

JEREMI WASIUTYŃSKI.

O pomiarach fotometrycznych z pomocą fotokomórki potasowo - koloidalnej wypełnionej argonem.

Über die photometrischen Messungen mit einer argongefüllten kolloidalen Kaliumzelle.

Um die photometrischen Eigenschaften einer Photozelle, besonders in Anwendung an die Astrophotometrie, zu untersuchen, unternahm der Verfasser eine Reihe photoelektrischer Messungen im Laboratorium. Das Ergebnis dieser Messungen, die sog. „photoelektrische Ermüdung“ betreffend, ist wie folgt: es gibt keine kurzfristige Ermüdung in der Nähe des Entladungspotentials in der untersuchten Photozelle; es gelang auch nicht während fünftägigen Messungen langsam verlaufende Empfindlichkeitsänderungen, im besonderen die langfristige Ermüdung, festzustellen. Im Folgenden wird die Beschreibung des Messungsverfahrens sowie die Messungen selbst zahlenmässig angeführt, wie auch eine einfache graphische Methode zur Elimination aus einer grösseren Reihe Beobachtungen des Trägheits- und Dämpfungseinflusses auf die Bewegung der Nadel eines zur Messung des Photostroms benutzten Quadrantelektrometers angegeben.

Die ganze untersuchte Photozelle, von Firma Krüss angefertigt, war im Innern versilbert und mit der lichtempfindlichen kolloidalen Kaliumschicht (kolloidale Lösung des Kaliums im Kaliumhydrid) überzogen; nur ein kleines konvexes Fensterchen von ca 1 cm. Durchmesser war von jeder Belegung frei. Die Zelle war mit Argon von niedrigem Drucke gefüllt. Das Glas im Innern, rings um die Anode, war mit einem metallischen geerdeten Ringe umgeben. Auch aussen drei geerdeten Staniol-

ringe waren um die Anode und Kathode am Glase geklebt, um die Bewegung der elektrischen Ladungen auf der Oberfläche zu verhindern. Diese Anordnung der Zelle bewirkte, dass kein Dunkeleffekt und keine Trägheit¹⁾, wenigstens in den Grenzen der Genauigkeit der Messungen, sich bemerkbar machten. Die Photozelle war im Innern einer geerdeten metallischen Büchse aufgestellt.

Zur Strommessung diente ein Dolezalek-Elektrometer dessen Empfindlichkeit bei Quadrantschaltung 172 Skalenteile/Volt betrug. Ein Quadrantenpaar war geerdet, das andere mit der Zellenanode leitend verbunden. Bei der Unterbrechung der Erdung des zweiten Quadrantenpaares konnte kein Voltaeffekt bemerkt sein. Es war die Aufladezeitmethode gebraucht, das heisst, es wurde mittels einer Stoppuhr der Zeitintervall zwischen den Durchgängen von zwei bestimmten Skalenteile durch den Fadenkreuz des auf das Elektrometerspiegel gerichteten Fernrohrs gemessen. Das Prinzip der Methode ist, wie bekannt, dass die Winkelgeschwindigkeit der Nadel kann als gleichförmig und dem Photostrom proportional angenommen werden, wenn nur vom Moment des Erdungsunterbrechens bis zum Beginn der Messungen ein für das gegebene Elektrometer und die gegebene Messgenauigkeit ganz bestimmter Zeitintervall²⁾ verflossen ist. Im allgemeinen jedoch bewirken die Verluste der Ladung im Elektrometer und das Herabsetzen der Potentialdifferenz zwischen den Elektroden der Zelle, das seine Ursache in dem Anwachsen der negativen Ladung der Anode hat, dass die Winkelgeschwindigkeit der Nadel mit der Ablenkung herabfällt. Die Verminderung der Geschwindigkeit kann als dem Potential der Anode (d. h. dem Potential des Elektrometers) proportional angesehen werden. Hieraus folgt³⁾, dass die Verminderung der mittleren Geschwindigkeit (vom Moment der Erdungsunterbrechung aus gerechneten) dem Potential der Anode im Moment des zweiten beobachteten Durchganges proportional ist. In unserer Apparatur war der Proportionalitätsfaktor klein und deswegen konnte die entsprechende Korrektur vernachlässigt werden (was einen Fehler von höchstens einigen Promillen zur Folge haben kann). Übrigens kann diese Korrektur das Ergebnis über die Konstanz der Zellenempfindlichkeit, als selbst konstant für jede Messungsreihe, nicht ändern.

