

523-79

Einzelne magnetische Nord-und
Südpole und deren Auswirkung in den
Naturwissenschaften

10 Vorlesungen
gehalten im Sommer-Semester 1947 v.
D r . F e l i x E H R E N H A F T .
US.-Gastprofessor an der Universität
W i e n .



Einleitung.

Die folgenden Vorlesungen bringen einen Bericht über neue experimentelle Arbeiten auf dem Gebiete des Magnetismus.

1942 konnte EHRENHAFT nach langjährigen Untersuchungen den Satz aussprechen: "Das Universum ist nicht nur von elektrischen, sondern auch von magnetischen Strömen durchflossen."

Was ist nun eigentlich ein magnetischer Strom?

Der Begriff "Strom" ist aus der Terminologie der Elektrizität übernommen, sowie wir uns auch weiterhin anderer Begriffe aus dieser Terminologie bedienen werden.

Bewegte elektrische Ladungen werden als elektrischer Strom bezeichnet, der Begriff des Stromes ist somit auf den der elektrischen Ladung zurückgeführt.

Wann sprechen wir von einer elektrischen Ladung? Nach COULOMB-MAXWELL ist die elektrische Ladung, genauer gesagt, der Ladungsüberschuss (excess of charge) dadurch gekennzeichnet, dass sich der Träger eines solchen Überschusses in einem homogenen elektrischen Feld polar bewegt und seine Bewegungsrichtung bei Umkehr des Feldes auch umkehrt. In Analogie sprechen wir von einem magnetischen Ladungsüberschuss, einer magnetischen Ladung, dann, wenn in einem homogenen magnetischen Feld eine polare Bewegung eines Ladungsträgers auftritt, die sich mit der Reversiom des Feldes ebenfalls umkehrt.

Sprechen sich magnetische Ladungen^{en} feststellen, so sprechen wir, wieder in Analogie zur Elektrizität, von einem magnetischen Strom dann, wenn diese magnetischen Ladungen sich bewegen.

Die klassischen Vorstellungen des Magnetismus beruhen im wesentlichen auf 2 Experimenten: Dem PEREGRINUSExperiment (1269) und dem Zerbrechversuch (Erwähnt von FARADAY in einer Weihnachtsvorlesung für Kinder). Man glaubte aus beiden Versuchen auf die Nichtexistenz magnetischer Einzelladungen schliessen zu können. Es ist aber zu bemerken, dass beide Versuche unter unzulänglichen Versuchsbedingungen ausgeführt wurden und daher zu falschen Schlüssen Anlass gaben. Die entsprechende Wiederholung mit wesentlich verfeinerten Mitteln führte zu Resultaten, die im weiteren Verlauf beschrieben werden sollen. Es sei jedoch nicht unerwähnt, dass sich eine Reihe von berühmten Physikern bereits im vorigen Jahrhundert mit der Frage des Magnetismus kritisch auseinandersetzte und z.B. Heinrich HERZ, HELMHOLTZ Pierre GURI^e nebst anderen, wie FRESNEL, FARADAY, stets Bedenken gegenüber der Nichtexistenz der magnetischen Einzelladung hatten.

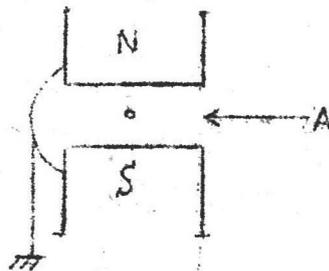
Wir wenden uns nun sofort den Untersuchungen zu, die über die Existenz der magnetischen Ladung Aufschluss geben.

Einzelne magnetische Ladungen, Nord- und Südpole.

Wir wollen nun eine Reihe von Versuchen besprechen die in Gasen vor genommen werden und uns Aufschluss geben über die Existenz einzelner magnetischer Ladungen.

A) Versuche im homogenen magnetischen Feld.

Die Versuchsanordnung ist aus der Abbildung zu ersehen. Zwischen den beiden Magnetoden eines permanenten Magneten (oder den Polschuhen eines Elektromagneten mit Helmholtzspulen) befindet sich eine Glaszelle von quadratischem Querschnitt (2,5mm Seitenlänge) die zur Aufnahme der im Gas suspendierten Probekörper bestimmt ist. Die Glaszelle ist innen mit zwei dünnen, geerdeten Silberstreifen belegt, um jede elektrostatische Beeinflussung auszuschalten (Faradaykäfig). Die Magnetoden sind ebenfalls miteinander leitend verbunden und geerdet. Sie haben einen Durchmesser von 2-6mm je nach Art des Versuches und können einander bis auf 0,5mm genähert werden. Aus der Richtung A wird horizontal beleuchtet, senkrecht dazu von vorne wird mit dem Mikroskop beobachtet. Die Beleuchtung wird so eingestellt, dass die Beobachtung im Dunkelfeld erfolgt. Wir haben es also mit dem bekannten **VERRECHT-MILLIKAN**schen Kondensator zu tun, wie er zur Messung der elektrischen Ladungen Verwendung findet. Da der Beobachtungsbereich des Mikroskopes im Vergleich zur Gesamtdimension des Feldes sehr gering ist, so ist die Homogenität in diesem Bereich weitgehend gewährleistet. Beobachtet werden in Luft suspendierte Teilchen von Ni, Co, Fe, Cu, Mn, und S von einem Radius von 10^{-4} bis 10^{-5} cm. Die Kräfte die mit dieser Anordnung noch gemessen werden können, liegen in der Größenordnung von 10^{-10} dyn. (Wir können um rund 10^5 empfindlicher messen, als mit den sonst üblichen Anordnungen.)



Wir beobachten im Kondensator folgende Erscheinungen:

1) Ein Grossteil der bisher freifallenden Teilchen ändert Richtung und Geschwindigkeit seiner Bewegung. Manche Teilchen steigen der Schwerkraft entgegen zur oberen Magnetode andere bewegen sich schneller als vorher nach unten, wieder andere erscheinen überhaupt keine Beeinflussung zu erfahren. Neben den nur von Pol zu Pol gerichteten Bahnen treten auch andere Formen auf,

Schraubenlinien, Sprünge, plötzliche Richtungsänderungen. Diese Bewegungen treten auch längere Zeit nach dem Einschalten des Feldes in unveränderter Weise auf. Eine Deutung durch induzierte Ströme im Sinne des Thomsonversuches ist aus mehreren Gründen nicht möglich, erstens bewegen sich die Teilchen zu einem Zeitpunkte noch, wenn dH/dt schon lange Null ist, zweitens zeigen auch Schwefelteilchen die Bewegung und drittens bewegen sich Probekörper gleichzeitig in der



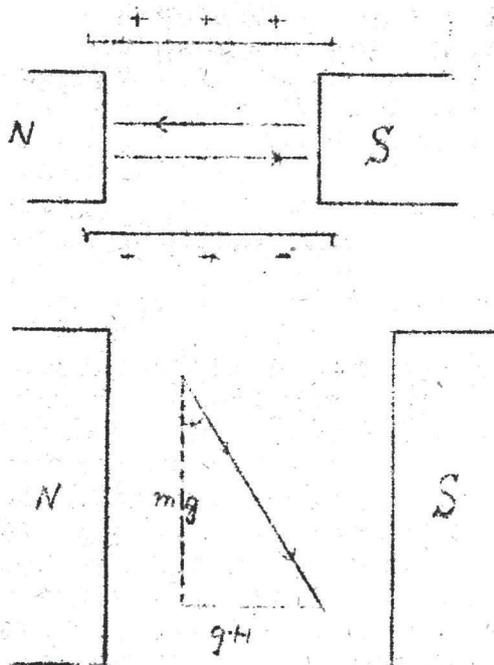
Nord-Südrichtung und in der Süd-Nordrichtung. Wichtig für die spätere Interpretation ist die Tatsache, dass alle beobachteten Bahnformen eine polare Komponente besitzen.

2) Nach Ausschalten des Feldes verbleibt nur mehr die normale Fallbewegung.

3) Kommutation des Feldes hat Umkehr der polaren Bewegungskomponente zur Folge. Dies tritt auch dann ein, wenn ein permanenter Magnet verwendet wird, der durch Drehung kommutiert wird. Dadurch ist gezeigt, dass elektrische Induktionseffekte nicht als Ursachen für die Bewegungsumkehr in Frage kommen können.

4) Die Teilchengeschwindigkeit ist abhängig von der magnetischen Feldstärke.

5) Eine Abhängigkeit von der Intensität des eingestrahlten und für die Beobachtung im Dunkelfeld erforderlichen Lichtes ist vorhanden. Die polare Bewegung findet jedoch auch eindeutig im Dunkeln statt, wie man durch wechselndes Ausschalten und Wiedereinschalten der Lichtquelle und Vergleich der Bahn beweisen kann.



