenig abhängig (vgl. Spulen 17—22 und Spule 17 mit 17a).

c) Das Verhältnis $w_s:w$ ist bei derselben Ganghöhe und unter sonst gleichen Umständen um so größer, je größer der Drahradius ist (vgl. Spulen 11—16 mit 17—19).

d) Es ist, wie von vornherein zu erwarten war, um so größer, je kleiner die Ganghöhe ist (vgl. Spulen 1—2 mit 3—10 und 11—16 und Spulen 17—19 mit 20—22).

e) Der Wert von $w_s:w$ ist um so größer, je größer das Verhältnis von Spulenlänge zu Spulendurchmesser ist. Ist dieses Verhältnis aber einmal etwa gleich 6—10 geworden, so steigt der Wert von $w_s:w$ nur noch sehr wenig (vgl. Spule 3 und 7, 4 und 8, 5 und 9, 6 und 10, ebenso 11 und 14, 12 und 15, 13 und 16). Spulen die sechs- bis zehnmals länger sind als breit, verhalten sich also für den vorliegenden Zweck merklich wie unendlich lange Spulen.

Vergleich mit der Theorie von Sommerfeld.

Bei meinen Messungen war der Ausdruck:

$$2 \pi r \sqrt{2 \pi \cdot n \cdot \sigma}$$

1) Es ist nämlich in meinen Versuchen

$2r$ in cm	n pro Sekunde	k
0,15	$1 \cdot 10^6$	4,03
0,3	$1 \cdot 10^6$	8,06
0,15	$5 \cdot 10^6$	9,00
0,3	$5 \cdot 10^6$	18,01

sets sehr groß gegen 1 (> 28). Für diesen Fall ist nach Sommerfeld (p. 687 (22) und p. 689 18)) ¹⁾

$$\frac{w_s}{w} = \pi r \sqrt{2 \pi n \sigma},$$

d. h.

$$(3) \quad \frac{w_s}{w} = \frac{\pi r \sqrt{2 \pi n \sigma}}{w/w},$$

wo, wie früher, w_s den Widerstand pro Längeneinheit des Spulendrahtes bei Schwingungen, w den Widerstand pro Längeneinheit des geraden Drahtes bei Schwingungen, und w den Widerstand pro Längeneinheit des Drahtes bei Gleichstrom bedeuten.

Ist $k = \pi r \sqrt{n \cdot \sigma / 2}$ groß gegen 1, mindestens etwa 6, so gilt bekanntlich um so genauer, je größer k ist,

$$\frac{w_s}{w} = k.$$

Ist k kleiner als etwa 6, so ist w_s/w größer als k und zwar entfernt sich das Verhältnis w_s/w von dem Wert k um so mehr, je kleiner k ist.²⁾

Es ist in meinen Versuchen

k	$\frac{w_s}{w}$
4,03	4,29
8,06	8,33
9,00	9,28
18,01	18,20

(wo w/w nach der vollständigen Rayleighschen Formel berechnet ist).

Für Werte von k , die größer als 6 sind, gilt also nach Sommerfeld

$$\frac{w_s}{w} = \frac{r \cdot \pi \sqrt{2 \cdot \pi \cdot n}}{r \cdot \pi \sqrt{\frac{n \cdot \sigma}{2}}} = 2 \cdot \sqrt{\pi} = 3,54,$$

1) Bei Sommerfeld bedeutet n die Wechselzahl in π Sekunden.

2) Vgl. z. B. J. Zenneck, Elektromagn. Schwingungen p. 993.

während bei kleineren Werten von k

$$\frac{m_s}{w} < 3,54,$$

und zwar um so kleiner ist, je geringer der Wert von k ist.

Die Gleichung (3) von Sommerfeld sagt also *qualitativ* aus:

a) Das Verhältnis $m_s:w$ ist bei demselben Drahradius unter allen Umständen unabhängig vom Spulendurchmesser.

b) Solange k kleiner ist als etwa 6, nimmt $m_s:w$ mit zunehmender Wechselzahl und zunehmendem Drahradius zu; aber um so weniger rasch, je größer k ist.

c) Je größer k ist, um so mehr nähert sich $m_s:w$ einem konstanten, von der Wechselzahl und dem Drahradius unabhängigen Wert, der ungefähr erreicht ist, wenn k etwa gleich 6 ist.