Als Lichtquelle diente eine kleine Osramlampe 3.5 V, 0.2 A. Den Glühstrom lieferte ein Akkumulator, die Spannung an der Glühlampe betrug 1.000 V in einen Fällen 1.700 V und wurde nach den Ausschlagen eines Präzisionsvoltmeters mit einer Genauigkeit von mindestens 0.1% reguliert. Im übrigen bekam die Spannung der Lampe schon nach mehreren Minuten Brennens sehr konstant und brauchte stundenlang nicht reguliert zu sein. Die Lampe beleuchtete einen Schirm mit einer kleinen Öffnung von 2 mm. Durchmesser, die mit einer matten Glasplatte bedeckt war. Ein achromatisches Objektiv warf das Licht dieses künstlichen Sterns als paralleles Lichtbündel auf das Fensterchen der Zelle⁴⁾. Vor dem Fensterchen befand sich ein Lichtverschluss, der im Augenblicke des Anfanges der Messungen jedesmal geöffnet wurde. Alle optischen Teile waren dicht verhüllt und kein vom Aussenlichte herrührendes Photoeffekt bemerkbar war.

Die Spannung an der Zelle lieferte eine Akkumulatorenbatterie von 240 V, deren positiver Pol geerdet war. Die Regulierung der Spannung geschah mit einer Genauigkeit von mindestens 0.1%. Ebenso die Spannung der Elektrometernadel (105.0 V) wurde während der Messungen kontrolliert und mit der Genauigkeit 0.1% reguliert. Der Entladungspotential betrug ca 212 V, jedoch setzten Partiententladungen schon bei einer Spannung von 208 V an und verhinderten die Messungen.

Messungsreihen, die ein Fehlen der Ermüdung erweisen, wurden bei Spannungen an der Zelle von 180, 190, 198, 204, 206 V ausgeführt. Die zu benutzende Spannung legte man an die Zelle 1 bis 2 Stunden vor Beginn der Messung, die ganze Zeit aber (auch während der Pausen zwischen den Messungen) blieb die Spannung an der Zelle 150—200 V. Die Helligkeit des künstlichen Sterns war angenähert eine solche von einem Stern 2^m bis 3^m in einem 16 cm - Reflektor, was den Helligkeiten, die H. Rosenberg⁵⁾ in seinen Ermüdungsuntersuchungen benutzte, beinahe entspricht. In den unten angeführten Tabellen sind die Ergebnisse von fünf Messungsreihen gegeben. Die Zeiten sind von dem Augenblicke der Öffnung des Lichtverschlusses an gerechnet und entsprechen den Momenten der Anodenentladung; die Messungen endeten ca 0^m.5 später. Die Stromeinheiten sind willkürlich. Der Teilwert der benutzten Stoppuhr war 0.2 sec; der mittlere Fehler einer Messung betrug 0.7% — 1.4%.

¹⁾ Zwischen dem Objektiv und der Zelle waren noch zwei Nicolsche Prismen aufgestellt, die aber während der Versuche über die Konstanz der Empfindlichkeit nicht berührt wurden.

²⁾ H. Rosenberg. „Ermüdungserscheinungen an Alkalimetallzellen in der Nähe des Entladungspotentials... u. s. w.“. Zsf. für Phys. 7, 18 (1921).

¹⁾ S. den Artikel von Elster u. Geitel „Die Proportionalität... u. s. w.“ Phys. Zeitschr. XIV, 741 (1913).

²⁾ In unserer Apparatur dieser Zeitintervall betrug 26 sec.

³⁾ S. die Arbeit von S. Szczeniowski „O wydatności... u. s. w.“. Sprawozdania i Prace Pol. Tow. Fiz. Zesz. VIII, 1927.

Bei manchen Messungen traten offenbar Störungen in der Bewegung der Nadel; die entsprechenden Stromwerte sind eingeklammert. Bei dem Worte „Dunkelheit“ ist die Zahl der Stunden, während der die Zelle vor den Messungen in Dunkelheit ausruhte, angegeben.

