

Über physikalische Methoden im chemischen Laboratorium. III.^{*)} Erzeugung stärkster magnetischer und elektrischer Felder.

Von Dr. H. GEHLEN, Berlin.

(Eingeg. 10. Mai 1928.)

Die Untersuchung über das Verhalten der Stoffe bei Einwirkung stärkster elektrischer und magnetischer Felder verspricht außerordentlich interessante und wichtige Ergebnisse. Auf die Fruchtbarkeit der Methode, das Verhalten der Materie unter extremen Bedingungen zu beobachten, hat ganz allgemein der Physiker und Philosoph Ernst Mach hingewiesen und diese Art der Untersuchung als Leitmotiv der wissenschaftlichen Forschung formuliert.

Er sagt: „Die Variation einer Erscheinung bei Variation der Umstände erregt den Wunsch, die erstere auch bei den extremen Werten der letzteren kennenzulernen. So untersucht man das Verhalten der Körper bei den höchsten und tiefsten erreichbaren Temperaturen in bezug auf Härte, Elastizität, galvanisches Leistungsvermögen usw. Man setzt die schmelzenden, frierenden, verdampfenden Körper unter den höchsten erreichbaren Druck. Man untersucht die Eigenschaften des vollkommensten Vakuums, trachtet, die größten elektrischen Spannungen, die stärksten Ströme zu erzielen. Man unterwirft die längsten und die kürzesten Lichtwellen der Untersuchung. Bei Untersuchungen dieser Art kann man immer auf Ergiebigkeit rechnen!“.

Wenn das chemische Laboratorium bisher von starken magnetischen und elektrischen Feldern wenig Gebrauch gemacht hat, so kann doch die Untersuchung der Stoffe bei extremen Werten dieser Felder auch für die Chemie zu sehr wichtigen Resultaten führen. Deshalb verdienen die Untersuchungen von P. Kapitza²⁾ in Cambridge in dem unter Leitung von Rutherford stehenden Cavendish-Laboratorium auch das Interesse der Chemiker. Ihr Ziel ist die Erzeugung stärkster magnetischer Felder, die dann zu einer Reihe von Untersuchungen benutzt werden sollen.

Die stärksten magnetischen Felder, die man vor den Untersuchungen Kapitza's erzielen konnte, betrugen nicht über 90 000 Gaus. Die ersten Arbeiten führte Kapitza mit Akkumulatorenbatterien aus, aus denen er für sehr kurze Zeit, $\frac{1}{100}$ sec., einen starken Strom durch eine Induktionsspule schickte, innerhalb der dann das magnetische Feld entstand. Eine längere Zeitdauer ist deshalb nicht möglich, weil dadurch die für die Erzielung so starker Felder notwendigen hohen Stromstärken die Spule zu stark erhitzen würden. Auch alle Versuche, die mit den erzeugten Feldern ausgeführt werden sollen, müssen darum in so minimalen Zeiten ablaufen. Kapitza erreichte so Felder bis zu etwa 130 000 Gaus³⁾. Für die Herstellung von Feldern der

Größenordnung 1 000 000 Gaus ist nun eine Leistung von ca. 50 000 kW erforderlich, d. h. bei einer Versuchsdauer von $\frac{1}{100}$ sec. 500 kW. Um nun elektrische Ströme dieser Leistung zu erzeugen, erschien jedoch von vornherein eine Akkumulatorenbatterie wenig geeignet. Einmal wegen der mühsamen Herstellung und geringen Dauerhaftigkeit, dann aber auch, weil es große Schwierigkeiten bereiten würde, einen Strom von der angegebenen Leistung zu unterbrechen, da bei dem Ausschalten des Stromes infolge des Zusammenbrechens des magnetischen Feldes außerordentlich starke Induktionsströme entstehen, welche die Apparatur zerstören können.

