



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Die Ingenieur-Mathematik in elementarer Behandlung

Das Potential und seine Anwendung auf die Theorien der Gravitation, des Magnetismus, der Elektrizität, der Wärme und der Hydrodynamik

Holzmüller, Gustav

Leipzig, 1898

272) Neuere Vorstellungen über das elektromagnetische Feld

[urn:nbn:de:hbz:466:1-77934](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:466:1-77934)

wegungsfläche ebenso groß, wie bei der senkrecht zu den Kraftlinien gehenden Teilbewegung. Also auch dies ändert den Satz nicht. Er gilt für jede beliebige kleine Verschiebung des beliebig liegenden Elementes l gegen die Kraftlinien. Die Richtung des Stromes in l ergibt sich daraus, daß er so gerichtet sein muß, daß Arbeit zu überwinden ist. Das Feld bewegt den Strom nach der Linkhandregel, die Arbeitsrichtung ist entgegengesetzt. Daraus ergibt sich folgende Rechthandregel:

Legt man die rechte Hand so an den Leiter, daß die Kraftlinien in die Handfläche eintreten und der Daumen nach der Richtung der beabsichtigten Bewegung zeigt, dann zeigen die Finger nach der Richtung des im Leiter induzierten Stromes.

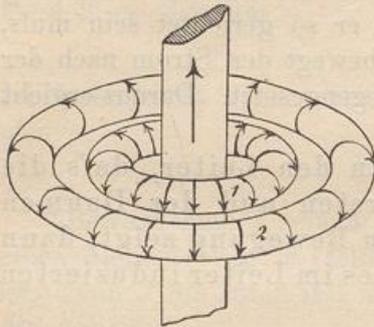
In den neueren physikalischen Lehrbüchern findet man Abbildungen, an denen die Probe auf die Regel gemacht werden kann. (Vgl. Börner.)

Diese Faradayschen Regeln sind aber lediglich eine Beschreibung des Vorgangs, sie erklären die Induktionsströme nicht, sie veranschaulichen den Vorgang nicht in hinreichender Weise. Wie in so vielen Fällen, läßt sich auch hier eine Veranschaulichung durch mechanische Bewegungsprozesse durchführen, die zugleich den durch die Hertz'schen Versuche gewonnenen Resultaten Rechnung trägt. Eine solche soll im Anschluß an Maxwell'sche und Ampère'sche Vorstellungen im folgenden versucht werden. Damit wird nicht etwa behauptet, daß solche Molekularbewegungen des Äthers in Wirklichkeit stattfinden, sondern nur, daß man sich den Vorgang mit ihrer Hilfe verständlich machen kann. Dadurch gewinnen wir einen ersten Einblick in die Maxwell'schen Wirbelfelder und lernen den wechselnden Austausch der Energie zwischen Strom und Feld in überzeugenderer Weise verstehen.

272) Neuere Vorstellungen über das elektromagnetische Feld. Nach Ampère kann man sich jeden Elementarmagnet durch Strömungen ersetzt denken, die ihn nach Art der Solenoide umkreisen. Da nun um den geradlinigen Stromleiter die elektromagnetische Polarisation so geschieht, daß die Elementarmagnete sich in konzentrischen Kreisen lagern, so wird jeder dieser Kreise, wenn man jeden kleinen Magnet durch sein Solenoid ersetzt, in einen Wirbelring verwandelt, jede Normalebene in ein Feld konzentrischer Wirbelringe, wie es in Fig. 206 dargestellt ist, nur sind dort die Moleküle im Verhältnis zum Draht viel zu groß gezeichnet. Gleichartig polarisierten Kraftlinien entsprechen also Wirbelringe mit in gleichem Sinne erfolgender Drehung. Entgegengesetzt polarisierten Kraftlinien entsprechen entgegengesetzt drehende Wirbelringe.