Aus den angeführten Ergebnissen ist ersichtlich, dass im Laufe der Zeit, während der H. Rosenberg ¹⁾ eine Ermüdung von 10 bis 40% erzielte, die Empfindlichkeit der untersuchten Photozelle innerhalb der Messgenauigkeit von 1% und weniger konstant war. Es sind hier (Fig. 1) die graphischen Darstellungen von zwei Messungsreihen beigelegt. Neben den Geraden, die Messungen mit den Spannungen 204.0 V und 206.0 V darstellen sind auch die Ermüdungskurven von H. Rosenberg aufgezeichnet. Sie gelten, soweit man aus der Beschreibung schliessen kann, für eine ebensolche kolloidale, argongefüllte Kaliumzelle ²⁾ für eine Spannung die auch 6 bis 8 V von dem Entladungspotential ³⁾ entfernt war und für beinahe dieselbe Beleuchtung ⁴⁾. Die mit unterbrochener Linie gezeich-

| Zellenspannung: 180.0 V | | | 190.0 V | | | | | | 198.0 V | | |
|----------------------------|--------|----------------------|-------------------|-----------|----------------------|--------------------|-------|----------------------|-------------------|-------|----------------------|
| Dunkelheit: 1 ^h | | | 2 ^h | | | | | | 1 ^h | | |
| Zeit | Strom | Anzahl der Messungen | Zeit | Strom | Anzahl der Messungen | Zeit | Strom | Anzahl der Messungen | Zeit | Strom | Anzahl der Messungen |
| 1 ^m .5 | 0.90 | 3 | 0 ^m .1 | 1.02 | 1 | 13 ^m .5 | 1.02 | 1 | 1 ^m .5 | 1.08 | 3 |
| 9.0 | 0.91 | 3 | 1.5 | Störungen | 1 | 16.5 | 0.99 | 1 | 6.1 | 1.08 | 3 |
| 20.0 | 0.90 | 3 | 3.0 | 1.01 | 1 | 19.5 | 1.00 | 1 | 10.5 | 1.08 | 3 |
| 32.5 | (0.84) | 2 | 4.5 | 1.00 | 1 | 30.0 | 1.01 | 1 | 15.0 | 1.05 | 3 |
| 42.5 | 0.89 | 2 | 6.0 | 1.01 | 1 | 40.0 | 1.01 | 1 | 19.5 | 1.08 | 3 |
| 56.5 | 0.89 | 3 | 7.5 | 1.00 | 1 | 50.0 | 0.98 | 1 | 24.0 | 1.08 | 3 |
| 66.6 | 0.90 | 3 | 10.5 | (1.11) | 1 | 60.0 | 1.01 | 1 | | | |
| 76.5 | 0.89 | 3 | 12.5 | Störungen | 1 | 80.0 | 1.01 | 1 | | | |

¹⁾ H. Rosenberg. „Ermüdungserscheinungen an Alkalimetallzellen in der Nähe des Entladungspotentials... u. s. w.“, Zsf. für Phys. 7, 18 (1921).

²⁾ „Kochsche Zelle N. 2“.

³⁾ Der Entladungspotential dieser Zelle war 260 — 262 V.

⁴⁾ Die Beleuchtung bei den Rosenbergschen Versuchen glich der eines Sterns 1^m.9 im 13 cm.-Refraktor (Nicolstellung 30°).

| Zellenspannung: 204.0 V | | | | | | 206.0 V | | |
|-----------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------|-------|----------------------|
| Dunkelheit: 18 ^h | | | | | | 15 ^h | | |
| Zeit | Strom ¹⁾ | Anzahl der Messungen | Zeit | Strom ¹⁾ | Anzahl der Messungen | Zeit | Strom | Anzahl der Messungen |
| 0 ^m .1 | 1.06 | 1 | 15 ^m .2 | 1.08 | 1 | 0 ^m .7 | 1.32 | 2 |
| 1.4 | 1.07 | 1 | 16.8 | (1.11) | 1 | 3.7 | 1.32 | 2 |
| 3.2 | (1.04) | 1 | 18.2 | 1.06 | 1 | 6.7 | 1.31 | 2 |
| 5.2 | 1.08 | 1 | 19.7 | 1.08 | 1 | 9.7 | 1.32 | 2 |
| 7.2 | 1.08 | 1 | 21.4 | 1.08 | 1 | 12.7 | 1.32 | 2 |
| 8.9 | 1.07 | 1 | 23.2 | 1.07 | 1 | 15.7 | 1.32 | 2 |
| 10.7 | 1.08 | 1 | 24.7 | 1.08 | 1 | 19.7 | 1.32 | 2 |
| 12.2 | (1.10) | 1 | 26.4 | 1.08 | 1 | 22.0 | 1.32 | 1 |
| 13.7 | 1.07 | 1 | 28.4 | 1.07 | 1 | | | |
| | | | 29.7 | 1.08 | 1 | | | |

