

III. Physik.

Vorgänge in Hochspannungsleitungen.

Von Professor Dr. K. Schmidt, Halle a. S.¹⁾

Seit auf der Frankfurter Ausstellung im Jahre 1891 die Übertragung der Wasserkräfte des Neckars von Heilbronn nach Frankfurt auf eine Entfernung von 175 km mit hochgespannten Strömen vorgeführt wurde, hat die Frage der elektrischen Kraftübertragung nicht mehr geruht; sie ist immer mehr in den Vordergrund des Interesses getreten, und wer heute durch Deutschland fährt, sieht überall die Hochspannungsleitungen, welche die elektrischen Ströme von der Herstellungs- zu der Verbrauchsstelle übermitteln. Die damalige Übertragung geschah mit einer Spannung von 40000 Volt, und sehr vorsichtig tastend ist die Technik allmählich weitergegangen von 40000 auf 60000, auf 70000 und auch 80000 Volt und seit einigen Jahren auf 100000 Volt. Ob wir nach der Richtung hin noch wesentlich weiter fortgehen werden, läßt sich noch nicht sagen; es sind große Schwierigkeiten vorhanden, die wesentlich in der Eigentümlichkeit unserer Atmosphäre liegen. Es ist technisch sehr wohl möglich, weiter zu kommen; das beweisen die Hochspannungsanlagen in Amerika, die bis zu 130000, ja bis zu 150000 Volt hinaufgegangen sind. Aber niemals treten bei unserem Klima so günstige Verhältnisse in die Erscheinung wie dort. In großen Bezirken Amerikas ist es sehr trocken und infolgedessen ist Amerika für alle Fragen der Hochspannungstechnik ein sehr geeignetes Feld. Wenn man nun heute in die Technik sieht, kommt man zu einem merkwürdigen Bilde. Es war im vorigen Jahre im November, als Doliwo-Dobrowski, Direktor der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, der sich große Verdienste um die Stromübertragung Heilbronn-Frankfurt erworben hat, zu dem Resultat gelangte, daß eine ferne Zukunft die Ausbreitung elektrischer Energie nicht mehr im hochgespannten Wechselstrom sieht, sondern im hochgespannten Gleichstrom, der nicht durch oberirdische Leitung, sondern in unterirdisch verlegten Kabel geleitet wird. Die Gesichtspunkte, die ihn dabei leiten, werde ich auch in meinem Vortrag berühren. Ob diese Idee in Zukunft verwirklicht wird, vermag heutzutage niemand zu sagen. Der Gleichstrom hat dem Wechselstrom gegenüber theoretisch wie praktisch sehr einfache Verhältnisse. Er wird durch das Ohmsche Gesetz in seinem Verhalten geregelt: „Die Stromstärke ist gleich der Spannung dividiert durch den Widerstand.“ Diesem einfachen Gesetz folgt der Gleichstrom aber nur dann, wenn er gleichmäßig fließt, sowie aber Änderungen auftreten, z. B. wenn plötzlich große Energiemengen ein- oder abgeschaltet werden, dann ändern sich die Verhältnisse. Es treten die induktiven und kapazitiven Eigenschaften der Leitung in den Vordergrund; mit diesen wollen wir uns etwas befassen.

¹⁾ Experimentalvortrag, gehalten am 14. Juni 1919 auf der 5. Mitgliederversammlung in Halle a. S.