Die Analogie mit der Mechanik läßt es nicht recht denkbar erscheinen, wie Ring 1 den Ring 2 in Bewegung versetzen könne, wenn man nicht hypothetische Zwischenpartikelchen einschaltet, die wie Zwischenräder die Bewegung übertragen. Denn

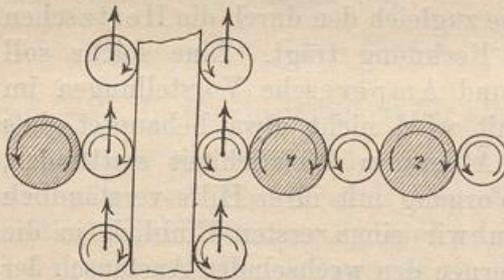
Fig. 206.



dafs ein schrittweises Übertragen stattfindet, während Fernwirkungen ausgeschlossen sind, geht aus den Hertz'schen Untersuchungen über die zeitliche Ausbreitung hervor. Auch zwischen dem Draht und dem ersten Ringe, wo ein treibendes Agens, der Strom, besteht, bringt man naturgemäfs Zwischenpartikelchen an, und diese vertreten den Strom, der nach den neueren Anschauungen nicht im Drahte, sondern an diesem hinfließt.

In Fig. 207 sind die schraffierten Kreise Durchschnitte der Ringe, die übrigen sind die in Ansicht gesehenen Zwischenpartikelchen. Man

Fig. 207.



denke sich, um eine rohe Veranschaulichung zu erhalten, sämtliche bewegten Teilchen nach Art der Zahnräder mit Zähnen versehen, die Drahtoberfläche ebenfalls nach Art der Zahnstangen, dann würden bei der angedeuteten Drehung die an letzterer befindlichen Partikelchen aufwärts rollen und den ersten Ring in Dreh-

bewegung versetzen. Dieser setzt die nächsten Zwischenpartikelchen in Drehung, diese den folgenden Wirbelring u. s. w. Während die am Drahte befindlichen Teilchen nach oben steigen und stets durch neue abgelöst werden, bleiben die ferner liegenden am Platze, weil sie von den beiderseitigen Ringen festgehalten werden und links ebensoviel herabsinken, wie sie rechts emporsteigen.

Diese Zahnradvorstellung ist aber zu roh, denn sie ist zwangsläufig und bei starr gedachten Zähnen würde der gesamte Mechanismus in demselben Momente in Gang gesetzt werden. Es ist also besser, jetzt das Bild von Reibungsrädern zu wählen, die nach Art der Reibungskuppelungen allmählich aufeinander einwirken.

Aus dieser Vorstellung heraus lassen sich zahlreiche Erscheinungen erklären, worüber einige Andeutungen gegeben werden sollen.

a) Die beiden Extraströme. Angenommen, der Stromkreis

wird geschlossen und der galvanische Strom in Gang gesetzt, dann rollen die am Draht befindlichen elektrischen Teilchen, die man sich als Ätherteilchen vorstellen kann, vorwärts. Da die ersten die Aufgabe erhalten, die Wirbelringe in Bewegung zu setzen, verlieren sie an Drehungs- und Fortbewegungsgeschwindigkeit. Sie geben einen Teil der Energie an das elektromagnetische Feld ab. (In gewissem Sinne muß man also hier den mechanischen Energiebegriff und damit den des Arbeitsaufwandes und der zu überwindenden Trägheit, wohl auch eine Art von Reibungswiderstand einführen.) Durch die Verlangsamung der vorwärts rollenden Anfangsteilchen des Stromes tritt eine Art von Rückstau ein. Dieser Rückstau könnte rechnerisch durch die Einwirkung eines Gegenstroms ersetzt werden. Dies ist der sog. **Schließungsextrastrom**, der den **Hauptstrom** nur allmählich zur vollen Geschwindigkeit gelangen läßt. Diese tritt ein, sobald die benachbarten Wirbelringe des Feldes die ihnen zukommende Geschwindigkeit erreicht haben.

Wird jetzt der Strom geschlossen, so werden durch die galvanische Einwirkung keine Teilchen mehr vorwärts geschleudert. Denkt man sich jedoch bisher ruhende am Drahte befindlich, oder irgendwie in den Zwischenraum eintretend, so werden diese von dem ersten Wirbelringe gefaßt, in Drehung versetzt und den Nachzüglern des galvanischen Stroms nachgeschleudert. Dies ist der **Öffnungsextrastrom**, der ohne Energieverlust eintritt, da das gesamte Feld, welches er passiert, noch in voller Wirbelbewegung befindlich ist. Er setzt also weit plötzlicher ein, als der Hauptstrom, er zeigt dabei bei geringerer Intensität weit größere elektromotorische Kraft und kann die durch das Öffnen entstandene Funkenstrecke überspringen. (Öffnungsfunke.)

