

# Der Kondensator [Schluss]

Autor(en): **Nussbaum, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Technische Beilage zur Schweizerischen Post-, Zoll- & Telegraphen-Zeitung = Supplément technique du Journal suisse des postes, télégraphes et douanes**

Band (Jahr): **2 (1919)**

Heft 6

PDF erstellt am: **30.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-872987>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Populäre Elektrizitätslehre

### Der Kondensator.

Von E. Nußbaum, Bern.  
(Schluß.)

#### Praktische Kondensator-Modelle.

Wir haben noch zu untersuchen, wie sich der Kondensator im Gleichstrom- und im Wechselstromkreis verhält. Bei dieser Untersuchung wollen wir ein Kondensator-Modell benötigen, welches eine größere Kapazität besitzt, als das unvollkommene, in Figur 2 dargestellte, und das auch in der Form besser den technischen Kondensatoren entspricht, obwohl es eigentlich auf dem Prinzip des Zwei-Plattenkondensators beruht. Ein solches Modell ist in der Figur 15 veranschaulicht.

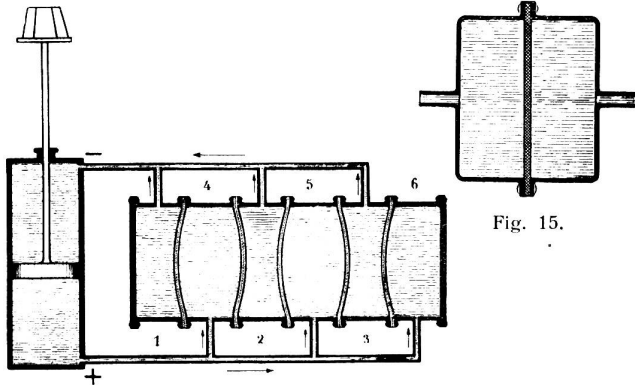


Fig. 16.

Es besteht aus einem zweiteiligen Zylinder, dessen Innenraum durch eine sehr elastische Kautschukplatte in zwei Kammern geteilt wird. Diese Kammern sind mit Wasser gefüllt und können durch einen Rohransatz mit einem beliebigen System aus Röhren und Pumpen verbunden werden.

Fig. 16 stellt eine genauere Nachbildung des Blätterkondensators dar. Die mit Wasser gefüllten Kammern entsprechen den einzelnen Staniolblättern der Belegungen. Je mehr Kammern vorhanden sind, desto größer ist die Wassermenge, die unter einem bestimmten Druck durch den Apparat hindurch verschoben wird. Es ist hier der Anlaß, nochmals ausdrücklich zu betonen, daß bei dieser sogenannten „Ladung“ des Kondensators die Menge des in demselben enthaltenen Wassers unverändert bleibt. So viel Wasser in die Kammern 4, 5 und 6 hineingepreßt wird, soviel wird aus den Kammern 1, 2 und 3 hinausgedrängt, bzw. durch die Pumpe herausgesogen. Die Ladung besteht also darin, daß durch eine Verschiebung der Wassermenge die elastischen Zwischenwände in einen Spannungszustand versetzt werden. Das nämliche gilt sinngemäß auch vom elektrischen Kondensator.

Auch diese Modelle sind nicht vollkommen und weichen in ihrem Verhalten noch in mancher Hinsicht vom wirklichen Kondensator ab. Da sie aber nur auf dem Papier existieren, so ist es erlaubt, ihre Wirkungsweise zu idealisieren und die Übereinstimmung auch da vorauszusetzen, wo sie in Wirklichkeit nicht besteht. Auf einen solchen, nicht ganz nebensächlichen Punkt sei hier noch besonders aufmerksam gemacht.

Wenn in unserem Modell (Fig. 16) der Kolben entlastet und sein Eigengewicht  $p$  selber aufgehoben ist, also kein Druck auf das Wasser ausgeübt wird, so ist der Kondensator entladen und ohne Spannung. Wird nun der Kolben freigegeben und das Gewicht  $P$  aufgelegt, so drückt der Kolben eine gewisse Menge Wasser durch den Kondensator

und sinkt im Zylinder um einen entsprechenden Betrag seiner Höhe über dem Boden des Zylinders. Wird der Druck dann durch Hinzufügen eines Gewichtes  $P + p$  verdoppelt, so sinkt der Kolben weiter, aber nicht mehr so tief, wie das erste Mal; die Menge des verdrängten Wassers, die Ladung, hat sich nicht ganz verdoppelt, weil die innere Spannung des Modell-Kondensators in Wirklichkeit nicht genau proportional ist der Ladung, sondern rascher zunimmt, als diese.

Beim wirklichen Kondensator verhält es sich anders. Hier ist die Spannung genau proportional der Elektrizitätsmenge, mit welcher der Kondensator geladen wird.

#### Das Gleichstrom-Modell.

Wenn wir unsere Untersuchung mit Hilfe eines der besprochenen praktischen Kondensator-Modelle anstellen wollen, so kann dies natürlich nur in Verbindung mit geeigneten Modellen von Gleichstrom- und Wechselstromerzeugern geschehen.