Unter den induktiven Eigenschaften versteht man Wirkungen des magnetischen Feldes, welches jeder Strom um sich ausbildet. Die Stärke dieses Feldes ist in erster Linie abhängig von der Stromstärke; wenn der Strom schwankt, wird auch das Feld sich ändern. Faraday hat nun gefunden, daß durch diese Schwankungen in Nachbarleitungen elektrische Ströme erregt werden, die er Induktionsströme genannt hat. Solange der Leiter geradlinig ausgestreckt ist, ist diese Induktion erst bei großen Längen merklich. Wickeln wir aber den Draht zu einer Spule auf, so haben wir eine außerordentlich starke induktive Wirkung, und füllen wir den Hohlraum dieser Spule mit Eisen und schließen diesen Eisenkern zu einem geschlossenen Ring, so bringt das eine außerordentlich starke Induktionswirkung hervor. Das will ich Ihnen zunächst durch einen einfachen Versuch zeigen. Ich habe hier einen Transformator, das ist ein System von Spulen, die ich durch Schaltung so anordnen kann, daß sie in beliebiger Zahl miteinander verbunden sind. Ich habe die Schaltung hier augenblicklich so, daß ich nur die erste Spule benutze. Der Hohlraum dieser Spule ist von dem Eisenkern ausgefüllt, von dem Sie nur den oberen Teil sehen, der durch einen Spalt mehr oder weniger geöffnet werden kann. Wir wollen in diese Spule einen Gleichstrom hineinbringen und die Induktion zeigen. Dazu benutze ich ein zweites System von drei Spulen, das sich auf der rechten Seite des hufeisenförmigen Eisenkerns befindet. Galvanisch sind die drei Spulen nicht mit der ersten in Verbindung, sondern vollständig getrennt. Diese drei Spulen schließe ich durch einige elektrische Glühlampen. Wenn ich jetzt hier von dieser Seite aus den Gleichstrom in die erste Spule hinschicke und öffne und schließe den Strom mehrere Male kurz hintereinander, dann sehen Sie, wie diese Lampen aufleuchten. Wenn ich die Leitung dauernd schließe, wir haben Ruhe. Also die Erscheinung tritt nur so lange auf, als das Feld schwankt, und das Feld schwankt, wenn die Stromstärke schnell von Null auf ihr Maximum steigt oder von diesem wieder auf Null zurückgeht.

Der gewöhnliche 50periodige Wechselstrom ändert seine Stromrichtung in der Sekunde hundertmal, er geht hundertmal durch die Null hindurch; er erreicht dazwischen ein positives Maximum und fünfzigmal ein entgegengesetzt gerichtetes negatives Maximum. Da wir wissen, daß die Feldstärke des Stromes von der Stromstärke bedingt ist, müssen wir erwarten, daß beim Wechselstrom ein dauerndes Schwanken des Feldes um den Stromleiter erfolgen wird, und daß infolgedessen die eben gezeigte Induktionswirkung sich hier noch erheblich kräftiger erweisen wird. Wenn ich hier die erste Spule an den Wechselstrom lege, sehen Sie die Lampen in normaler Helligkeit dauernd aufleuchten. Daß der Schluß des Eisenkörpers von Wichtigkeit ist, kann ich Ihnen auch durch einen Versuch zeigen. Ich will den Spalt etwas öffnen, und Sie sehen sofort, wie die Helligkeit der Lampen geringer wird. Nun wird diese Induktion nicht nur auf Nachbarleitungen, sondern auch auf der eigenen Leitung hervorgerufen. Im Falle der Wirkung auf benachbarte Leitung sprechen wir von gegenseitiger Induktion, im anderen Falle von Selbstinduktion. Ich will auch die Wirkung einer solchen Selbstinduktion zeigen. Man kann leicht nachweisen, daß die Richtung der Induktionsspannung beim Aufsteigen der Spannung des induzierenden Stromes gerade entgegengesetzt ist, so daß also eine Gegenwirkung auftritt. Das muß zur Folge haben, daß der induzierende Strom durch den Induktionsstrom in seiner Stromstärke geschwächt wird. Daß dieses der Fall ist, werden wir auch sehen. Es ist jetzt die sekundäre Leitung abgelegt und nur die primäre Leitung wird benutzt. Die Spannung unserer Wechselstrommaschine ist ungefähr die gleiche wie beim Gleichstrom; bei diesem tritt, wie Sie sehen, eine Stromstärke von 8 bis 9 Ampere auf. Wenn ich dieselbe Spule