Diese Schwierigkeit überwand nun Kapitza dadurch, daß er als Energiequelle eine Wechselstrom-Dynamomaschine benutzte, deren Rotorwicklung er durch eine Magnetfeldspule kurzschloß. Dieses Verfahren ist in verschiedener Hinsicht äußerst vorteilhaft:

1. Die für die Erzeugung des magnetischen Feldes notwendige Energie ist in Form der kinetischen Energie des rotierenden Ankers der Maschine vorhanden, und es fällt nicht schwer, durch entsprechend schweren Bau des Ankers und hoher Umlaufzahl des Rotors in ihm die notwendige Energie aufzuspeichern. Bei einem Gewicht des Rotors von $2\frac{1}{2}$ t und 3500 Umdrehungen pro Minute ist die Energie bereits etwa achtmal größer, als zur Erreichung einer Feldstärke von etwa 1 000 000 Gaus erforderlich wäre. Bei der angegebenen Umdrehungszahl beträgt die Dauer einer Halbperiode, d. h. die ungefähre Versuchsdauer, etwa $\frac{1}{100}$ sec.

2. Durch die Verwendung von Wechselstrom wird das Ein- und Ausschalten des Stromes ganz wesentlich erleichtert. Bei Beginn der für den Versuch in Betracht kommenden Halbperiode ist nämlich die Stromstärke gleich Null. In diesem Augenblick wird eingeschaltet. Nun wächst der Strom und erreicht nach einer Viertelperiode das Maximum, um dann nach wiederum einer Viertelperiode auf Null gesunken zu sein. In diesem Augenblick wird ausgeschaltet. Dieses Verfahren hat noch den weiteren Vorteil, daß die bei Abnahme des magnetischen Feldes freiwerdende Energie nicht in Wärme verwandelt, sondern zur Beschleunigung des Rotors verwandt wird, der ja bei dem Kurzschluß durch die Magnetfeldspule infolge der dabei plötzlich auftretenden elektrodynamischen Kräfte einen nicht unbedeutlichen Geschwindigkeitsverlust erfährt. Ein Nachteil bei Verwendung von Wechselstrom besteht insofern, als der Strom niemals konstant ist, sondern sinusförmig verläuft. Diese Unannehmlichkeit kann aber durch eine entsprechende Konstruktion der Erregerwicklung des Stators überwunden werden, so daß die Stromkurve ein flaches Maximum hat. Obwohl also diese Methode im Prinzip außerordentlich einfach ist, waren doch sehr große Schwierigkeiten zu überwinden, um ein einwandfreies und gefahrloses Funktionieren der Maschine zu erreichen, wie aus dem Folgenden hervorgeht.

Der wichtigste Teil der ganzen Maschine ist der Schalter, durch den das Kurzschließen der Rotorwicklung durch die Magnetfeldspule bewirkt wird. Er muß mit der Maschine so gekoppelt sein, daß das Ein- und Ausschalten wirklich in dem Augenblick geschieht, wo die Stromkurve durch den Null-Punkt bzw. durch ein Minimum geht. Da nun die bei dem Kurzschluß auf-

^{*)} Aufsätze I, II u. IV, siehe diese Zeitschr., S. 507, 509, 555.

¹⁾ Erkenntnis und Irrtum, 5. Aufl., S. 217. Bei dieser Formulierung dachte Mach vorwiegend an physikalische Untersuchungen, indessen fällt es nicht schwer, auch in der Chemie entsprechende Beispiele für die Fruchtbarkeit dieser Methodik zu finden, wie etwa Willstätter und Zechmeister die quantitative Verzuckerung der Cellulose erst bei Anwendung extrem konzentrierter, d. h. 41%iger Salzsäure gelang.

²⁾ Proceed. Roy. Soc., London, A., 115, 658 [1927].