neten Ermüdungskurven sind von H. Rosenberg für eine um 0^m.9 hellere Beleuchtung erhalten.

Was die langfristige Ermüdung betrifft, so konnte sie während unserer Messungen auch nicht bemerkt sein. Die Spannung wurde zum ersten Male nach einer vielmonatigen Pause am 3 Juli l. J. an die Zelle gelegt und während acht Tage nicht abgenommen. Wir geben hier die Photostromwerte bei einer Spannung von 198.0 V und konstanter Beleuchtung an verschiedenen Tagen an.

| | | | | | | |
|-----------------|--------------------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Datum 1929 Juli | 3 ^d .91 | 4.82 | 4.98 | 5.83 | 6.63 | 8.82 |
| Strom | 0.187 | (0.182) | 0.187 | 0.187 | 0.189 | 0.188 |

Zum Vergleich sei erwähnt, dass in einer Rubidiumzelle H. Rosenberg nach 12 Tagen eine Ermüdung von ca 35% fand.

Wir wollen der schon zitierten Arbeit von H. Rosenberg noch zwei Beobachtungstatsachen entnehmen. Es fand sich nämlich unter den

¹⁾ Andere Stromeinheiten als bei übrigen Messungen.

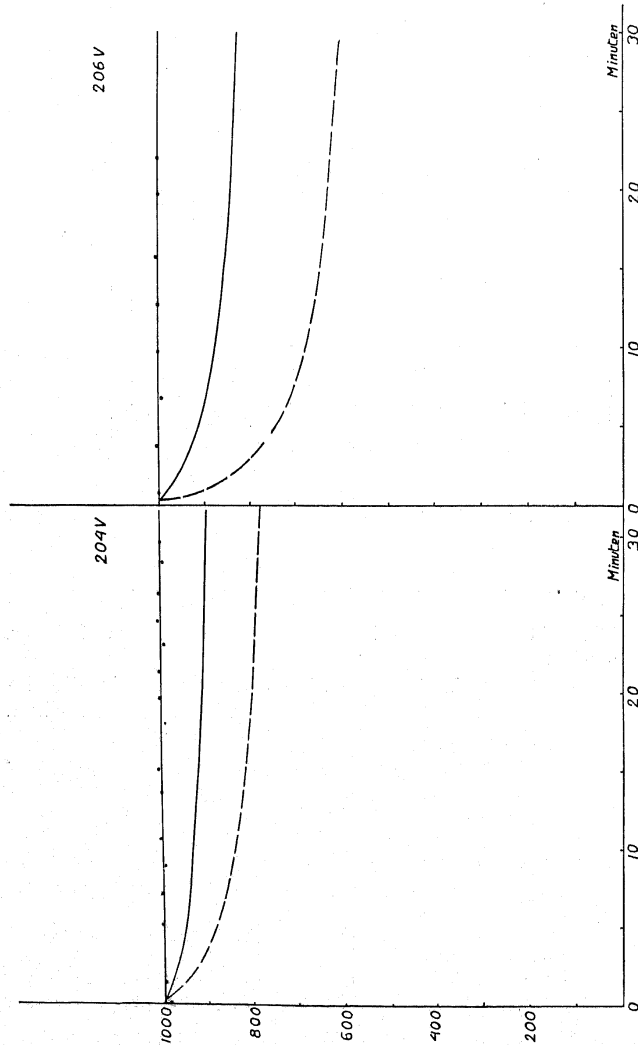


Fig. 1. Stalosc czuosci komorki i krzywe zmęczenia H. Rosenberga.
Konstanz der Zellenempfindlichkeit und Ermüdungskurven von H. Rosenberg.