mit demselben Widerstand an den Wechselstrom schließe, so sehen Sie, daß von derselben Spannung kaum ein merklicher Wechselstrom in der Spule erregt wird. Wenn ich aber jetzt den Eisenkern wieder oben öffne, dann wird die Selbstinduktion kleiner und wir bekommen, wie Sie sehen, jetzt einen Wechselstrom von 4 bis 5 Ampere. Die Induktion ist durch die Größe des magnetischen Feldes bestimmt; also wird die Zahl der Windungen Einfluß auf die Größe haben, ferner ist von Einfluß, was für Eisenmaterial Sie in dem Kern verwenden, und ob Sie den Eisenkern völlig schließen oder einen mehr oder weniger großen Spalt verwenden. Alles dieses faßt man unter dem Namen Selbstinduktion zusammen und diese ist ebenso wie der Widerstand durch ein Normal darstellbar. Als Einheit für die Selbstinduktion gilt das Henry. Bei den Fernleitungen tritt eine merkliche Induktion auf, weil wir es mit wesentlichen Längen zu tun haben.

Jetzt kommen wir zu den kapazitiven Eigenschaften. Unter Kapazitäten versteht man Apparate, in denen man Elektrizitätsmengen ansammeln kann. Die einfachste Form ist Ihnen von der Schule her bekannt, die Leydener Flasche. Es sind zwei Stanniolfächen getrennt durch ein gut isolierendes Glas. Für die Kapazität muß ebenso wie für die Induktion eine Einheit eingeführt werden, um die entsprechenden Größen berechnen zu können. Diese Einheit gleich ein Farad ist nun sehr erheblich und kommt in der Praxis selten vor, weshalb man den millionsten Teil, das sog. Mikrofarad, nimmt. Auf die Flasche dort, mit der wir nachher experimentieren und die ein sehr gutes und dünnes Glas hat, kommt $\frac{1}{100}$ Mikrofarad. Man ist heutzutage in der Lage, größere Kapazitäten von sehr handlicher Form herzustellen. Bei dem vorliegenden Gerät ist ein besonders behandeltes Papier benutzt, das die Stanniobeläge voneinander trennt. Die Isolationsverhältnisse dieser Kapazität sind sehr gut, sie hält noch 1000 Volt aus. Durch ein solches System der nebeneinander geschalteten Kapazitäten von ungefähr 20 Mikrofarad wollen wir Wechselstrom zu diesen Lampen gehen lassen. Wer von Ihnen die Schulphysik noch kennt, wird gewohnt sein, die Sache so zu betrachten, daß auf den Stanniobelägen eine Aufnahme der positiven und negativen Elektrizität stattfindet und daß ein merklicher Strom hier nicht in Betracht kommt. Unsere moderne Physik sieht die Sache anders an. Auch im Innern des Isolators finden elektrische Vorgänge statt; der Strom endet keineswegs an den Grenzen des Isolators, sondern setzt sich im Innern des Isolators fort. Wenn ich den Strom schließe, so sehen Sie, leuchten die Lampen hell auf und die Lampen haben fast ihre normale Helligkeit.

Jede Fernleitung wird nun natürlich auch kapazitive Eigenschaften haben müssen, denn der Draht mit der dazwischen liegenden Luft als Isolator tritt an die Stelle der Belegung der oben beschriebenen Kapazität. Die kapazitive Wirkung wird sich natürlich erst geltend machen können, wenn große Entfernungen vorhanden sind; es kommt dann auch noch eine Kapazität gegen Erde, die wesentlich größer ist, in Betracht.