³⁾ Bei einem Durchmesser der Induktionsspule von 1 mm konnte er für den Zeitraum von $\frac{2}{10000}$ sec. sogar Felder von 500 000 Gaus erreichen. Proceed. Roy. Soc., London, A., 105, 691 [1924]; 106, 602 [1924]; 109, 227 [1925].

tretende maximale Stromstärke 72 000 Amp. beträgt, herrscht also in der Leitung $\frac{1}{10000}$ sec. vor dem Durchgang der Stromkurve durch Null noch ein Strom von 3000 bis 6000 Amp. Um aber auch dann ein sicheres Ausschalten, d. h. Vermeidung eines Lichtbogens zwischen den Kontakten, zu erreichen, muß man den auseinandergehenden Kontakten eine Beschleunigung erteilen, die etwa tausendmal größer ist als die Erdbeschleunigung. Es muß also für ein außerordentlich genaues Arbeiten des Schalters gesorgt werden.

Auch die Spule, in der das Magnetfeld erzeugt wird, und deren Durchmesser 1 cm betrug, muß besonders durchkonstruiert sein, denn es treten durch die magnetischen Felder außerordentlich starke Zug- und Druckkräfte auf, welche die Spule insbesondere in radialer Richtung beanspruchen. Durch Umwicklung der Spule mit starken Stahlbändern muß man diesen Kräften entgegenwirken. Schwieriger sind die Kräfte zu kompensieren, die in axialer Richtung auftreten.

Bei den ersten Versuchen wurden nicht weniger als fünf Spulen durch diese axialen Kräfte zerstört, indem die Verbindung der Spule mit den stromzuführenden Drähten brach. Aber auch diese Schwierigkeit ließ sich dadurch überwinden, daß man die Kontakte schleifend ausführte, was allerdings insofern nicht ganz einfach war, als durch diese Schleifkontakte ein Strom von etwa 30 000 Amp. fließt. Schon aus diesen wenigen Ausführungen kann man ersehen, wie große Sorgfalt und welches bedeutende experimentelle Geschick erforderlich sind, damit eine derartig komplizierte Apparatur richtig funktioniert.

Zur Ausführung eines Experimentes sind drei Mann erforderlich, die sich durch elektrische Apparate verständigen. Das Einschalten ist nur dann möglich, wenn Riegel die Eingangstüren des Laboratoriums verschließen, damit nicht etwa durch unvermutet Eintretende eine Störung entsteht. Wenn dann alles fertig ist, wird nur auf einen Knopf gedrückt, und der Versuch spielt sich automatisch im Bruchteil einer Sekunde ab.

Die größten mit dieser Apparatur erzielten Feldstärken betrugen 320 000 Gaus, wobei aber die Maschine nur mit der halben Tourenzahl lief, und nur $\frac{1}{5}$ der vorhandenen Energie ausgenutzt wurde. Bei voller Ausnutzung der Energie und bei einer Verkleinerung des Spulendurchmessers auf $\frac{1}{2}$ cm sind Felder von etwa 900 000 Gaus zu erwarten.

Die ersten Untersuchungen, die mit dieser Apparatur ausgeführt wurden, betreffen die Widerstandsänderung des Wismuts. In einem Feld von 300 000 Gaus wächst der Widerstand bei der Temperatur der flüssigen Luft auf das Tausendfache, bei Zimmertemperatur auf das Fünzigfache. Den weiteren Untersuchungen mit dieser vorläufig einzig dastehenden Apparatur darf man mit Spannung entgegensehen.

Erzeugung stärkster elektrischer Felder.

Nicht minder interessant als die oben geschilderten Arbeiten sind die umfangreichen Untersuchungen zur Erzielung sehr starker elektrischer Felder. Für eine moderne Hochspannungsanlage bedeutet es heute keine besondere Schwierigkeit mehr, durch Zusammenschalten von geeigneten Transformatoren elektrische Felder von etwa 1 500 000 Volt zu erzielen. Solche Feldstärken werden zur Prüfung von Isolatoren häufig verwendet, und eine derartige Anlage ist ja erst kürzlich in der Berliner Werkstoffschau gezeigt worden.