Diese Resultate wurden mit den verschiedensten Anordnungen erhalten, so benutzte Prof. Ehrenhaft unter anderem horizontale Magnetfelder u. hielt die Teilchen durch ein vertikales elektrisches Feld im Blickfeld des Mikroskopes. Nach Einschalten beider Felder konnte der Probekörper durch Kommutation des Magnetfeldes beliebig oft in der Horizontalen hin- und hergeführt werden. Die Geschwindigkeit der Bewegung war stets nach beiden Seiten die gleiche. Dies ist ein Beweis für die Homogenität des Feldes. Nach Ausschalten des elektrischen Feldes trat gleichzeitige Bewegung in Richtung der Schwerkraft und des magnetischen Feldes auf. Aus der Grösse der horizontalen Ablenkung und der magnetischen Feldstärke, sowie dem Gewicht des Teilchens (bestimmt aus dem Fall im Schwerfeld) kann die magnetische Ladung bestimmt werden. Die so gefundenen magnetischen Ladungen sind von der Grössenord-

nung 10^{-10} bis 10^{-12} m.s.e. und kleiner.

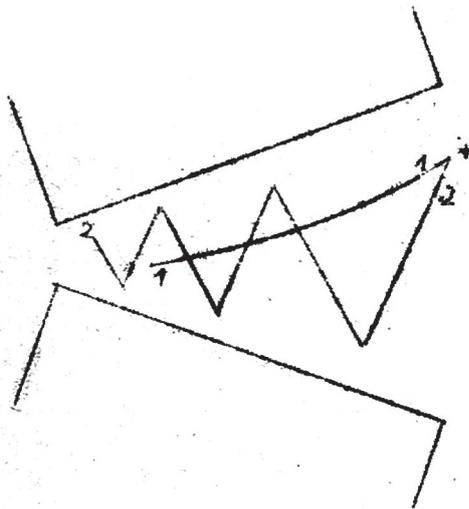
B) Versuche im inhomogenen magnetischen Feld.

Um jeden Zweifel über die Ursachen der Bewegung auszuscheiden (Frage der Homogenität) wurden eine Reihe von Versuchen im inhomogenen Feld angestellt.

Wir bringen wieder kleine Probekörper der erwähnten Grössenordnung in ein magnetisches Feld, das durch leichtes Schrägstellen der beiden Polschuhe zueinander inhomogen gemacht wird. Beobachten wir jetzt deren Bewegung, so finden wir



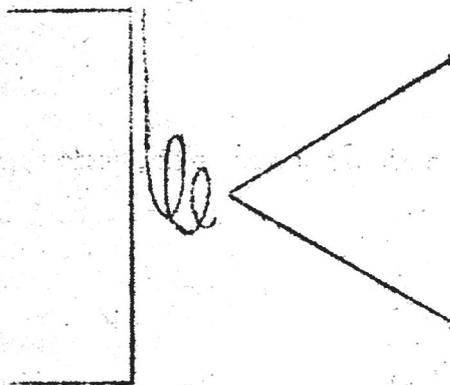
Teilchen, die sich in der Richtung auf die dichteren Kraft-



linien bewegen, wobei natürlich der Einfluss der Schwerkraft eine Neigung ihrer Bahn nach abwärts bewirkt. Wir finden aber auch andere Teilchen, die sich nicht nur in Richtung der dichteren Kraftlinien bewegen, sondern gleichzeitig eine ausgesprochene Bewegung in Richtung auf den einen oder anderen Polachse (Nord- oder Südpol) zeigen. Diese Teilchen ändern beim Kommutieren des Feldes ihre überlagerte Bewegung, während die Bewegung in Richtung der dichteren Kraftlinien bei der Kommutation unverändert bleibt. Die Bahn 1-1 zeigt die erst-erwähnten Teilchen, die Bahn 2-2 zeigt die Bahn eines Teilchens, das

ebenfalls die Bewegung in Richtung der dichteren Kraftlinien zeigt, aber darüber überlagert auch die Bewegung Nord-Süd, Süd-Nord zeigt. (Zig-Zagbahn). Die polare Bewegung tritt also auch hier auf.

2. Versuch: Die Anordnung ist aus der Abbildung zu ersehen: Die eine Pol wird als Spitze der andere als Platte ausgebildet. Im Gegensatz zum ersten Versuch verläuft nun der Dichte-



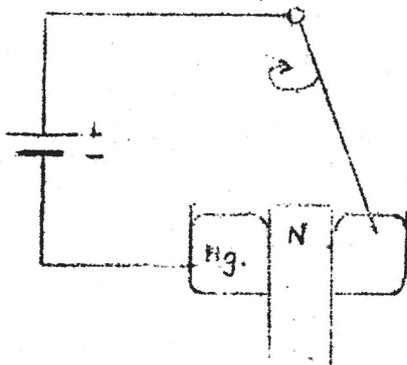
abfall der Kraftlinien in Richtung des Feldes selbst. Bemerkenswert ist nun der Umstand, dass die Bewegung durchaus nicht immer im Sinne der Feldtheorie erfolgt. So bewegen sich oftmals diamagnetische Körper zur Spitze, also in Richtung der dichteren Kraftlinien und paramagnetische Körper zur Platte, somit entgegengesetzt zur Richtung der magnetischen Polarisationskraft, die allein zur Erklärung der Phänomene zur Verfügung steht. Nun liess er

die früher erwähnten Versuche bereits eine zweite Kraftwirkung erkennen, die im Sinne der bisher üblichen Nomenklatur als Ladungskraft zu bezeichnen wäre, im Formelbild qH . Denkt man sich die Kraftwirkung im inhomogenen Feld der gegebenen Anordnung aus diesen beiden Komponenten zusammengesetzt, so ist es leicht möglich, dass etwa die Ladungskraft der Polarisationskraft entgegengesetzt gerichtet ist und sie überwiegt. In diesem Fall ist dann die beschriebene Umkehrung zu beobachten.

Die Feldvorstellung.

Am Anfang der heute üblichen Feldvorstellung steht ein höchst ~~ausführliche Beobachtung~~ ; Die Tatsache, dass sich eben gelagerte Eisenfeilspäne im magnetischen Feld zu Ketten von ganz bestimmter Form anordnen. Die heute übliche geometrische Deutung der Kraftverhältnisse in elektrischen und magnetischen Feldern stellt eine weitgehende Abstraktion des beobachteten Tatbestandes dar. Wichtig ist dabei der Umstand, dass jede Anlagerung feiner Eisenspäne ein Endergebnis statischer Art darstellt und keine Auskunft darüber gibt, welche Bewegung die Teilchen zu der Anordnung führte. Dennoch werden die aus dieser Anordnung abstrahierten geometrischen Verhältnisse auch zu Aussagen über mögliche Bewegungen verwendet. Beobachtungen mit genügend verfeinerten Mitteln zeigen nun, dass dies nicht zulässig ist. Es sei in diesem Zusammenhang auf die bereits erwähnten Versuche mit kleinen Teilchen im homogenen Magnetfeld verwiesen. Dabei konnten neben den bereits beschriebenen polaren Bewegungen und den durch die Umladungen hervorgerufenen Sprüngen auch ganz andersartige Bahnen beobachtet werden, die zumeist Schneckenlinien um eine irgendwie gekrümmte Achse darstellten. Ein gewisser Einfluss des Magnetfeldes auf die Weite der Windung war zu bemerken. Der Durchmesser der Kreise war zumeist sehr gering. Bahnen, die bei ungenauer Beobachtung Parabelform hatten, erwiesen sich als gebogene Schraubenlinien, deren Achse von den Teilchen ungefähr 180 mal in der Sekunde umlaufen wurde. Die Schraubenachse selbst konnte die verschiedensten Formen annehmen. Die Richtung der Rotation war nicht einheitlich. Verschiedene Teilchen beschrieben am gleichen Ort verschieden gerichtete Spiralen.

Einen zweiten Anhaltspunkt für die Kraftlinienvorstellung bot die Bewegung stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld. Hier sind zwei Grundversuche allgemein bekannt; Der Rotationsversuch Faradays und der Oersted'sche Versuch. Die Anordnung des ersten ist aus der Abbildung zu ersehen; Eine mit der Aufhängevorrichtung leitend verbundene Stricknadel taucht in ein Gefäß mit Quecksilber, da an die zweite Klemme der Stromquelle angeschlossen ist. Die ganze Vorrichtung ist über dem Pol eines Elektromagneten aufgestellt. Bei Einschalten des Stromes beschreibt die Nadel eine Drehbewegung im Sinne der Dreifingerregel.



Im Gegensatz zu diesem Versuch ist bei Oersted der Leiter festgehalten. Beobachtet wird die Bewegung des Magneten. Das Wesentliche an beiden Versuchen ist

die Tatsache, dass hier eine Rotation um den Strom bzw. um den Magneten stattfindet. Im zweiten Fall dient die bei der Umfassung des Stromes durch einen fiktiven Einheitspol geleistete Arbeit als Maß für die Stromstärke. Nun ist aber Folgendes zu beachten; Die Körper (Leiter, Magnetnadel) deren Bewegung untersucht wurde, waren stets auf irgendeine Art befestigt, entweder an einer Aufhängevorrichtung (Faradayversuch) oder an einer Stütznadel (Oersted). Die einem System der betrachteten Art zukommenden 6 Freiheitsgrade waren somit nicht alle realisiert. Die Beobachtungsergebnisse stellen also ebenso Spezialfälle dar, wie dies bei der Untersuchung der Feldeigenschaften durch Eisenfeilspäne der Fall war. Die bereits erwähnten Versuche zeigen nun, dass die nicht eingeschränkte Bewegung keineswegs rein kreisförmig ist, sondern in Spiralbahnen und Schlangenlinien vor sich geht. Eine Modifikation der alten Elektrostatik im Sinne der neuen Beobachtungsergebnisse erscheint somit nötig, dies umso mehr, als auch die Lorezkräft durchaus nicht zur Erklärung der Bewegungen herangezogen werden kann. Darüber jedoch später.