Jetzt ist die Frage, was wird eintreten, wenn eine solche Leitung gleichzeitig kapazitive und induktive Eigenschaften hat? Ich will Ihnen das auch durch einen Versuch zeigen. Ich schalte jetzt die Wechselstrommaschine über Kapazität und Induktion, die aus mehreren Spulen des schon benutzten Transformators gebildet ist, an die Lampen. Allmählich will ich den Spalt öffnen und die Induktion kleiner machen. Die Lampen fangen an aufzuleuchten, um dann aber, nachdem ich den Spalt über eine gewisse Länge gebracht habe, wieder dunkel zu werden. Ich will das Maximum der Helligkeit einstellen und will die Maschine etwas langsamer laufen lassen und auf andere Touren bringen. Sie werden hören, daß die Maschine jetzt eine andere Tourenzahl angenommen

hat, und Sie sehen, wie die Lampen merklich in ihrer Helligkeit abnehmen. Es muß ein Vorgang vorliegen, der irgendwie mit der Geschwindigkeit der Maschine zusammenhängt. Wie dies zusammenhängt, werden wir in weiteren Versuchen sehen. Wir haben heutzutage Mittel, um den Strom sehr eingehend zu analysieren. Es handelt sich bei diesen Erscheinungen um Schwingungen und diese Schwingungsvorgänge müssen wir kennen lernen. Um Sie diesen Vorgängen näherzubringen, will ich einen Versuch aus der Mechanik anstellen. Ein Pendel macht hin- und hergehende Bewegungen und nach jedem Hin- und Hergang sind die Bewegungsverhältnisse die gleichen; solche Bewegungen nennen wir Schwingungen. Die Zeit, welche das Pendel braucht, um einen Hin- und Hergang auszuführen, nennt man die Periode. Wenn ich nun an einem solchen Pendel, wie es hier hängt, einen Bleistift anbringe, der sich über einem Karton bewegt, so zeichnet der Bleistift zunächst einen Strich; wenn ich den Karton senkrecht zur Pendelschwingung bewege, kann ich die einzelnen Zustände der Bewegungen graphisch ablesen. Die regelmäßige Abnahme der Schwingungsweise nach links und rechts ist eine Folge der Abnahme der Ausschläge. Das ist dadurch hervorgerufen, daß der Bleistift, indem er zeichnet, eine gewisse Bremsung ausgeführt hat. Es ist eine Reibung vorhanden und diese Reibung hat von der Energie des Pendels etwas verbraucht. Dieses Bild, welches wir bei den elektrischen Schwingungen wiedersehen werden, ist ein gutes Hilfsmittel, um die schwierigen Vorgänge bei elektrischen Schwingungen zu übersehen.

Die Einflüsse induktiver und kapazitiver Eigenschaften lassen sich sehr anschaulich mit Hilfe des Oszillographen auch objektiv für einen größeren Hörerkreis demonstrieren. Sie sehen hier vor sich einen Oszillographen der Firma Siemens und Halske. Der zu untersuchende Wechselstrom wird durch eine äußerst leichte und sehr bewegliche Schleife geleitet, die in einem magnetischen Feld leichtfedernd aufgehängt ist. Ein sehr kleiner Spiegel projiziert ein schmales Strahlenbündel einer elektrischen Bogenlampe auf den Projektionsschirm. Sobald ein Strom durch die Schleife fließt, dreht sie sich proportional der Stromstärke in bestimmter Richtung; ändert der Strom die Richtung, so dreht sich die Schleife in entgegengesetztem Sinne. Bei Wechselstrom wird daher die Schleife und damit das Spiegelbild hin- und hergehende Bewegungen machen. Bei dem Apparat wird nun das Strahlenbündel, ehe es auf den Projektionsschirm fällt, auf einen hin- und hergehenden Spiegel geleitet, der die gleiche Aufgabe hat wie der bewegte Karton bei dem Pendelversuch.