Eine besonders interessante Verwendung hoher elektrischer Felder ist von W. D. Coolidge*) im

Untersuchungslaboratorium der General Electric Company, Schenectady (N. Y.), gemacht worden. Coolidge konstruierte eine Glühkathodenstrahlröhre mit Lenard-Fenster, die er zunächst mit 250 000 Volt betrieb. Es gelang ihm so, Kathodenstrahlen in Luft bis zu 46 cm aus der Röhre austreten zu lassen, und dadurch wurde es möglich, Dinge mit Kathodenstrahlen zu behandeln, bei denen ein Einbringen in ein Vakuum sehr schwierig, wenn nicht gar unmöglich ist. Außer den schon bekannten Fluoreszenzphänomenen aus Kristallen, die aber wegen der außerordentlich hohen Intensität der Strahlung ganz besonders effektiv waren, untersuchte Coolidge auch die Umwandlung einiger chemischer Substanzen, wie Acetylen, Öl und Zucker, die beim Bombardement von Kathodenstrahlen auftraten. Die Veränderungen, die diese Substanzen durch das Bombardement durchmachten, waren ähnlich denen, die man schon früher beim Behandeln mit Radiumstrahlen beobachtet hatte. Der Fortschritt der Untersuchungen von Coolidge liegt nun darin, daß man die Umwandlungsprodukte infolge der großen Intensität der Strahlung in einer Menge erhalten kann, die sie der einwandfreien chemischen Untersuchung zugänglich machen werden.

Coolidge setzte auch Organismen der Bestrahlung aus. Es sei hier nur die Bestrahlung eines Kaninchenohres erwähnt, wobei der erzielte Effekt, je nach der verwendeten Stärke des elektrischen Feldes und der Bestrahlungsdauer, sich vom Haarausfall über die Schorfbildung bis zur Durchlöcherung des Ohres steigerte.

Um nun noch größere Felder als 250 000 Volt auf Elektronen einwirken zu lassen, ohne die Transformatoren allzusehr vergrößern zu müssen, bediente sich Coolidge eines geistreichen Kunstgriffes. Er ließ nämlich die Elektronen, die in einer Röhre schon ein Potentialgefälle von ca. 250 000 Volt durchlaufen hatten, in eine zweite Röhre eintreten, in der nun wiederum 250 000 Volt auf sie einwirkten. Auf diese Weise konnte er es durch drei hintereinander geschaltete Vakuumröhren ermöglichen, daß schließlich die Elektronen insgesamt ein Potentialgefälle von etwa 900 000 Volt durchliefen, so daß ganz enorme Geschwindigkeiten der Elektronen erzielt werden konnten.

Auf eine andere Methode zur Erzielung starker elektrischer Felder, insbesondere im Hinblick auf ihre Anwendung auf Vakuumröhren, wiesen kürzlich G. Breit und M. A. Tuve hin. Sie bedienten sich eines besonders konstruierten Teslitransformators und konnten so mit relativ einfachen Mitteln Spannungen von einigen Millionen Volt erzielen. Über ihr Verfahren ist bisher nur eine ganz kurze Mitteilung erschienen⁵⁾.

In neuester Zeit sind von den drei Physikern A. Bräsch, F. Lange und C. Urban*) vom Physikalischen Institut der Universität Berlin Experimente angestellt worden, bei denen sie auf einem ganz anderen Wege elektrische Felder von ca. 2 000 000 Volt erhalten konnten. Sie benutzten bei ihren Untersuchungen nicht Transformatoren, sondern die bei Gewittern auftretenden starken elektrischen Felder, denn die Erzeugung elektrischer Felder über 1 500 000 Volt mit Hilfe von Transformatoren ist, obwohl prinzipiell durchaus möglich, nicht zu empfehlen, da die Schwierigkeiten oberhalb der angegebenen Grenze unverhältnismäßig stark anwachsen. Die Versuche wurden im Sommer 1927 auf dem Monte Generoso bei Lugano angestellt, weil diese