Damit sind die beiden Extrastrome zwanglos erklärt. Zugleich ergibt sich ohne weiteres, daß, wenn der Hauptstrom eine plötzliche Intensitätsänderung erfährt, ein Extrastrom eintreten muß. Der Verstärkung entspricht ein dem Schließungsstrom, der Schwächung ein dem Öffnungsstrom analoger Extrastrom.

Will man die Extrastrome schwächen, so biegt man den Draht in der Mitte um und wickelt ihn doppelt (bifilar) auf, so daß der Hauptstrom in den benachbarten Windungen entgegengesetzt läuft. Dadurch werden entgegengesetzte Drehungen der Wirbelringe im Zwischenfelde erzeugt, die sich teilweise aufheben, wobei Reibungsarbeit verrichtet werden mag. Das Feld hat jetzt nicht die nötige Energie, um einen stärkeren Extrastrom hervorzubringen.

Da bei Anwendung von Wechselströmen die Intensität plötzlich von $+J$ auf $-J$ springt, werden die Extrastrome dabei mit etwa doppelter elektromotorischer Kraft auftreten, als bei dem einfachen Wechsel von Öffnen und Schließen des Stromes. Um die damit ver-

bundene Widerstandsvergrößerung einzuschränken, hat man hier bifilare Wickelung als zweckmässig und notwendig zu benutzen.

Die beiden Extraströme entstehen also dadurch, daß an das umgebende Feld Energie abgegeben wird. Handelte es sich um magnetische Verschiebungsarbeit, wie bei der älteren Vorstellungsweise, so würde die Energieaufspeicherung eine potentielle sein. Bei der jetzt vorgetragenen Auffassung dagegen ist die abgegebene Energie als kinetische aufzufassen. Diese Energie wird beim zweiten Extrastrome nur teilweise an den Draht zurückgegeben. Der Rest wird aufgebraucht, um ferner und ferner liegende Wirbelringe in Bewegung zu versetzen, bis in größerer Entfernung die Erscheinung schwächer und schwächer wird. Darauf kommen wir zurück bei der Besprechung der elektrischen Strahlung.

b) Feldstärke. Hat ein Wirbelring n_1 Moleküle, der benachbarte n_2 , so überträgt sich bei der Zahnrad-Vorstellung naturgemäß seine Kraft p_1 so, daß der zweite Ring mit einer Kraft p_2 wirkt, die sich aus $p_1 : p_2 = n_2 : n_1$ berechnen läßt. Nun ist aber $n_2 : n_1 = r_2 : r_1$, also folgt $p_1 : p_2 = r_2 : r_1$, d. h. die Feldstärke ist umgekehrt proportional der Entfernung vom Drahte. Dies ist das dem vorliegenden Kapitel an die Spitze gesetzte Grundgesetz.

c) Induktionsströme. Man denke sich in einiger Entfernung rechts vom Hauptstrome A einen parallelen Draht (Nebendraht), der entweder geradlinig und erst im unendlichen Bereiche geschlossen oder wenigstens erst in großer Entfernung geschlossen sein soll. Man schliesse den Kreis des Hauptstroms. Was wird geschehen? Erst wird Wirbelring 1, dann 2, dann 3 u. s. w. in Bewegung gesetzt. Sobald die links am Nebendrahte befindlichen Zwischenpartikelchen in die Drehung versetzt werden, die in Fig. 207 angedeutet ist, schießen sie am Nebendrahte abwärts und bilden den **entgegengesetzten Schließungsinduktionsstrom**. Lange hält er nicht an, denn sobald sich die jenseits des Nebendrahtes sich bildenden Wirbelringe arrangiert und in Drehung versetzt haben, entsteht auf der entgegengesetzten Seite des Drahtes ein nach oben gerichteter Strom. Jetzt fließt im Drahte ebensoviel Strom nach unten, wie nach oben, die beiden Strömungen gleichen sich also aus und ihre Wirkung ist Null.

Wird jetzt der Hauptstrom durch Öffnung des Kreises unterbrochen, so beruhigt sich erst der Ring 1, dann der Ring 2 u. s. w. Sobald die links am Drahte befindlichen Zwischenteilchen zur Ruhe kommen, während die rechts davon befindlichen noch in lebendiger Bewegung sind, überwiegt der durch die letzteren dargestellte Strom, und so entsteht der **gleichgerichtete Öffnungsinduktionsstrom**, der nach Beruhigung des Feldes gleichfalls aufhört.