Die zeitlich hintereinander liegenden Schwingungszustände werden für das Auge räumlich nebeneinander erscheinen. Bei Benutzung zweier Schleifen, von denen die eine, an die Pole der Wechselstrommaschine gelegt, die Spannungs-kurve, die andere, vom Strom durchflossen, den Stromverlauf wiedergibt, kann man den Einfluß auf die Phasen durch die in den Kreis eingeschaltete Induktion oder Kapazität zeigen. Man sieht sofort in der Projektion, daß der Induktionsstrom gegen die Spannung in der Phase verzögert ist, der Kapazitätsstrom dagegen in der Phase voreilt. Liegt Induktion und Kapazität gleichzeitig in dem Stromkreis, so findet ein Voreilen statt, wenn die Induktanz kleiner als die Kondensanz ist, ein Nacheilen im umgekehrten Falle; sind beide gleich, so sind die Spannungs- und Stromkurven phasengleich: die Bilder der Sinuskurven erreichen gleichzeitig ihr positives und negatives Maximum und passieren die Nullage im gleichen Zeitpunkt. Der Strom zeigt für diesen Fall ein Maximum. Man bezeichnet diesen Fall als Resonanz. Ein aus Selbstinduktion und Kapazität bestehender elektrischer Stromkreis ist nämlich schwingungsfähig und die Schwingungszeit ist nach Kirchhoff-Thomsen durch die Formel $T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}$ bestimmt (T = Schwingungszeit, L = Koeffizient der Selbstinduktion, C = Koeffizient der Kapazität). Wählt man $L \times C$ so, daß T gleich $\frac{1}{50}$ Sek., d. h. gleich der

Schwingungsperiode der Maschine wird, so hat man den aus der Akustik bekannten Vorgang der Resonanz, der mit erheblichem Anwachsen der Stromstärke und Spannung verbunden ist. Die Resonanz spielt in technischen Einrichtungen eine wichtige Rolle. Oft tritt sie störend, ja gefährbringend auf. Manche Schiffswelle ist durch Resonanz zerbrochen, die kritische Geschwindigkeit ist dem Eisenbahntechniker eine wohlbekannte Größe, da sie den ruhigen Gang von Lokomotiven und Wagen oft in bedenklicher Weise beeinflusst. Oft sucht man die Resonanz absichtlich herbeizuführen, um äußerst schwache Wirkungen auszunutzen, wie das z. B. in der drahtlosen Telegraphie der Fall ist.

Mit Hilfe des Oszillographen kann ich Ihnen leicht zeigen, daß Selbstinduktion mit Kapazität regelmäßige Sinusschwingungen gibt. Eine Kapazität von 20 Mikrofaraad schließe ich wieder an eine Selbstinduktion von etwa $\frac{1}{5}$ Henry und schalte sie in die Leitung einer Oszillographenleitung. Durch induktive Kopplung lasse ich auf diesen Kreis die durch geeignete Kontaktvorrichtung eingeleiteten Stromstöße eines anderen Kreises einwirken. Das Projektionsbild gibt uns einen Zug von gedämpften Sinusschwingungen, dessen Dämpfung ich leicht durch Einschalten eines Zusatzwiderstandes so stark machen kann, daß nur ein bis zwei Schwingungen übrig bleiben.

Da nun unsere Fernleitungen induktive und kapazitive Eigenschaften aufweisen, so können auch in ihnen Schwingungen entstehen, die unter Umständen durch Resonanz höchst gefährliche Größen annehmen können, so daß die Isolation der Transformatoren stark gefährdet und die Maschinen durch Kurzschlüsse höchst bedenklich in Mitleidenschaft gezogen werden. Folgender Versuch mag Ihnen eine Anschauung von der enormen Erhöhung der Spannung durch Resonanz geben. Ich errege hier mit Hilfe eines Resonanztransformators in dem aus einer kleinen Selbstinduktion und passenden Kapazität bestehenden Kreis unter Zuhilfenahme einer Funkenstrecke von etwa 4 mm Länge schnelle Schwingungen. Galvanisch-induktiv ist mit der Selbstinduktion eine Spule verbunden, deren Ende an einem Hörnerblitzableiter von 150 mm Funkenweite gelegt ist. Sie sehen, daß die durch Resonanz erzeugten Schwingungen diese große Funkenstrecke mit prasselndem Funkenstrom überwindet. Da die für die Ausbildung der Funken nötige Spannung mit der Länge der Funkenstrecke wächst, so haben wir es also mit einer beträchtlichen Steigerung der Spannung zu tun. Solche Resonanzvorgänge können auf mannigfache Weise in den Fernleitungen entstehen, besonders durch Kurz- und Erdschlüsse und atmosphärische Vorgänge. Die Technik hat im Laufe der Zeit Mittel und Wege gefunden, die damit verbundenen Gefahren erheblich herabzumindern. Besondere Beachtung haben die Wanderwellen in der Technik gefunden, weil sie ebenfalls durch die mit ihnen verbundenen Spannungserhöhungen besonders im Innern der Transformatoren für die Isolation gefährlich sind. Ich kann Ihnen solche Wellen durch den Versuch zeigen, allerdings nur in der Form der stehenden Wellen.