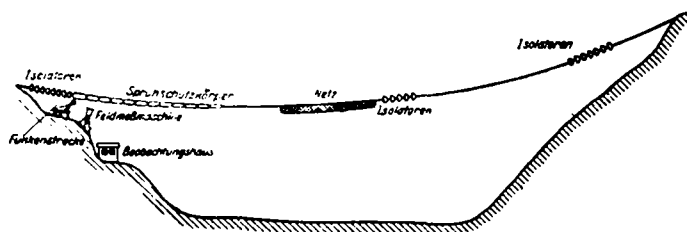
⁵⁾ Nature 121, 535 [1928].

^{*)} Naturwiss. 7, 115 [1928].

^{*)} Science 62, 440 [1925].

Gegend wegen ihrer Gewitterhäufigkeit besonders geeignet schien. Die physikalischen Daten, welche die ungefähre Vorausberechnung der Stärke der zu erwartenden elektrischen Felder ermöglichen und für die engere Auswahl des Versuchsortes maßgebend waren, sind folgende: Das normale luftelektrische Feld der Erde beträgt im Durchschnitt 200 V/m. Bei Gewittern tritt eine Erhöhung bis einige hundert kV/m ein. Daraus ergibt sich also, daß schon 100 m über dem Boden ein Potential von etwa 5 000 000 bis 30 000 000 Volt herrscht, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß in der Nähe von Bergspitzen das Potentialgefälle noch bedeutend größer sein kann.

Demzufolge wurde zwischen zwei Bergspitzen ein Drahtseil antennenartig ausgespannt, an dessen Mitte ein weitmaschiges zur Aufsaugung der Elektrizität mit Spitzen versehenes Drahtnetz befestigt war, das mehrere hundert qm Flächenraum einnahm, um möglichst hohe Stromstärken zu erzielen (s. Abb.)⁷⁾.



Die Gesamtlänge der Verspannung betrug 760 m, und das Netz befand sich etwa 80 m über dem Erdboden. An den beiden Enden war das Drahtseil durch starke Isolatoren gesichert. An einem Ende des Seiles war die Ableitung angebracht, die zu einem, wegen der Blitzgefahr ganz aus Metall bestehenden, Beobachtungshäuschen führte, in dem die Meßinstrumente untergebracht waren. Die eigentliche Feldmeßmaschine war neben dem Beobachtungshäuschen aufgestellt. Um an dem mit der Ableitung versehenen Ende des Seiles ein Versprühen der Elektrizität möglichst zu vermeiden, mußte der Querschnitt dieses Teiles so groß wie möglich gestaltet werden. Dies geschah dadurch, daß eine Reihe von ovalen metallenen Hohlkörpern perlenschnurartig auf das Ableitungsende des Seiles aufgereiht wurde. Auf

⁷⁾ Aus Naturwiss. 7, 116 [1928].

diese Weise wurde trotz beträchtlicher Querschnittsvergrößerung eine genügende Beweglichkeit des Seiles gewährleistet. In der Nähe des letzten Sprühschutzkörpers befand sich eine an einem beweglichen Arme befestigte Metallkugel, die mit dem letzten Sprühschutzkörper eine Funkenstrecke bildete und vom Beobachtungshäuschen aus bedient werden konnte.