Die Verhältnisse in Flüssigkeiten.

Gegenüber dem einfachen Verlauf der Erscheinungen im Gas, sind die Verhältnisse in Flüssigkeiten weitläufiger. Doch bestehen auch hier durchwegs Beziehungen zum elektrischen Fall. Es werden zwei Erscheinungsgruppen gesondert zu betrachten sein, je nach den beobachteten Bewegungen der suspendierten Teilchen; 1. Polare, 2. Axiale Bewegungen (Rotation)

1) Polare Bewegung a) im elektrischen Feld

1807 entdeckt Reuss die Fortführung suspendierter Teilchen in schlecht leitenden Flüssigkeiten beim Anlegen von Spannungen. Quincke untersucht die Erscheinungen genauer und Helmholtz erklärt sie durch Strömungen innerhalb der benutzten Flüssigkeit. Durch die Verwendung in homogener Felder bei all diesen Versuchen wurden die Erscheinungen jedoch vielfach kompliziert. Prof. Ehrenhaft erhielt nun bei Untersuchungen in homogenen Feldern in der schon erwähnten Versuchsanordnung folgende Resultate:

- 1.) Nach Einschalten des Feldes beginnen die suspendierten Teilchen nach etwa 25-30 Sekunden zu wandern.
- 2.) Ausschalten des Feldes hat sofortigen Stillstand der Teilchen zur Folge.
- 3.) Im Gegensatz zu den Verhältnissen in Gasen tritt bei der Kommutation des Feldes keine Bewegungsumkehr ein. Die Teilchen eilen (bis auf ungefähr 10%) in der alten Richtung weiter.

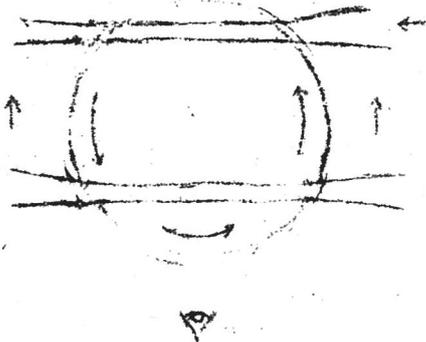
b.) Die Verhältnisse im Magnetfeld (Magnetophorese).

Zeigen genau dieselben Erscheinungen. Zu den Versuchen wurde Kastoröl verwendet. Im Gegensatz zum elektrischen Fall setzt hier eine Bewegung sofort nach Einschalten des Feldes ein. Wieder wurden entgegengesetzte Bewegungsrichtungen nahe aneinander laufender Teilchen konstatiert. Andere, in gleiche Richtung eilende Teilchen, verbinden sich zu grösseren Komplexen, sie koagulieren. Auch hier zeigt sich bei der Umkehr des magnetischen Feldes keine Umkehr der Teilchen. Im elektrischen Falle bedeutet dieses Verhalten, dass Ladungen genau der gleichen Quantität, aber von entgegengesetztem Vorzeichen entstanden sind. Dasselbe dürfen wir für das Magnetfeld annehmen.

2.) Axiale Bewegung (Rotation).

Die nun zu besprechenden Versuche wurden zumeist mit permanenten Magneten durchgeführt, um eventuell beim Einschalten auftretende Induktionserscheinungen zu eliminieren. Ansonsten wurde die gleiche Anordnung wie bisher benutzt. Verwendet wurden Legierungen hoher Koerzitivkraft (Alnico). Die Polschuhe waren in der von Weiss angegebenen Art abgeschrägt, um eine möglichst grosse Homogenität des Feldes zu gewährleisten. Die zu untersuchende Flüssigkeit konnte seitlich beleuchtet werden und wurde im Dunkelfeld eines Mikroskopes beobachtet.

1.) Versuch : ein zwischen die vertikal gestellten Pol-
 schuhe gebrachter Tropfen Eisenchlorid beginnt nach Ein-
 schalten des Feldes zu rotieren. Die Rotation konnte an der
 Bewegung suspendierter Teilchen von Eisenhydroxyd deutlich
 verfolgt werden. Die Teilchen vollführten eine vollständige
 Rotation und nicht bloss eine lokale Wirbelbewegung .
 Dies wurde durch Verschieben des fokussierten Lichtstrahls
 und Beobachtung der Teilchenbewegung eindeutig festgestellt.



Es handelt sich nun darum, die
 Abhängigkeit des Phänomens von
 verschiedenen Umständen zu un-
 tersuchen. So sind Beeinflussun-
 gen durch die Beleuchtung durch-
 aus denkbar und somit ergibt
 sich die Notwendigkeit Kontroll-
 versuche durchzuführen. Diese
 wurden auf drei verschiedene
 Arten angestellt :

a.) ~~nachweisliche~~ Beleuchtung von
 rechts und links. Die Bewegung
 erwies sich als unabhängig von
 der Richtung der Beleuchtung .

b.) eine Drehung des Magneten hatte eine ebensolche Dre-
 hung der Bewegungsrichtung zur Folge.

c.) schliesslich wurde als einzige Beleuchtungsquelle eine
 Kerze in 3 m Entfernung aufgestellt. Beobachtet wurden die
 Teilchen im Schatten des Bildes der Kerze am Tropfen. Sie
 beschrieben Schraubenlinien , teils nach oben , teils nach
 unten, nahmen aber ebenfalls an der allgemeinen Rotation
 teil.

Die Unabhängigkeit der Vorgänge von der Beleuchtung war
 somit erwiesen und die Rotation allein auf die Einwirkung
 des Magnetfeldes zurückgeführt.

Diese stellt nun , und das ist wesentlich , ein völlig
 neues Phänomen dar . Eine Erklärung nach Art des Faraday-
 schen Versuches ist hier nicht möglich. Dort handelte es
 sich um eine Kraft auf den Stromdurchflossenen Leiter ,
 also auf die bewegte Ladung , während hier die beobachte-
 ten Erscheinungen durch eine Kraftwirkung auf statische
 Ladungen , eben die Ladungen der suspendierten Teilchen
 hervorgerufen werden. Da die Rotation , vom Südpol aus
 gesehen , im Gegenuhreigersinn erfolgt , könnte man auf
 positive Ladungen schliessen und tatsächlich wegen die
 benutzten Suspensionen (Eisenhydroxyd) auch eine positive
 Ladung auf. Wichtig ist in dieser Hinsicht eine von Whittall
 angeregte Abänderung des Versuches , bei der im steigenden
 Masse Ammoniak zum Tropfen hinzugeführt wurde. Sofort trat
 eine deutliche Abnahme und schliesslich Umkehr der Rotation
 ein . Nun sind die Verhältnisse völlig klar ; da bei der
 Zersetzung des Ammoniaks negative Ladungen auftreten, kann
 die Rotationsumkehr auf die Ladungsumkehr und somit die
 Rotation selbst auf das Vorhandensein von statischen Ladun-
 gen in der Flüssigkeit zurückgeführt werden.

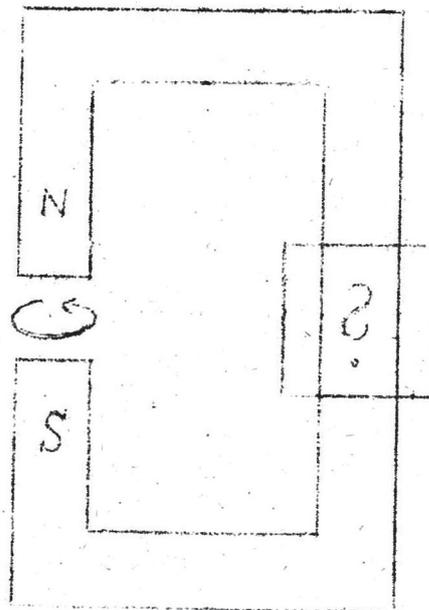
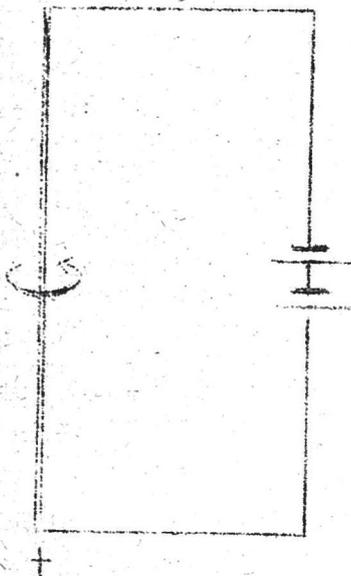
Eine an ihnen angreifende und vom Magneten verursachte
 Kraft bewirkt die Bewegung.