Zellen, die von diesem Forscher untersucht wurden, eine Kaliumzelle, deren Ermüdung spätestens schon nach einer Minute vollendet war und andererseits eine Rubidiumzelle die sich desto mehr müdete, je kleiner die Beleuchtung war. Die erste Tatsache weist, dass die Ermüdung nicht immer störend auf die photoelektrische Photometrie wirken kann. Die zweite Tatsache aber scheint uns nicht ganz mit der Rosenbergschen Deutung der Ermüdungserscheinungen vereinbar, denn auf Grund dieser Deutung soll die Ermüdung mit der Zahl der positiven Ionen in der Zelle wachsen.

Die angeführten Messungsergebnisse und einige von H. Rosenberg selbst festgestellten Resultate scheinen aufzuweisen, dass die Ermüdung nicht als wesentliches Merkmal der Photozelle anzusehen ist und dass sie nicht unbedingt bei den photometrischen Messungen störend auftreten soll.

Ist die Spannung der Nadel des Quadrantelektrometers hoch genug und die Spannung der Quadranten konstant und wird dazu der Gleichgewichtszustand erreicht, so wird auch, wie bekannt, der Winkelausschlag der Nadel proportional zur Potentialdifferenz der Quadrantenpaare sein. Ist aber diese Potentialdifferenz veränderlich, wie im Falle der Strommessung, so wird man nicht immer mit Vorteil warten bis sich das Gleichgewicht der Drehungsmomente einstellt. In der Tat, ist der zu messende Strom stark genug, so wird nach dem Verlaufe der Zeit, die zur Gleichgewichtseinstellung nötig ist, das Anodenpotential so anwachsen, dass die Ladungsverluste im Elektrometer nicht vernachlässigt werden können, und vor allem, dass die Zellenempfindlichkeit stark herabfallen wird¹⁾. Deswegen wird man besser die Durchgangsbeobachtungen kurz nach der Anodenenterdung anfangen. In diesem Falle wird zwar die Winkelablenkung der Nadel nicht der Potentialdifferenz der Quadrantenpaare proportional, es bietet aber die Reduktion dieser dynamischen Ablenkung zur statischen keine Schwierigkeiten.

Ist der gemessene Strom konstant, so können wir den elektrischen Drehungsmoment für nicht allzu grosse Ablenkungen der Nadel als proportional zur, vom Momente der Anodenenterdung gerechneten, Zeit t annehmen. Sei Et dieses Drehungsmoment, M das Torsionsmoment des Aufhängefadens, p das Dämpfungsmoment der Nadelschwingungen, I das Trägheitsmoment der Nadel, α die Winkelablenkung von der Nullstellung bei geerdeter Anode, alle diese Größen positiv angenommen. Die Bewegungsgleichung der Nadel wird:

¹⁾ Wir denken uns natürlich die Messungen in der Nähe des Entladungspotentials ausgeführt.

$$(1) \quad I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + p \frac{d\alpha}{dt} + M\alpha = Et$$

Wenn wir in Betrachtung ziehen dass für $t=0$ soll $\alpha=0$, $\frac{d\alpha}{dt}=0$ sein und wenn wir uns erinnern der Formeln der Theorie der gedämpften Schwingungen:

$$(2) \quad \frac{I}{M} = \frac{T^2}{\pi^2 + \Lambda^2}$$

$$(3) \quad \frac{p}{I} = \frac{2\Lambda}{T}$$

wo Λ das logarithmische Dekrement und T die Halbperiode der gedämpften Schwingungen der Nadel ist, so werden wir unter Voraussetzung $\Lambda^2 < \pi^2$ aus dem Integral der Bewegungsgleichung die Formel

$$(4) \quad \frac{M}{E} \alpha = t - \frac{2\Lambda T}{\pi^2 + \Lambda^2} F(t)$$

aufstellen können, wo

$$(5) \quad F(t) = \frac{T}{\pi(\pi^2 + \Lambda^2)} e^{-\frac{\Lambda}{T}t} \cdot \left[(\pi^2 - \Lambda^2) \sin \frac{\pi}{T}t - 2\Lambda\pi \cos \frac{\pi}{T}t \right].$$

Gleichung (4) gibt uns die Kurve der dynamischen (reellen) Ablenkungen, während die Gerade

$$(6) \quad \frac{M}{E} \alpha = t$$

die statischen Ablenkungen darstellt.