Befinden sich an der Stelle des einen Nebendrahtes zwei, die zu derselben Wickelung gehören und gleiche Entfernung von A haben, so werden bei der Schließung auf ihrer linken Seite doppelt so viele Partikelchen in Bewegung gesetzt, als vorher, die elektromotorische Kraft also verdoppelt. Dasselbe kann auf drei, vier u. s. w. Drähte ausgedehnt werden. Es wird eben in der gleichen Zeit eine entsprechend größere Elektrizitätsmenge in Gang gesetzt. So erklärt sich die Zweckmäßigkeit zahlreicher Windungen in der Nebenspirale.

Da die Induktionsströme das Feld nicht erst zu polarisieren haben, also keinen Rückstau erleiden, setzen sie kräftig ein, besonders der Öffnungsinduktionsstrom, der die Eigenschaften des Öffnungsextrastroms teilt und lange Funkenstrecken überspringen kann und kräftige physiologische Wirkungen giebt.

Damit sind z. B. die Erscheinungen am Ruhmkorffschen Funkeninduktor zwanglos erklärt, besonders das kräftige Überspringen der Öffnungsfunken in der Funkenstrecke der Nebenrolle. Damit ist zugleich der Übergang zur Betrachtung der Transformatoren ermöglicht, worüber man die Lehrbücher vergleiche. (Bei konstanter Leistungsfähigkeit $E \cdot J$ kann E groß und J klein, oder umgekehrt E klein und J groß sein.) Da die Induktionsströme einen Teil der Energie des Feldes aufnehmen und ebenso an irgendwelchen Stellen Energie an dieses abgeben können, so rufen sie selbstverständlich im Felde Erscheinungen hervor, die mit den durch den Hauptstrom veranlafsten in Interferenz treten.

d) Elektrische Schwingungen im nicht geschlossenen Nebendrahte. Man denke sich im Hauptdrahte einen Wechselstrom in Gang gesetzt, dessen Phasenzahl Tausende für die Sekunde betrage. (Tesla hat 15 000 sekundliche Perioden erzielt.) Die Wirbelringe des Feldes schwingen also sehr häufig in der Sekunde in wechselndem Sinne. Wie werden sich die Induktionsströme des Nebendrahtes verhalten, wenn dieser oben und unten begrenzt ist? Die den Schließungsinduktionsstrom bildenden Teilchen können (da gewissermaßen die Zahnstange zu Ende ist) nicht weiter gelangen, es entsteht also ein Rückstau, der geradezu als reflektierter Strom betrachtet werden kann. Bei der Rückkehr wird er mit den inzwischen hervorgebrachten Induktionsströmen in Interferenz treten. Er kann z. B. den in entgegengesetzter Richtung hervorgerufenen Öffnungsinduktionsstrom unterstützen oder schwächen. Unterstützt er ihn, so wirkt der Draht als Resonator, er wirkt also ähnlich, wie die Resonatoren der Akustik. Wie diese für eine bestimmte Schwingungszahl abgestimmt werden können, so kann dasselbe mit dem Nebendrahte geschehen, indem man seine Länge variieren läßt. Bringt man irgendwo an diesem eine kleine Funkenstrecke an, so sind die Funken stark bei gut wirkendem

Resonator, schwach bei schlecht wirkendem, gar nicht vorhanden bei entgegengesetzt wirkendem. Man kann im Drahte stehende Schwingungen mit Knoten und Bäuchen erzielen, wie in der Akustik. Über deren experimentelle Nachweisung durch Geißlersche Röhren und dgl. vergleiche man die Lehrbücher.

Angenommen, die Induktionsströme wanderten mit 300 000 km oder $3 \cdot 10^8$ m Geschwindigkeit, so würden bei 30 000 sekundlichen Halbperioden für den Hin- und Rückweg 10 000 m Weg, also 5000 m freie Drahtlänge nach oben (bezw. unten) nötig sein, um den Resonator abzustimmen. An dieser Länge scheiterten die Versuche, bis man endlich im Anschluß an Feddersen die elektrischen Oszillationen des überspringenden Funkens benutzte, die Zahl der Schwingungen zu vertausendfachen, so daß Hertz mit Resonatoren von einigen Metern Länge arbeiten konnte. Auch erwies es sich als zweckmäßig, an den Enden des Nebendrahtes Kugeln anzubringen, so daß der Rückstau der das freie Ende erreichenden Stromteilchen verzögert, die Kapazität also erhöht wurde. Darüber soll aber erst unten gesprochen werden.