Mit Hilfe der schnellen Schwingungen, welche ich zur Erregung der Eigenschwingung der großen Spule benutzte, kann ich durch Anordnung eines Schwingungskreises mit sehr kleiner Induktion und Kapazität Schwingungen, deren Wellenmenge nur noch 2 bis 3 m beträgt, erzeugen. Lasse ich diese auf zwei parallel gespannte, gut isolierte Drähte einwirken, so bilden sich auf diesen Wellen durch Reflexion an den Enden stehende Wellen. An bestimmten Stellen, die um eine halbe Wellenlänge voneinander abstehen, treten hohe Spannungen auf, wie ich auf folgende Weise zeigen kann. Ein mit Neon gefülltes Rohr, bei dem der Gasdruck 1 bis 2 mm Quecksilber beträgt, leuchtet unter dem Einfluß hoher Spannung hell auf. Bringe ich es daher in die Nähe der oben bezeichneten Stellen auf den Draht, so kann ich diese Stellen durch das Aufleuchten des Rohres Ihnen allen sichtbar machen. An den freien Enden

der Leitung habe ich zwei Spulen aus blankem Draht angebracht. Sie sehen, daß das Neonrohr, bestimmte Stellen der beiden Spulen berührend, wieder hell aufleuchtet. Daraus schließen wir, daß sich an bestimmten Punkten der Spulen hohe Spannung ausbildet. Diesen Stellen entsprechen Punkte im Transformator einer Fernleitung, welche durch die Wanderwelle auf hohe Spannung gebracht und dadurch der Durchschlaggefahr besonders stark ausgesetzt sind.

Ich will zum Schluß noch den Coroneffekt zeigen, der einen besonders bei Spannung über 100000 Volt leicht nachweisbaren Energieverlust zur Folge hat. Hierzu dient mir ein Transformator, der die 100 Volt der Wechselstrommaschine auf 120000 Volt transformiert. Verbinde ich die Pole der Hochspannungsspule mit zwei an den Enden gut isolierten Drähten, so sehen Sie im Dunkeln von Ihren Plätzen aus, wie die Drähte von einer leuchtenden Schicht umgeben sind. Am Amperemeter können wir leicht zeigen, daß schon mit diesen nur 4 m langen Drähten der Transformator 100 Watt mehr aufnimmt, als ohne sie. Diese Mehraufnahme kommt größtenteils auf Kosten dieser Leuchterscheinung.

Das war das, was ich heute hier vorbringen wollte; es ist natürlich bei der Kürze der Zeit ein sehr unvollkommenes Bild geworden, was den Praktiker vielleicht nicht ganz befriedigen wird. Ich hatte gehofft, daß sich ein Korreferat aus der Praxis hier anschließen würde; leider ist der Korreferent, ein Herr von einer Berliner Firma, krank geworden und kann das Korreferat nicht halten. Wenn aber Interesse dafür da ist, wird die Möglichkeit gegeben sein, daß später aus der Praxis ein Vortrag über diese Erscheinung gehalten werden könnte; Sie würden erheblich mehr hören, was Sie auch praktisch mehr befriedigen würde. Für diesen mehr technischen Vortrag könnte mein Vortrag als physikalische Grundlage dienen.