Wenn wir die Zeit t_1 zwischen der Anodenentladung und dem ersten beobachteten Durchgange kennen, so können wir der graphischen Darstellung der Kurve (4) und der Gerade (6) unmittelbar die relativen Ablenkungskorrekturen entnehmen¹⁾. Wenn wir die Zeit t_1 nicht ken-

¹⁾ Es ist bequem die Korrekturen als Ordinatendifferenzen der Kurve (4) und der Gerade

$$\frac{M}{E} \alpha = t - \frac{2\Lambda T}{\Lambda^2 + \pi^2}$$

abzulesen, was zu denselben Resultaten führt.

nen, so berechnen wir sie in folgender Weise. Die Ordinaten unserer Zeichnung geben uns die Ablenkungen der Nadel, wenn das Wert der Längeneinheit der Ordinatenachse gleich $\frac{E}{M}$ ist. Nun können wir ange-
nähert $\frac{E}{M} = C_d$ setzen, wo C_d die beobachtete mittlere Geschwindigkeit

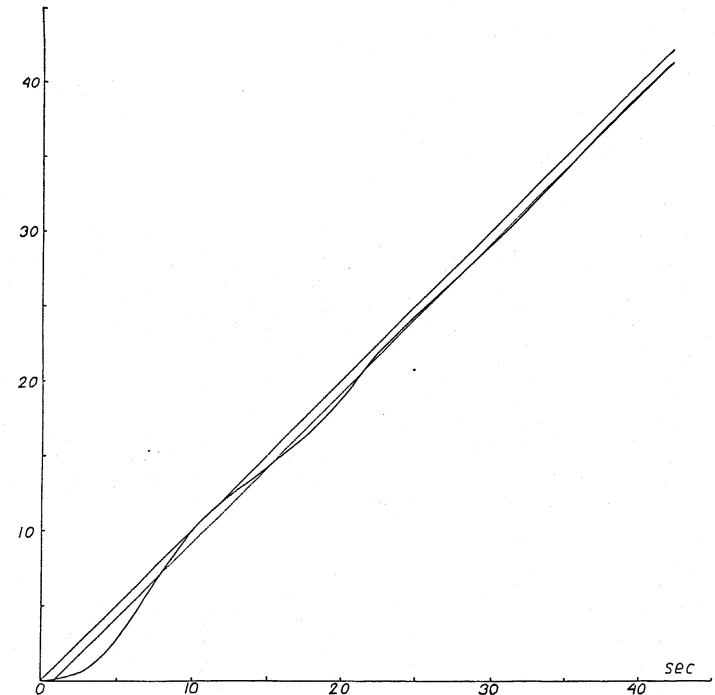


Fig. 2. Krzywa wychyleń dynamicznych, jej oś symetrii i prosta wychyleń statycznych igły elektrometru.

Die Kurve der dynamischen Ablenkungen, ihre Symmetrieachse und die Gerade der statischen Ablenkungen der Elektrometernadel.

ist. Sei α_1 die Ablenkung der Nadel zur Zeit t_1 ; dann t_1 ist der Abszisse des Punktes der Kurve (4) gleich, der die Ordinate $\frac{\alpha_1}{C_d}$ hat. Ist die mittlere korrigierte Geschwindigkeit C_s und die beobachtete C_d sehr verschieden, so führt man die Rechnung in zweiter Näherung aus. Wir fügen hier (Fig. 2) die Kurven der Ablenkungen für das von uns benutzte Elektrometer bei.

Treść:

Powyżej przedstawione zostały pomiary fotoelektryczne wykonane przez autora w Zakładzie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego i wyprowadzony został wniosek, iż w badanej fotokomórce nie istnieje ani krótko- ani długoterminowe zmęczenie w granicach dokładności pomiarów (około 1%) oraz, że wobec tego zmęczenie nie jest cechą istotną fotokomórki, jak przypuścił H. Rosenberg. W dalszym ciągu przedstawiona jest metoda graficzna eliminacji z większej liczby spostrzeżeń wpływu bezwładności i tłumienia na ruch użytego do pomiarów elektrometru kwadrantowego.

Uważam sobie za miły obowiązek podziękować na tem miejscu p. profesorowi dr. Stefanowi Pieńkowskiemu za cenne wskazówki udzielane mi w ciągu tej pracy.

Warszawa, listopad 1929.