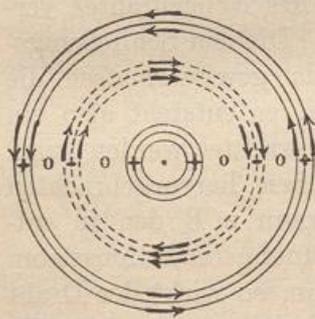
Selbstverständlich werden durch Verstärkung und Schwächung des Hauptstroms ebenfalls Induktionsströme erzeugt. Ebenso wirkt die Annäherung oder das Entfernen des Nebendrahtes an den Hauptdraht bezw. von ihm weg. Das Eintreten in schneller drehende Ringe beim Annähern trifft erst die linke Seite des Drahtes und giebt dort eine Verstärkung des entgegengesetzt gerichteten Induktionsstroms, auch wird die Anzahl der berührten Sektoren verstärkt. Beim Entfernen tritt auf der linken Seite eine entsprechende Schwächung ein, die den gleichgerichteten Stromteil überwiegen läßt.

In ähnlicher Weise kann man sämtliche Induktionserscheinungen erklären.

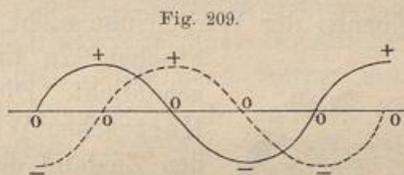
e) Elektromagnetische Wellen und elektrische Verschiebungswellen. Die Wechselströme rufen im elektromagnetischen Felde, d. h. in jedem Normalschnitt des Hauptstroms die besprochenen abwechselnd entgegengesetzten Drehbewegungen hervor. Wie in der offenen Orgelpfeife die akustischen Verdichtungs- und Verdünnungswellen fortschreitend einander folgen, so wandern im Normalschnitt des Drahtes Impulse vorwärts,

die abwechselnd zu positiver und negativer Drehung der Ringe Anlaß geben. Schon dieses Fortschreiten kann man als einen Teil der elektrischen Strahlung, als elektrische Wellenbewegung auffassen. Zwischen jedem positiven und dem benachbarten negativen Maximum

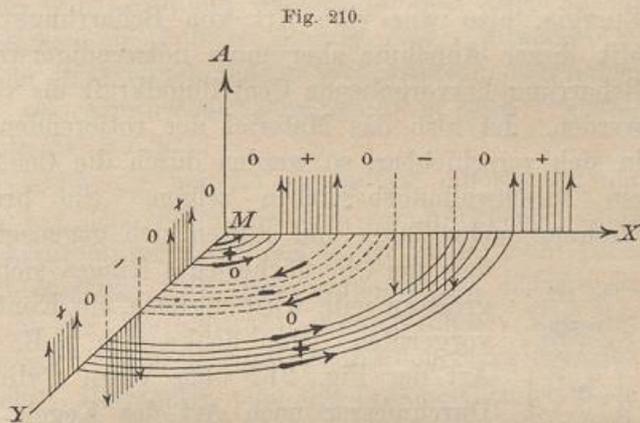
Fig. 208.



der Drehungsbewegung muß ein Ruhezustand existieren. Stellt man die positiven Ringe durch ausgezogene Kreise, die negativen durch punktierte Kreise, die ruhenden gar nicht dar, so hat man in Fig. 208 den Zustand des Feldes für einen gewissen Zeitpunkt. In der Zeit der Maximalwirkungen giebt das Feld die meiste Energie an den besprochenen Nebendraht ab, und während die des Feldes abnimmt, wächst die des induzierten Stromes. Dieser erreicht demnach seine größte Energie etwa in der Zeit, wo das Feld die Energie Null hat. In Fig. 209 ist dies in Form von Sinuslinien dargestellt. Die ausgezogene bedeutet den Zustand des Feldes an bestimmter Stelle zu verschiedenen Zeiten, die punktierte den Zustand im Drahte an derselben Stelle zu verschiedenen Zeiten. Der Unterschied beträgt eine Viertelphase.