Es ist in diesem Zusammenhang nicht ganz uninteressant darauf hinzuweisen, dass bereits Maxwell den unbestimmten Gedanken einer Drehung um den Magneten hegte. Der experimentelle Beweis war ihm jedoch nicht geglückt. Wurde der Versuch längere Zeit fortgesetzt, so trat zumeist schon nach einer Stunde Stillstand ein, was man auf eine Entladung zurückführen kann. Jedenfalls genügte die kurze Einwirkung eines elektrischen Feldes (1/10 Sekunde) und die Rotation begann von neuem. Schon diese Tatsache zeigt, dass nicht alle Flüssigkeiten für die Ausführung des Versuches gleich gut geeignet sein werden. Längere Aufbewahrung hat stets Entladung und damit Schwächung des Effektes zur Folge.

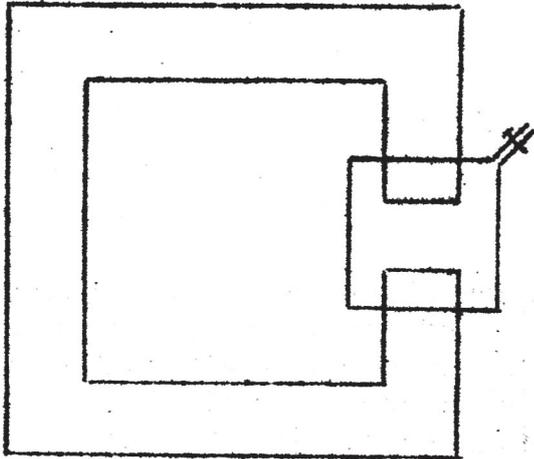
Auch die Stärke des Magnetfeldes beeinflusst die Rotationsdauer in sichtlicher Weise. Bei magnetischen Nebenschlüssen durch Stäbe aus weichem Eisen trat Verlangsamung der Rotation ein:

| | |
|-------------------------------------|-------------|
| Rotationsdauer ohne Nebenschluss | 40 Sekunden |
| mit Nebenschluss 8 qmm Querschnitt | 48 " |
| o h n e | 40 " |
| mit Nebenschluss 16 qmm Querschnitt | 55 " |
| " " 8 " " | 48 " |
| o h n e | 40 " |

Soweit der Versuch. Da es sich um statische Ladungen handelt kommt im Sinne der alten Nomenklatur nur ein elektrisches Feld als Bewegungsursache in Frage. Da aber die Versuchsanordnung gerade für die Ausschaltung aller nur irgendwie möglichen Potentialdifferenzen Sorge trug (Verbinden und Erden der Pole, Überziehen der Polschuhe mit Pizein oder Glimmer) ist diese Ursache bestimmt nicht vorhanden. Wir erkennen daher, dass wir es hier mit einem völlig neuen Phänomen zu tun haben; der Wirkung eines Magneten auf statische Ladungen.



In Analogie zum Oersted-Versuch ~~liegt der Gedanke an~~ einen magnetischen Strom nahe . Nun erhebt sich aber damit sofort die Frage nach der Energiequelle dieser Bewegung . Im Oersted'schen Fall wird der Strom von einer Volta'schen Säule geliefert . Das energetische Äquivalent ist durch die Energie des chemischen Prozesses in der Batterie gegeben . Energieverbrauch hat ein Absinken der Spannung zur Folge . Im Falle des besprochenen Versuches wäre eine Erklärungsmöglichkeit durch Einwirkung des Erdmagnetischen Feldes gegeben . Die Rotation erwies sich aber als unabhängig vom Erdfeld . Weiterhin besteht die Möglichkeit einer Energieaufnahme aus dem Tropfen selbst (chemische Energie) . Das liefe jedoch auf ein perpetuum mobile zweiter Art hinaus . Bleibt noch die Energie des Magneten selbst . Es fragt sich , ob sie im Gegensatz zur herrschenden Theorie eine Abnahme erfährt . Dazu der



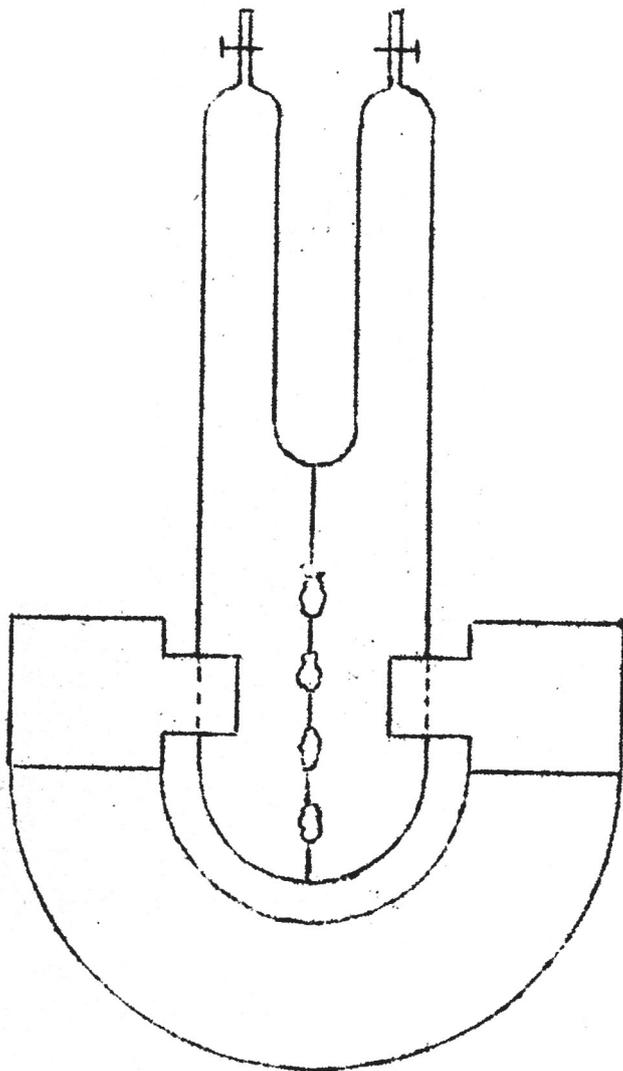
Versuch 2. :

Die nunmehr benützte Anordnung ist aus der Skizze zu ersehen : die Polschuhe eines Elektromagneten (benutzt wurde Weicheisen) ragen in eine mit angesäuertem Wasser angefüllte Kammer (1% Schwefelsäure). Zur Messung der entstehenden Gasmengen sind mehrere Ableitungen vorhanden . Die auftretenden Bewegungen wurden mit einem Mikroskop beobachtet .

Zur besseren Orientierung waren die Pole in verschiedener Weise ausgebildet, allerdings doch so , dass die Homogenität des Feldes durchaus gewahrt blieb . Zunächst beginnt nach Einleiten der Flüssigkeit der chemische Prozess (H_2SO_4 plus Fe : Einwirkung der Säure auf die Polschuhe) auch schon ohne Magnetfeld . Die in einem bestimmten Zeitabschnitt entstehende Menge Wasserstoff nimmt mit der Zeit ab . So wurden nach 10 Minuten 17 cm^3 Gas gebildet , nach 80 Minuten aber nur mehr 10 cm^3 . Die Gasblasen nahmen ihren normalen durch Auftrieb und Schwerkraft bestimmten Weg .



Dieser Vorgang änderte sich jedoch vollständig nach Einschalten des Feldes . Bei den nunmehr eintretenden Bewegungen war die Wirkung des Auftriebes gar nicht mehr zu erkennen . Blasen wurden entgegen dem Auftrieb nach unten geschleudert , der Grossteil jedoch nahm an einer axialen Rotation teil . Diese Rotation fand auch gegen die Wirkung des Auftriebes bei horizontaler Anordnung der Polschuhe statt . Zugleich stieg die erzeugte Gasmenge auf 20 cm^3 nach 80 Minuten (Anmerkung : diese Steigerung des Ertrages der Elektrolyse ist bereits als DRP / Kilguss angemeldet) . Auch hier treten also bedeutende Energien chemischer und kinetischer Art auf . Wiederum erhebt sich die Frage nach der Quelle dieser Energien . Und hier ist beim Versuch am Elektromagneten keine einfache und eindeutige Aussage möglich . Vielmehr sind die energetischen Verhältnisse durch die auftretenden Wärmeverluste vielfach kompliziert . Zur quantitativen Untersuchung wurden daher wieder permanente Magnete herangezogen .



3. Versuch :
 Die Anordnung kann der Abbildung entnommen werden: eine Doppelprovette war an ihrem unteren Ende durch eine mehrfach durchbrochene Glaswand getrennt . Die Lücken wurden mit Asbest ausgefüllt . Dadurch konnten die am Nord- und Südpol entstehenden Gas Mengen getrennt aufgefangen werden, ohne dass damit die Verbindung für den zersetzenden Strom unterbrochen wurde . In den unteren Teil des Glasgefäßes ragten von beiden Seiten die Polschuhe des Alnicomagneten . Sie waren

während des Versuches metallisch verbunden. Nachdem die Gefässe mit 4% Schwefelsäure angefüllt worden waren, wurden die entstandenen Gas Mengen getrennt aufgefangen und chemisch untersucht. Nach 2 Stunden und 50 Minuten entwickelten sich über dem Südpol 41 cm^3 , über dem Nordpol 52 cm^3 Gas. Ausserdem wurden am nördlichen Polschuh zahlreiche schmale Kanäle ausgefressen (Tiefe 1.5 mm , Durchmesser 0.2 mm), während der Südpol völlig unberührt blieb. Hier trat also besonders deutlich die Beteiligung des Magneten selbst an der Reaktion in Erscheinung. Es konnten auch alle Bewegungen der Gasblasen in der Art, wie sie bei Versuch 2. auftraten, beobachtet werden.