Bei den ersten Versuchen stellte sich heraus, daß die Feldmeßmaschine, wenigstens in der bisherigen Form, unbrauchbar war, da sie, wahrscheinlich infolge von Sprühungen, ganz entstellte Ergebnisse lieferte. Man war also für die Messung ganz auf die Funkenstrecke angewiesen. Da die Hauptgewitterperiode infolge des Aufbaues der Apparatur unbenutzt vorüber ging, konnte nur ein Gewitter für Meßzwecke verwendet werden. Hierbei zeigte sich, daß die maximale Öffnungsweite der Funkenstrecke von 4,5 m glatt überschlagen wurde, wobei die Funkenfolge 1 pro Sekunde betrug und während 30 Minuten durchaus konstant blieb. Die aus der Funkenstrecke berechnete minimale Spannung betrug 1 700 000 Volt. Die Erfahrung hatte nun gezeigt, daß es bei einer so raschen Funkenfolge, wie 1 pro Sekunde, möglich ist, die Funkenstrecke auf das Doppelte zu vergrößern, ohne daß die Entladungen aufhören. Berücksichtigt man dies, so kommt man natürlich zu einer weit höheren Spannung als 1 700 000 Volt.

Die Versuche werden in diesem Jahre mit einer erweiterten Apparatur fortgesetzt.

Die vorstehend beschriebenen Versuche, stärkste elektrische Potentiale zu erreichen, sind ganz besonders vom atomphysikalischen Standpunkte aus interessant, denn gelingt es, die auf diese Weise erzielten elektrischen Felder auf Atome oder Elektronen einwirken zu lassen, so kann man diesen Teilchen eine Geschwindigkeit erteilen, welche an die von den radioaktiven Elementen emittierten α -Strahlen heranreicht oder sie sogar übertrifft. Ist dies erst einmal gelungen, so dürfte es keine prinzipielle Schwierigkeit bereiten, auch die Intensität dieser Strahlung so zu gestalten, daß eine Atomzertrümmerung in einem weit größeren Maßstabe ausgeführt werden kann als bisher mit den geringen Mengen des uns zur Verfügung stehenden radioaktiven Materials; denn erst die α -Strahlung von 100 kg Radium würde der Energie eines Kanalstrahlenbündels von 1 mA entsprechen. [A. 83.]

Penta-erythrit-tetranitrat als Militärsprengstoff.

Von Dr. ALFRED STETTbacher, Schwamendingen bei Zürich.

(Eingeg. 15. Mai 1928.)

Um die kleinkalibrigen Geschosse, insbesondere der Tank- und Flugzeugabwehr, auf den höchsten Wirkungsgrad zu bringen, hat man in den letzten Jahren nicht bloß die Mündungsgeschwindigkeit, sondern vor allem auch die Sprengkraft auf das äußerste, überhaupt zulässige Maß zu steigern versucht. Während aber die Durchschlagskraft eines Geschosses, d. h. seine Mündungsenergie, verhältnismäßig leicht durch Vergrößerung der Treibladung oder durch Verlängerung des Geschützrohres vermehrt werden kann und praktisch nur eine Grenze an der beschleunigten Abnutzung des Geschützes durch Ausbrennen findet, ist eine Vergrößerung der Brisanz über die bekannten Artillerie-Sprengladungen hinaus einzig durch einen neuen Sprengstoff möglich, der außer einer höheren Energie (Explosionswärme) und Detonationsgeschwindigkeit noch die drei weiteren Forderungen,

nämlich: billiger technischer Herstellung, Preßbarkeit auf hohe Dichte und Schußsicherheit, erfüllt. Diesen vielen Bedingungen entspricht unter den zahlreichen Explosivstoffen, die seit der allgemeinen Anwendung des Trinitro-toluols und des Tetranitro-methylanilins bekannt geworden sind, einzig das Penta-erythrit-tetranitrat, wobei die Schußsicherheit allerdings nicht im strengsten Sinne gefordert werden darf.

Seitdem der Formaldehyd aus synthetischem Methylalkohol billig hergestellt werden kann, ist die technische Gewinnung des festen Alkohols Pentaerythrit als Ausgangsprodukt für den vierfachen Salpetersäureester im Großen möglich geworden, und zwar zu einem Preise, daß der Nitro-penta-erythrit — unter Berücksichtigung des Energieunterschiedes — bereits mit dem Trinitro-toluol in Wettbewerb zu treten vermag. Dieser wirtschaftliche Umstand bildet wohl den Hauptgrund, warum