Um beide Schwingungsarten zu veranschaulichen, kann man Fig. 210 benutzen. Dort bedeutet die Zeichnung in der Normalebene des Drahtes *A* den Zustand des elektromagnetischen Feldes zu einer bestimmten Zeit, während die senkrecht dagegenstehenden Linien zunächst den Zustand von den das Feld durchstehenden Drähten bedeuten.



Wie nun in den leitenden Drähten Induktionsströme entstehen, so entstehen im Dielektrikum entsprechend gerichtete positive und negative Verschiebungen von geringer Größe, wie sie früher besprochen wurden. Folglich:

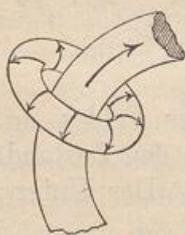
Jedes elektromagnetische Feld induziert senkrecht gegen die Hauptebene seiner Wirbelringe im Dielektrikum elektrische Verschiebungsschwingungen von gleicher Phasendauer, die jedoch um eine Viertelphase verschoben stattfinden. Umgekehrt wird jedes Feld mit Verschiebungsschwingungen senkrecht dagegen stattfindende elektromagnetische Schwingungen (entgegengesetzte Drehungen in den Wirbelringen) hervorrufen.

Bezeichnet man also in Fig. 210 die Linie *MX* als einen elek-

trischen Strahl, so zeigt derselbe in der Meridianebene AMX elektrische Schwingungen, in der Ebene XMY elektromagnetische Wellen. Da die Wellenschraffierung in beiden Ebenen senkrecht gegen die Strahlrichtung liegt, so spricht man auch hier von Transversalwellen, die in der Richtung MX fortschreiten.

f) Vorgang bei Kreisströmen. Bei Kreisströmen bilden die Ebenen der Wirbelringe nicht eine Parallelschar, sondern ein Ebenenbündel. In Fig. 211 ist das Lagenverhältnis veranschaulicht. Die nachstehenden Erörterungen über die Hertz'schen Wellen werden nähere Aufklärungen über den Zustand des Feldes bringen.

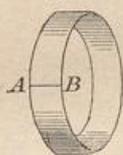
Fig. 211.



Dem Leser bleibe es überlassen, die Zeichnung zu vervollständigen und zu zeigen, daß in der Nähe des Mittelpunktes die Wirbelringe zu je zweien gleichgerichteten Drehungssinn haben, so daß, wie ein zwischengelegtes Hilfspartikelchen zeigt, ein gegenseitiges Unterstützen stattfindet.

g) Zugspannungen und Abstofsungsbestreben zwischen den Kraftlinien des elektromagnetischen Feldes. Bei den Wirbelringen handelte es sich um Aufnehmen und Abgeben von Energie, also war eine Art von Beharrungsvermögen anzunehmen. Mit dieser Annahme aber muß notwendigerweise auch die aus der Beharrung hervorgehende Centrifugalkraft als vorhanden angenommen werden. Ist also das Material der rotierenden Ringe elastisch oder in sich verschiebbar, so werden durch die Centrifugalkraft die Ringe ein Anschwellungsbestreben zeigen. Sie brauchen bei stärkerer Drehung mehr Raum und stoßen sich gegenseitig ab. Dadurch nun,

Fig. 212.



daß die Oberfläche jedes Ringes sich in diesem Sinne vergrößern will, wird zugleich ein Kontraktionsbestreben hervorgerufen. Man denke sich z. B. ein Gummiband nach Art der Fig. 212 über einen Cylinder gespannt, dessen Durchmesser nach Art des Kegels allmählich an Länge zunimmt. Je größer die Peripherie des Gummibandes wird, um so mehr wird seine Breite AB abnehmen. Jede Wirbelfläche also erhält ein Kontraktionsbestreben, der Ring will seine Mittellinie verkürzen. Damit sind beide Arten von Spannungen in den Kraftlinien erläutert und erklärt.

Der gleichzeitig in den Meridianebenen stattfindende elektrische Zwangszustand wird nach Art des elektrostatischen zu erläutern sein und bedarf keiner weiteren Besprechung.

273) Elektrische Funken und Hertz'sche Schwingungen. Feddersen hat, wie schon bemerkt, die Beobachtung gemacht, daß