Die Prüfung der energetischen Verhältnisse.

Aus Anziehungsversuchen mit dem mitgelieferten Polschuh (maximale Entfernung, in der ein Heranziehen des Polschuhes an den Magneten noch auftrat) konnten durchschnittliche Werte für die Polstärke des Magneten ermittelt werden. Einige Tage nach Abnehmen der Polschuhe erwies sich der Magnet auf diese Weise als völlig konstant. Gleichzeitiges Überprüfen mit dem ballistischen Galvanometer hatte dasselbe Ergebnis. Nun wurde aber der Versuch, wie 3, durchgeführt. Nach 3 Tagen ergab sich, nach beiden Methoden, eine Abnahme der Polstärke um 1500 Maxwells . Dabei ist zu betonen, dass der Magnet selbst mit der Flüssigkeit nicht in Berührung stand und daher auch nicht dem Einfluss der Säure ausgesetzt war. Ausserdem war die Koerzitivkraft eine sehr grosse, sodass einige $1000 \text{ Ampèrewindungen}$ zur Erzeugung von Änderungen im festgestellten Ausmass nötig gewesen wären. Trotz dieser Abnahme, die nun aber ohne weiteres mit der Arbeit, die bei der Reaktion verbraucht wurde, in Verbindung gebracht werden kann, blieb der Magnet nach dem Experiment weiterhin konstant auf dem neuen tieferen Wert. Hier ist auch das Analogon zur Abnahme der Spannung der Volta'schen Säule beim Oerstedversuch. Es ergibt sich somit die Möglichkeit, den Begriff des magnetischen Stromes einzuführen. Es ist an dieser Stelle sehr bemerkenswert, dass eine derartige Definition bereits 1935 auf dem internationalen Kongress der Elektrotechniker in Brüssel getroffen wurde: bezeichnet ein Pragma die praktische Einheit der Magnetomotorischen Kraft (MMK), so gilt nach dieser Definition die Relation:

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Pragma} \cdot \text{praktische Einheit des magnetischen Stromes}$$

die ihr völliges Analogon in der Beziehung:

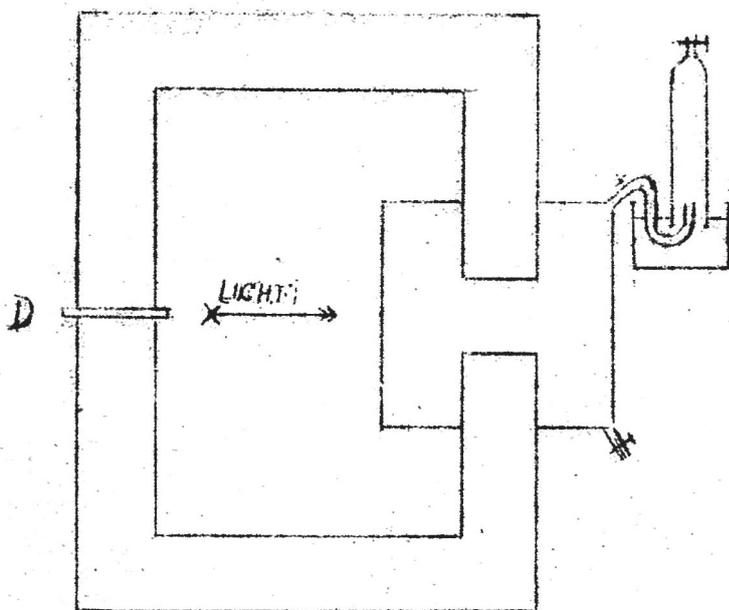
$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Ampère} \quad \text{hat.}$$

Die chemische Wirkung des Magnetismus .

Am Anfang unserer Darlegung erwies es sich als notwendig , zur Beschreibung der beobachteten Phänomene eine bestimmte Nomenklatur einzuführen . Gewählt wurden die bisher in der Elektrizität üblichen Begriffe des Feldes , der Ladung usw. Weiterhin ergab es sich , dass manche Begriffe der Elektrizität zusammengesetzter Natur sind und auf andere einfachere zurückgeführt werden können , z.B. : der elektrische Strom auf bewegte Ladungen . In den früher erwähnten Versuchen haben wir im homogenen und inhomogenen magnetischen Felde das Vorhandensein einzelner magnetischer Nord- oder Südladungen festgestellt . Analog zur Elektrizität müssten wir eine bewegte magnetische Ladung nun als magnetischen Strom bezeichnen . Es erhebt sich daher folgende Frage : "Existiert ein solcher magnetischer Strom ?"

Der elektrische Strom hat als wesentliches Kennzeichen z.B. seine chemische Wirkung (von der Wirkung des elektrischen Stromes auf den einzelnen Magnetpol - Ampère-Oersted-Versuch wurde schon früher gesprochen) . Wir beschäftigen uns also mit Untersuchungen über die chemischen Wirkungen des magnetischen Stromes .

1886 hat bereits Gross in den Wiener Akademie Berichten folgendes publiziert : er verwendete zu seinen Versuchen ein gewöhnliches Galvanisches Element mit 2 Eisenstäben als Elektroden . Theoretisch ist in diesem Fall bei leitender Verbindung der Stäbe kein Strom und somit auch keine Zersetzung des Elektrolyten zu erwarten , praktisch treten aber durch die stets vorhandenen Ungleichförmigkeiten der Stäbe dennoch gewisse Kontaktladungen auf . Ein in die Schliessungsspirale gelegtes Galvanometer zeigt schwache Ströme wechselnder Richtung . Wird jedoch der eine Stab durch das Magnetfeld eines herumgelegten Solenoids magnetisiert , so ändern sich die



Verhältnisse sofort in augenfälligerweise . Es beginnt eine lebhaft Gasentwicklung im Elektrolyten und das Galvanometer zeigt einen sehr starken Strom an . Die Veränderung kann ja nur ihre Ursache in dem Hinzutreten des magnetischen Feldes haben und Gross selbst interpretiert schon im Sinne einer chemischen Wirkung des Magnetismus .

Das Phänomen erfuhr jedoch keine weiteren Untersuchungen , wohl auch deshalb , da die neuentstandene Elektrodynamik und Elektronentheorie das Interesse auf andere Gebiete lenkte . Die in letzter Zeit gefundene Analogie in Elektrizität und Magnetismus liessen auch hier eine Untersuchung zweckmässig erscheinen .

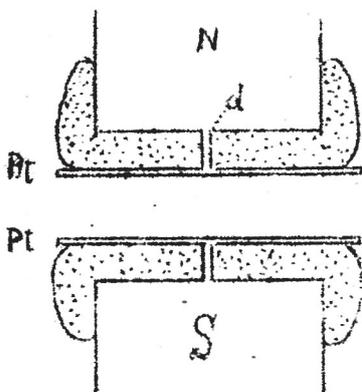
Dem Umfang des Gebietes entsprechend, konnten diese Untersuchungen anfangs nur qualitativ sondierend durchgeführt werden. Doch war auch dieses Ergebnis völlig neuen Charakters und gab Anlass zu weiteren Überlegungen. Die bei der Untersuchung verwandte Apparatur ist aus der Abbildung zu ersehen, sie wird in Zukunft kurz als Schaltung A zitiert werden. Zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten befindet sich das Gefäß mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, der Magnet selbst besitzt bei D eine Unterbrechung die durch eine Glimmerschicht isoliert ist, um auch elektrische Potentialdifferenzen auf die Polschuhe übertragen zu können. Die Polschuhe selbst waren, je nach der Art der Untersuchung, entweder vergoldet, aus reinem Nickel (99,99%) oder mit einer Gummischicht sorgfältig überzogen. Aus den zahllosen Experimenten seien hier nur einige kurz angeführt:

- 1.) Magnetoden vergoldet, als Flüssigkeit aqua bidestillata. Bei Einschalten des Magneten zeigten sich einige Diskontinuitäten in der Flüssigkeit. Der, auch bei Normalumständen einsetzende Lösungsprozess von Metallen in Flüssigkeiten, schien bedeutend verstärkt.
- 2.) Magnetoden vergoldet, Flüssigkeit Eisenchlorid. Nach längerem Betrieb des Magneten zeigten sich an den Rändern der Polschuhe deutliche Auflösungserscheinungen und die Goldschicht war mehrfach durchbrochen.
- 3.) Magnetoden Nickel, Flüssigkeit aqua bidestillata. Da sich praktisch jedes Metall in geringen Mengen in Wasser auflöst, wurde die Anordnung zunächst 24 Stunden ohne Magnetfeld stehen gelassen. Nach dieser Zeit konnte mit empfindlichen chemischen Reagenzien (Dimethylglyoxim) kein gelöstes Nickel mehr in Wasser nachgewiesen werden. Nun wurde das Magnetfeld eingeschaltet und die Lösung nach einer halben Stunden wieder auf Nickel geprüft. Die Reaktion verlief deutlich im positiven Sinne (starke Rotfärbung).
- 4.) Magnetoden Nickel, Flüssigkeit Nickelsulfat. Die Lösung war vortrefflich klar und zeigte feste Teilchen auch bei mikroskopischer Beobachtung nur in sehr geringen Mengen. Wieder genügte nur eine halbe Stunde magnetischer Einwirkung, um die Lösung in eine Suspension grosser Dichte zu verwandeln. Ein durch die Flüssigkeit hindurchgeschickter fokussierter Lichtstrahl wies nun deutlich den Tyndall-effekt auf, Tags darauf waren die entstandenen Teilchen koaguliert und als Gel zu Boden gesunken.
- 5.) Anordnung 4 wurde 65 Stunden lang bei konstanter Temperatur und geringer Ampèrewindungszahl in Betrieb gehalten. Durch leitende Verbindung der Magnetoden war jede elektrische Einwirkung ausgeschlossen. Wie in 4 konnte die anfangs schon beschriebene Versetzung der Lösung beobachtet werden, doch bildeten sich auch Kristalle und Gasblasen die auf ein Ablaufen chemischer Reaktionen hindeuten.
- 6.) Magnetoden Eisen. Flüssigkeit Kupfersulfat. Nach Einschalten des Magnetfeldes bildeten sich in der Nähe der Magnetoden zahllose rote Pünktchen und bewirkten eine fast augenblickliche Verfärbung der Flüssigkeit. Im weiteren Verlaufe bedeckten sich die Magnetoden mit einer dicken Schicht von schwammig aufgelockertem Kupfer. Die mikroskopische Beobachtung ermöglichte es, die Entstehung der Kupferteilchen, vor allem ihre Bewegung, eingehend zu verfolgen.

Damit ist der Anschluss an § 2 hergestellt; es sind die gleichen Bahnformen zu beobachten, die schon dort erwähnt wurde: die Schraubenlinien (helical path). Die Richtung der Rotation lässt die Anwesenheit positiver elektrischer Ladung auf dem Feilchen vermuten. Im Grossen wurden die hier beobachteten Erscheinungen schon 1857 von Ramsden beschrieben.

Der kurze Überblick über die vorerst nur qualitativ durchgeführten Experimente zeigte deutlich eine Beeinflussung von Lösungen und Lösungsvorgängen durch die Einwirkung von Magnetfeldern. Übrigens wurde bereits anlässlich der Untersuchung des energetischen Äquivalents der im magnetischen Feld verursachten Bewegungen eine ganz bestimmte Art chemischer Aktion des Magneten erwähnt: Seine Einwirkung auf den Verlauf der

Reaktion Säure + Eisen. Es konnte eine Verstärkung der Gasentwicklung festgestellt werden. Es ist nun nahe liegend, eine ähnliche Anordnung zu quantitativen Messungen zu verwenden. Es handelt sich nun um Effekte, die genau so im elektrischen Feld auftreten (Elektrolyse). Daher können Vergleiche sehr leicht durchgeführt werden und es wird sich darum handeln, gleiche Wirkungen sowohl mit magnetischen, als auch mit elektrischen Feldern hervorzu bringen und sie nach der Intensität ihrer Ursache quantitativ zu beschreiben. Um solche Vergleiche schnell und exakt durchführen zu können, wurde folgende Anordnung benützt: Die Grundlage bildet wieder der Elektromagnet mit Küvette, der bereits bei den qualitativen Untersuchungen zur Verwendung kam. Zusätzlich wurden zwischen die Magnetoden zwei



Platinfolien gebracht, durch die es möglich war, gleichzeitig mit dem magnetischen Feld ein zu ihm paralleles elektrisches Feld zu erzeugen. Die technische Ausführung zeigt die Abbildung; N S sind die Magnetoden die diesmal mit einer dünnen Glasschicht überzogen waren, Pt die durch d mit den Magnetoden leitend verbundenen Platinfolien. Der Kürze wegen wird diese Anordnung stets als Schaltung B zitiert werden.

Nun ist eine solche Apparatur besonders zu Differenzversuchen geeignet

Es handelt sich ja darum, die Existenz von magnetischen Strömen, d.h. von Erscheinungen solcher Art nachzuweisen, wie sie auf dem Gebiet der Elektrizität bei Einwirkung elektrischer Felder auf dissoziierte Flüssigkeiten stattfinden. Im elektrischen Fall ist die Wirkung deutlich polar und gibt Anlass zu der Unterscheidung zwischen Anode und Kathode. Nun weist auch jeder Magnet polare Eigenschaften auf. Es ist also zu vermuten, dass die durch die qualitativen Untersuchungen bereits als existent erwiesene chemische Wirkung ebenfalls polarer Natur sein wird. Es besteht somit die Möglichkeit einer Änderung des Verlaufs der chemischen Reaktion bei gleichzeitiger elektro-magnetischer Einwirkung. Dies die gedankliche Voraussetzung zur Durch-

führung des Experiments. Damit wird aber die Art der technischen Durchführung bereits weitgehend festgelegt. Es ist das quantitative Ergebnis eine Reaktion (etwa die in einer bestimmten Zeiteinheit abgeschiedene Gasmenge) zu untersuchen

- 1) ohne Magnetfeld
 - 2) mit Magnetfeld aber ohne elektrisches Feld
 - 3) mit Magnetfeld und elektrischem Feld. Hier sind 2 Variationen möglich A) Nordpol und Kathode auf der gleichen Seite, B) Südpol und Kathode auf der gleichen Seite.
- Daneben muss zur Feststellung der Konstanz der chemischen Reaktion stets wieder eine Messung ohne Felder eingeschaltet werden. Die Tabelle zeigt das Ergebnis zweier Versuchsreihen

Vers. 1/8/43

Vers 1/11/43

Gasentwicklung in 10 Minuten in ccm

| | | | |
|----------------------|-------|----------------------|-----|
| Ohne Feld | | ohne Feld | |
| Chem Prozess allein | 1,2 | Chem Prozess allein | 1,1 |
| Kathode unten | | Kein Feld | |
| (Kein Magn. Feld) | 1,9 | Chem Proz. allein | 1,1 |
| Kathoden unten | | Anode unten | |
| Kein Magn. Feld | 1,8 | kein magn. Feld | 5,0 |
| Kathode unten | | Anode unten | |
| Nordpol unten | 2,0 | Südpol unten | 2,9 |
| Kathode unten | | Anode unten | |
| Südpol unten | 1,1 | Nordpol unten | 2,4 |
| Kein Feld | | Anode unten | |
| Chem. Prozess allein | 1,2 | kein magn. Feld | 3,1 |
| Kathode unten | | Anode unten | |
| Nordpol unten | 1,3 | Südpol unten | 1,8 |
| Kathode unten | | Anode unten | |
| Südpol unten | 1,15 | Nordpol unten | 1,4 |
| Kein Feld | 1,1 | Kein Feld | |
| chem. Prozess allein | | Chem. Prozess allein | 1,1 |
| Kein Feld | | | |
| Kathode unten | 1,175 | | |

Als chemischer Prozess diente die Einwirkung verdünnter Schwefelsäure auf Eisen, als Massstab die in 10 Minuten entwickelte Gasmenge. Die Art der Schaltung ist jeweils angegeben. Bemerkenswert ist die deutliche Verstärkung der Reaktion in dem Fall, dass Nordpol und Kathode vereinigt sind. In gleicher Weise wirkt die Kombination Südpol- Anode. Umgekehrt scheinen Nordpol und Anode einander entgegenzuwirken. Jedenfalls ist bei dieser Schaltung eine Verminderung der Gasentwicklung zu verzeichnen. Endgültige Schlüsse können aus diesen Versuchen noch nicht gezogen werden doch wird die chemische Aktivität des Magnetismus nicht mehr zu übergehen sein.

Weitere Untersuchungen über die Bewegungen in Flüssigkeiten

Im Verlauf der Experimente, die die chemische Wirkung des Magnetismus zu erweisen hatten ergaben sich weitere wichtige Aufschlüsse über die Bewegung von in Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. Diese Resultate sind insofern von Interesse, als sie die schon beschriebenen Gesetzmässigkeiten, nämlich die Existenz von polarer und axialer Bewegung zugleich aufs Neue deutlich nachweisen konnten. Doch bringt jede Abänderung der Versuchsbedingungen neue Effekte zutage. Es erfolgt daher eine Aufzählung der experimentellen Ergebnisse, insofern sie von prinzipieller Bedeutung sind.

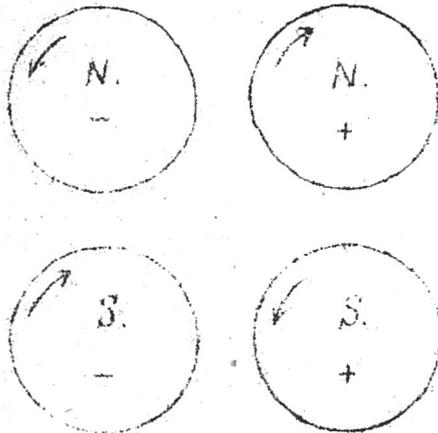
- 1) Schaltung B; elektrisches und magnetisches Feld zugleich. Flüssigkeit: Kupfersulfat
- a) Das bei der Elektrolyse an den Elektroden abgeschiedene Kupfer bildet eine dünne Säule, die langsam an Höhe zunimmt.
- b) Gleichzeitig ist eine deutliche Rotation der gesamten Flüssigkeit festzustellen.