Es folgt also aus meinen Resultaten unmittelbar die Richtigkeit von a), insofern als bei den Messungen, die überhaupt einen Vergleich mit der Sommerfeldschen Theorie gestatten (Voraussetzung unendlich langer Spulen! (vgl. p. 164, e)), tatsächlich das Verhältnis $m_s:w$ sich mit dem Spulendurchmesser nur äußerst wenig ändert (p. 164, b). Auch den Punkt b) bestätigen meine Messungen. Im Gebiete $k < 6$ nimmt $m_s:w$ sowohl mit steigendem Drahradius zu (vgl. Spulen 11—16 mit 17—19 und Spule 8a mit 17a), als auch mit steigender Wechselzahl (vgl. Spule 8 mit 8a). Die Richtigkeit von c) folgt aus meinen Messungen insoweit, als $m_s:w$ bei $k > 6$ tatsächlich von der Wechselzahl unabhängig ist (vgl. Spulen 17—19 und 17a). Von dem Drahradius ist es nach meinen Messungen nicht unabhängig (vgl. Spulen 8a und 17a). Daß in diesem Punkt die Theorie, welche die Spulen von endlicher Ganghöhe durch eine Röhre ersetzt, versagen muß, ist von vornherein sehr wahrscheinlich. Der von der Ganghöhe abhängige Korrektionsfaktor, mit dem der Sommerfeldsche Ausdruck für $m_s:w$ zu versehen wäre (in Tab. I, letzte Kolumne)¹⁾, scheint nach meinen Messungen nur eine Funktion des *Verhältnisses von Ganghöhe zu Drahradius* zu sein (vgl. Spulen 1 und 2 mit 17 und 18 und Spulen 14 und 15 mit 20 und 21).

1) Die Zahlen sind nach der Grenzformel berechnet, welche die Sommerfeldsche Theorie für das Verhältnis $m_s:w$ liefert. Diese Grenzformel war auf meine Versuche ohne weiteres anwendbar, weil der Wert von $2\pi r/\sqrt{2\pi n\sigma}$ bei meinen Versuchen stets größer als 28 ist.

B.

Das Bisherige bezog sich ausschließlich auf den Fall von Spulen, deren Länge (längs der Achse gemessen) im Verhältnis zum Durchmesser jedenfalls nicht klein ist. Außer dieser Art von Spulen benutzt man aber sowohl bei Laboratoriumsversuchen mit schnellen Schwingungen als auch in der Praxis der drahtlosen Telegraphie Spulen, die aus wenigen Windungen von relativ sehr großem Durchmesser bestehen, deren Achse also gegen den Durchmesser einer Windung extrem kurz ist — Spulen, wie man sie etwa erhält, wenn man fünf Windungen von 30 cm Durchmesser sehr nahe nebeneinander wickelt.

Ich habe auch von einigen Spulen dieser Art das Verhältnis $w_1:w$ bestimmt mit derselben Methode, die ich im vorhergehenden beschrieben habe. Der einzige Unterschied in der Anordnung bestand darin, daß das Glasgefäß, welches die Spule enthält, entsprechend den veränderten Dimensionen der Spulen die Gestalt Fig. 3 bekam. Der obere Teil bestand aus einer Spiegelglasplatte, die mit Siegellack und Koloophonkitt aufge kittet war.

Aus den Messungen geht hervor, daß bei derselben Wechselzahl und demselben Durchmesser der Windungen das Verhältnis $w_1:w$ zunimmt 1. bei demselben Drahtradius und derselben Ganghöhe mit der Anzahl der Windungen (vgl. Spule 1 mit 2), 2. mit Verkleinerung der Ganghöhe bei konstantem Drahtradius (vgl. Spule 1 mit 3, und Spule 4 mit 5), oder bei derselben Ganghöhe mit Vergrößerung des Drahtradius (vgl. Spule 3 mit 4).

Nach den Spulen 3 und 5 scheint es, daß das Verhältnis $w_1:w$ bei derselben Wechselzahl und demselben Spulen-

Fig. 3.

durchmesser, wie bei den Spulen der Form A, nur abhängt von dem *Verhältnis des Drahtradius zur Ganghöhe*.

Tabelle II.

Resultate.

Wechselzahl der Schwingungen pro Sekunde = $1 \cdot 10^6$.

Spule	Durchmesser der Spule in cm	Durchmesser des Drahtes in cm	Ganghöhe in cm	Anzahl der Windungen	$\frac{w_s}{w}$		
					Messung (1)	Messung (2)	Mittel- wert
1	30	0,15	0,3	10	1,39	1,39 (5)	1,39
2	30	0,15	0,3	5	1,27	1,31	1,29
3	30	0,15	0,5	10	1,12	1,12	1,12
4	30	0,3	0,5	5	1,47	1,47	1,47
5	30	0,3	1,0	5	1,14	1,12	1,13

Bemerkenswert ist der relativ große absolute Wert von $w_s:w$. Es konnte sicherlich nicht von vornherein erwartet werden, daß bei Spulen von so wenigen Windungen und einem relativ zum Drahtradius so großen Spulendurchmesser und bei einer Wechselzahl von nur $1 \cdot 10^6$ pro Sekunde, der effektive Widerstand bei einer Spule nahezu das $1\frac{1}{2}$ fache betragen kann als bei einem geraden Draht derselben Länge.

Es sei mir an dieser Stelle gestattet, meinem hochverehrten Lehrer, Hrn. Prof. Dr. Braun, herzlichsten Dank auszusprechen für die Bereitwilligkeit mit der er mir die Mittel des Institutes zur Verfügung stellte. Hrn. Prof. Dr. Zenneck danke ich ebenfalls herzlichst für vielfache Ratschläge und freundliche Hilfe bei der Ausführung meiner Arbeit.

(Eingegangen 9. November 1905).