Beide Phänomene sind bekannt, a) folgt aus den elektrolytischen Gesetzen, b) wurde anlässlich der Betrachtung axialer Bewegungen in Flüssigkeiten näher beschrieben. Nun kann aber unter Umständen der entstandene Kupferbaum bis zur Anode weiterwachsen und schliesslich die leitende Verbindung \pm herstellen. In diesem Fall setzt sofort eine deutliche Verstärkung der Rotation ein - und dieses Ergebnis ist von besondere Wichtigkeit. Es wurde bereits früher der (idealisierte) Fall des um den Strom richtenden Magnetpols in Parallele gesetzt zur Rotation geladener Teilchen im Magnetfeld. Es schien auf diese Weise möglich, den Begriff des magnetischen Stroms einzuführen. Doch war dort die Analogie noch nicht vollständig, es fehlte ein wichtiges Element der magnetische Leiter. Beim Orstedversuch sind zwei deutlich abgegrenzte Bereiche vorhanden - Leiter und Umgebung. Bei der Bewegung des fiktiven Einheitspols ist es nun wesentlich, dass dabei das Leiterstück mit umfasst wird, da nur in diesem Fall das magnetische Linienintegral einen von Null verschiedenen Wert annimmt. Im Magnetfeld ist keine solche ausgezeichnete Linie vorhanden und die Kreisbewegung geht an jeder Stelle des Magnetfeldes vor sich. Es scheint also am Begriff des Stroms ein sehr wichtiges Element zu fehlen. Der eben erwähnte Versuch zeigt nun, dass die Dinge doch ein wenig anders liegen. Denn 1) ändert sich die Rotation schon vor Kurzschluss der Elektroden statt und 2) ist bei Kurzschluss eine deutliche Verstärkung wahrzunehmen. Dies zeigt aber, dass sich 1) und 2) nur quantitativ unterscheiden, dass sie aber derselben Erscheinungsgruppe unterzuordnen sind d.h., dass die Rotation um den Leiter und die Rotation im Feld und ohne Leiter durchaus parallele Erscheinungen sind.

2) Schaltung A, Magnetoden: weiches Eisen; Flüssigkeit: Angesäuertes Wasser.

Der chemische Prozess Säure+Eisen verläuft ohne Magnetfeld durchaus normal. Der Weg der Blasen ist durch den Auftrieb allein bestimmt. Dies ändert sich völlig beim Einschalten des Feldes. Die dabei auftretenden Rotationen sind bereits an anderer Stelle ausführlich beschrieben worden. Es handelte sich dort um die Bewegung zahlreicher Gasblasen. Wird hochverdünnte Säure verwendet, so ist die Zahl der Gasblasen nur gering. In diesem Fall kann auch eine einzelne Blase beobachtet und in ihrer Bahn verfolgt werden. Diese Einzelbeobachtungen zeigen, dass neben axialen Bewegungen auch rein polare auftreten, ja, dass es möglich ist, eine Blase durch oftmaliges Kommutieren mehrmals in der Vertikalen hin und herzuführen. Die Bewegung tritt auch dann ein, wenn die Magnetspole durch Glasplatten von der Blase getrennt werden. Dies zeigt, dass auch Gasblasen mit magnetischen Ladungen behaftet sein können.

3) Schaltung A, Magnetoden: Eisen; Flüssigkeit: 4% angesäuertes Wasser. Kolloidteilchen.



Bemerkenswert ist die entgegengesetzte Rotation der Blasen und der Teilchen.

4) Schaltung B. Beobachtet wurde die Rotationsrichtung chemisch erzeugter Gasblasen unter der gleichzeitigen Einwirkung eines elektrischen und eines magnetischen Feldes. Die Zeichnung zeigt die

Abhängigkeit der Rotationsrichtung von der Art der Schaltung der beiden Felder. Umkehr der Rotationsrichtung trat sowohl bei Umkehr der elektrischen, als auch bei Umkehr des magnetischen Feldes auf. Wieder rotieren Kolloidteilchen anders herum als Gasblasen.

ZUSAMMENFASSUNG: Es wurde im Verlauf der Darstellung eine Reihe von Erscheinungen ausgeführt, die bisher teils unbekannt, teils wenig beachtet waren. Es ergab sich weiterhin die Notwendigkeit, diese Erscheinungen in sinnfälliger Weise zu beschreiben, d.h. vor allem, die hier nötigen Begriffe zu finden. In vielen Fällen erwies es sich als zweckmässig, das bereits ausgebildete Begriffssystem der Elektrodynamik nach sorgfältiger Kritik auf die neuen Erscheinungen zu übertragen. Dieses involviert noch keinerlei Theorie, sondern führt nur eine gewisse Bezeich-

nungsweise ein. Allerdings können nun aus der Möglichkeit einer vollständigen Übertragung des elektrodynamischen Begriffssystems auf die magnetischen Erscheinungen weitere Konsequenzen gezogen werden. Die gleichen Begriffe deuten auf gleiche Ursachen und dies lässt eine Parallelität auch der Erscheinungen als durchaus plausibel erscheinen. Andererseits wurden aber Beobachtungen aufgeführt, die auf keinen Fall in althergebrachter Weise gedeutet werden können, so z.B., um den einfachsten Fall herauszugreifen, die Rotation des Eisenchloridtropfens zwischen den Magnetpolen. Es scheint hiermit durch diese Ergebnisse ein neuer Weg der Beschreibung elektromagnetischer Erscheinungen geboten. Und da ist es durchaus von Vorteil, wenn alle experimentellen Ergebnisse in systematischer Ordnung zur Verfügung stehen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über das bisher Erreichte:

ELEKTRIZITÄT

- 1) Im homogenen elektrischen Feld bewegte Körper. Umkehr der Bewegungsrichtung mit Umkehr des Feldes. Elektrische Ionen, Faraday 1930
- 2) Erzeugung positiver u. negativer elektrischer Ladung durch Reibung.
- 3) Elektrophorese, Reuss 1809
- 4) Koagulation von Teilchen im elektrischen Feld
- 5) Elektrophotophorese 1920, 1928. In einem homogenen elektrischen Feld bewegen sich Körper in oder gegen die Richtung des Feldes, wenn sie stark bestrahlt werden. Sie reversieren mit dem Feld und ihre Geschwindigkeit ist eine Funktion der Feldstärke und der Intensität des Lichtes.
- 6) Elektrolyse des Wassers, 1888.

MAGNETISMUS

- 1) Im homogenen magnetischen Feld bewegte Körper, Umkehr der Bewegungsrichtung mit Umkehr des Feldes. Magnetische Ionen. 1930, 1941.
- 2) Erzeugung von Nord- und Südmagnetischen Polen durch Reibung 1941
- 3) Magnetophorese, 1941
- 4) Koagulation von Teilchen im magnetischen Feld 1941.
- 5) Magnetophotophorese 1930. Dasselbe im magnetischen Feld
- 6) Magnetolyse des Wassers, bereits am Beginn des 19. Jahrhunderts versucht. (FRESNEL 1820). 1942 von EHRENHAFT mit dem Elektromagneten durchgeführt, 1944 mit dem permanenten Magneten.

7) Verlust der Polstärke einer Volta-
 batterie im Verlauf der Elektrolyse
 7) Verlust der Polstärke
 des sogenannten permanenten
 Magneten bei der Magneto-lyse

8)a) Magnetischer Wirbel um
 den elektrischen Strom (Oersted)
 8)a) Elektrischer Wirbel um
 den die beiden Pole des sog.
 permanenten Magneten verbind-
 enden Draht. 1944.
 b) Ablenkung der Magnetnadel durch
 die Pole der Voltabatterie verbind-
 enden Draht. Messung der Strom-
 stärke nach Ampere durch die
 Arbeit des den Strom umkreisenden
 Einheitspoles.
 b) Messung der Intensi-
 tät des Magnetischen Stroms
 durch die Arbeit der den
 Strom umkreisenden Einheits-
 ladung

9) Spiralbahnen von Blasen und
 Teilchen im konstanten homo-
 genen Magnetfeld, in Flüssig-
 keiten, sowie in Gasen.

10) Bewegung einer einzelnen
 elektrischen Ladung. Folge: Magnet-
 feld (Rowland 1876)
 10) Bewegung eines einzelnen
 Magnetpols. Folge: elektris-
 ches Feld (Faraday Induktions-
 versuch 1831.)

DIE LORENZKRAFT

Für die Kräfte, die auf schnellbewegte elektrische La-
 dungen im Magnetfeld einwirken, hat Lorenz den ein-
 fachen Ausdruck $K = \text{const} \cdot (vH)$ angegeben. Die Aufnahmen von
 Kathodenstrahlbahnen unter dem Einfluss magnetischer
 Felder weisen andererseits - was die Form betrifft - eine
 grosse Ähnlichkeit mit den beobachteten Schraubenbahnen
 auf. Man könnte daher versucht sein, die im vorigen
 Kapitel beschriebenen Bewegungen auf die Wirkung einer
 Lorentzkraft zurückzuführen. Dies ist jedoch aus 2 Grün-
 den nicht möglich 1) deshalb nicht, da die Bewegung
 im Magnetfeld auch dann eintrat, wenn elektrisches und
 magnetisches Feld parallelgeschaltet waren. Im elektri-
 schen Feld allein bewegen sich die Teilchen in polarer
 Richtung, stellen also einen Strom parallel zur Rich-
 tung des später hinzukommenden Magnetfeldes dar. Ob-
 wohl in diesem Fall $(vH) = 0$ sein müsste, findet dennoch
 bei zusätzlichem Einschalten des Magnetfeldes deutliche
 Rotation statt.

2) ist die Lorentzkraft gegeben durch $1/c \cdot (vH)$, d.h.
 sie erreicht erst bei v nahezu der Lichtgeschwin-
 digkeit eine merkliche Grösse - Die beobachteten Geschwin-
 digkeiten liegen aber weit unter dem gefor-
 derten Wert.

Mathematische Betrachtungen.

Die Maxwell'schen Gleichungen sind unsymmetrisch in Bezug auf das Glied H . Aus rein mathematischen Erwägungen formulierte Heaviside 1895 die zweite Gleichung in der Form $\operatorname{rot} E = -\mu/c \cdot dH/dt + 4\pi s/c, H$, die im zweiten Glied bereits den magnetischen Strom enthält. Diese symmetrische Anordnung wird durch die besprochenen Versuche sehr wahrscheinlich gemacht. Ein zweites, ebenfalls experimentelles Argument ist folgendes: Durch Elimination von H ist es möglich, eine Gleichung nur in E zu erhalten. Je nachdem, ob man die MAXWELL'sche oder die HEAVISIDE'sche Form der 2. MAXWELL'schen Gleichung verwendet, resultieren 2 verschiedene Differentialgleichungen. Eine davon ist als Telegraphengleichung bereits weitgehend in Verwendung und hat sich in der Praxis bestens bewährt - es ist diejenige, die das Glied des magnetischen Stroms enthält.

Überhaupt sind in der theoretischen Physik der letzten Jahre in steigendem Masse Bemühungen zu verzeichnen, die auf eine weitgehende Parallelstellung Elektrizität-Magnetismus hinauslaufen. So führen BEDGE und ADAMS als Kraftwirkung auf die magnetische Ladung den Ausdruck $f = H + 1/c \cdot (vE)$ ein (1943). DIRAC erklärt, dass die moderne Quantentheorie den magnetischen Einzelpol ohne weitere Zusatzhypothese zur Folge habe. Doch hat auch hier in letzter Hinsicht das Experiment zu unterscheiden. Und dieses zeigt, dass auch die Voraussetzungen einer neuen, "kombinierten" Theorie, nämlich die Kraftlinienverteilung, einer eingehenden Prüfung unterzogen werden muss.

Photophorese.

Bei allen bisherigen Untersuchungen mußte bei der Beobachtung eine starke Beleuchtung angewandt werden. Bereits bei den Versuchen im homogenen Feld wurde beobachtet, daß dabei eine Einwirkung der Lichtintensität auf die Form der Bahnen der Teilchen zu bemerken war. Soll man nun über die Wirkung des Feldes eine nähere Aussage machen, so wird zuerst die Wirkung des Lichtes zu untersuchen und von der des Feldes zu trennen sein. Wir besprechen daher nun die ponderomotorischen Kräfte des Lichtes.

Die bisher bei Untersuchungen dieser Art verwandte Anordnungen bestanden zumeist aus drehbar aufgehängten Flügeln, Lamellen usw. Die Testkörper waren also einmal in ihrer Bewegung eingeschränkt, andererseits viel zu gross den zu messenden Kräften gegenüber. Die Kondensatoranordnung bietet nun mit ihren suspendierten Teilchen genügend kleine Probekörper, die ausserdem nach allen Richtungen frei beweglich sind. Wie bereits erwähnt, kommen auf diese Art noch Kräfte von 10^{-12} zur Auswirkung. Ein anderer Effekt ist da bei ebenfalls ausgeschaltet; Jeder grössere Körper enthält an seiner Oberfläche eine Gasschicht adsorbiert, die in ihren Ausmassen von dem Druck abhängig ist, der im Untersuchungsraum herrscht. Die Komplexität der Verhältnisse hat zur Folge, dass Versuche mit Lamellen und drehbaren Flügeln nur sehr schwer reproduzierbar sind und daher nicht zu Aussagen allgemeiner Art verwendet werden können. Auch diese Nebenwirkung fällt in der Kondensatoranordnung weg. Dementsprechend sind hier prinzipiell neue Ergebnisse zu erwarten:

Beobachtet wurde die Bewegung suspendierter Teilchen unter der Wirkung eines schmalen Lichtstrahls. Sie bewegen sich entweder in die Richtung des Lichtstrahls oder dagegen, verhalten sich also lichtpositiv oder lichtnegativ, wie die von EHRENHAFT gewählte Bezeichnung lautet. Nun wurden zur Erklärung dieser Erscheinung bereits mehrere Hypothesen aufgestellt. Einige von ihnen versuchen die Bewegungen durch Radiometerwirkung zu erklären. Sie können einen Teil der Phänomene erklären, werden jedoch nicht allen Beobachtungen gerecht, z.B. der Tatsache, dass ein Teilchen in seiner Bewegung innehält, einige zeitlang in Ruhe verharrt um dann in entgegengesetzter Richtung weiterzueilen. Auch kann plötzliche Umkehr der Bewegungsrichtung beobachtet werden.

Neben dieser sog. longitudinalen Photophorese treten auch transversale Bewegungen senkrecht zum Lichtstrahl auf. Mikrophotographische Aufnahmen zeigen jedoch, dass in beiden Fällen die Helicoide die wichtigste Bahnform darstellen.

Durch die ltzterwähnten Ergebnisse waren die weiteren Versuche bereits festgelegt. Die Richtung der Schraubenachse erschien von sekundärer Bedeutung gegenüber der Tatsache, dass stöss und unter allen Umständen rotierende Bewegungen der Teilchen auftreten. Die Abhängigkeit dieser Rotation von verschiedenen Nebenumständen wurde daher eingehend untersucht. Und dabei war Folg n des festzustellen

- 1) Es besteht eine Abhängigkeit der Rotationsgeschwindigkeit von der Art des verwandten Materials. Eisenteilchen vollführen 40 Rotationen in der Sekunde, Cr 180, Rauch 185, alles in weissem Licht.
- 2) Versuche mit Ultraviolettem Licht und Röntgenstrahlen zeigen dieselben Effekte, jedoch quantitativ verschieden je nach der Frequenz der benützten Strahlung. Auch ist eine Deutliche Abhängigkeit der Rotationsfrequenz von der Intensität des verwandten Lichtes festzustellen.
- 3) Die Erscheinungen ändern sich im Magnetfeld. Ein durch longitudinale Photophorese bewegtes Teilchen (Fe) vergrössert den Durchmesser seiner Schraubenlinien in einem Magnetfeld von 50 Gauss auf das 7fache. Gleichzeitig ist eine Vergrösserung der Lineargeschwindigkeit festzustellen.
- 4) Befindet sich das Teilchen unter der Einwirkung transversaler Photophorese, so wird es durch ein gleich starkes Feld senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung abgelenkt. Bei Umkehr des Feldes kehrt gleichfalls die Bewegung des Teilchens um.

Was die Richtung der Schraubenachse betrifft, sind zwei Versuche von Bedeutung

- 1) Ein Testkörper fällt durch zwei parallel übereinander angeordnete Lichtbündel entgegengesetzter Richtung. Er erweist sich in beiden Fällen als lichtpositiv.
- 2) WILHELM GRAY verwendete zwei gekreuzte und zueinander senkrechte Lichtbündel von der Richtung Nord-Süd und Ost-West. Die Beleuchtung erfolgte aus Nord und West. Ein im NS Strahl lichtpositives Teilchen erwies sich im OW Strahl als lichtnegativ
- 3) Folgender Versuch zeigt einen Zusammenhang zwischen Achsenbewegung und Rotation: Wird ein Rauchpartikelchen mit sehr langwelligem Licht bestrahlt, so vollführt es eine unruhig zitternde Bewegung nach Art der BROWNSchen. Im grünen Licht beginnt es langsam im lichtpositiven Sinn geradlinig zu wandern. Die Schraubenbewegung setzt erst bei höherer Frequenz ein und vergrössert den Durchmesser mit wachsender Frequenz des eingestrahnten Lichtes.

Die beobachteten Bewegungen sind ganz analog meiner Art. Die treten auch bei organischer Materie auf, sodass EHRENHAFT am Ende seiner Untersuchungen zu dem Ergebnis kam: Das Licht dreht die Materie genau so, wie andererseits durch Materie eine Drehung der Polarisations ebene des Lichtes bewirkt werden kann.