Ohne daß wir desselben besonders erwähnt, haben wir schon mit der in Figur 2 dargestellten Pumpe das Modell der Elektrisiermaschine, die ja auch eine Gleichstrommaschine ist, vor uns gehabt. Ebenso ist die Pumpe, die in Figur 16 benützt wird, um den Modell-Kondensator zu laden, nichts anderes, als das Modell einer Gleichstromquelle, einer galvanischen oder Akkumulatoren-Batterie, oder eines Gleichstrom-Generators. Ihre Wirkungsweise als Pumpe ist leicht verständlich und bedarf keiner weiteren Erklärung. Dagegen müssen wir sie in ihrer besondern Eigenschaft als Modell einer Gleichstromquelle etwas näher betrachten.

Bei diesem Modell musste auf die Nachbildung der Art und Weise, wie der elektrische Druck im Element als Folge der chemischen Vorgänge, oder in der Dynamomaschine durch Induktion, entsteht, begreiflicher Weise verzichtet werden. Trotzdem bietet es der Analogien noch genug zur Veranschaulichung der Wirkungen der verschiedenartigen Stromerzeuger nach aussen und der Vorgänge im Innern. Am nächsten steht unserem Modell der Akkumulator. Ist der Kolben ganz oben, so stellt die unterhalb desselben befindliche Wassermenge die Stromkapazität dar, die der Akkumulator aufzunehmen und wieder herzugeben vermag. Misst diese Menge z. B. 10,8 Liter = 10800 cm<sup>3</sup> und gilt 1 cm<sup>3</sup> pro Sekunde als Einheit der Wasser-Stromstärke, so kann das Modell während 10800 Sekunden oder 3 Stunden einen Strom von der Stärke der Einheit, also 3 Einheitsstrom-Stunden liefern. Diese Stromkapazität entspricht derjenigen einer Batterie von 3 Ampère-Stunden.

In der Anordnung der Fig. 16 kann allerdings kein dauernder Strom zustandekommen. *Der Kondensator versperrt dem Gleichstrom den Weg.* Wird derselbe aber durch ein kontinuierliches mit Wasser gefülltes Rohr von beliebigem Querschnitt und beliebiger Länge ersetzt, so wird das Wasser in demselben unter der Wirkung des Kolbendruckes in Bewegung versetzt, es strömt, während der Kolben langsam sinkt. Dieser drückt das Wasser unten (+ Pol) in das Rohr und saugt es oben (- Pol) an.

Diese Druck- und Saugwirkung, die je nach dem auf den Kolben ausgeübten Druck, oder je nach der Zahl der hintereinander geschalteten Pumpen grösser oder kleiner sein kann, ist das, was wir bei einem Element oder Akkumulator, bzw. bei einer Batterie als Spannung oder elektromotorische Kraft bezeichnen.

Wenn der Kolben unten angelangt ist, so hört das Strömen im Rohr auf; das Modell enthält zwar immer noch dieselbe Menge Wasser, dieses befindet sich aber jetzt oberhalb des Kolbens. Um diesen wieder in die oberste Lage zu bringen, muss man Arbeit aufwenden, dadurch, dass man den Kolben entlastet und hochzieht und das Wasser in der entgegengesetzten Richtung durch das Rohr

treibt. Man kann auch einen zweiten solchen, aber „geladenen“ Apparat in den Stromkreis einschalten und durch Auflegen eines schwereren Gewichts ein Rückwärtsströmen des Wassers und das Steigen des belasteten Kolbens in dem zu „ladenden“ Apparat bewirken. Diese Anordnung stellt genau den Vorgang beim Laden eines Akkumulators dar.

So wie beim Modell keine Wasser-Aufspeicherung stattfindet und ebensoviel Wasser oben hinausfließt, wie unten hineingedrückt wird, wie aber dabei eine Energiespeicherung stattfindet, indem zur Hebung des belasteten Kolbens, d. h. zur Ueberwindung des innern Gegendrucks Arbeit geleistet wird, ebenso findet auch im Akkumulator nicht eine eigentliche Stromspeicherung statt, sondern indem bei der Ladung unter Ueberwindung des innern elektrischen Gegendrucks ein elektrischer Strom durch den Akkumulator hindurch fließt, leistet dieser eine chemische Arbeit, welcher der innere elektrische Gegendruck — die sogenannte Spannung <sup>1)</sup> — sein Entstehen verdankt.

Für die Dynamomaschine, bei welcher der elektrische Druck durch eine äussere mechanische Kraft erzeugt wird, besitzen wir ein gutes Modell in der Rotationspumpe.

**Das Wechselstrom-Modell.**

Der Wechselstrom unterscheidet sich vom Gleichstrom dadurch, daß er periodisch seine Richtung ändert und an Stärke stetig zu- und abnimmt. Mit Hilfe des Vektordiagramms und der höhern Mathematik wird gezeigt, daß die Stromstärke sich mit dem Sinus des Drehungswinkels ändert, daß der Strom während einer vollständigen Umdrehung des Vektor-Radius, während einer Periode, zweimal seine Richtung ändert, also zweimal durch den Wert null geht und ein positives und ein negatives Maximum erreicht.

Die in der Figur 17 veranschaulichte Maschine ist das Modell eines Wechselstromgenerators. Es erzeugt einen Wasser-Wechselstrom, welcher in mancher Hinsicht die Eigenschaften eines reinen Sinus-Wechselstromes besitzt.

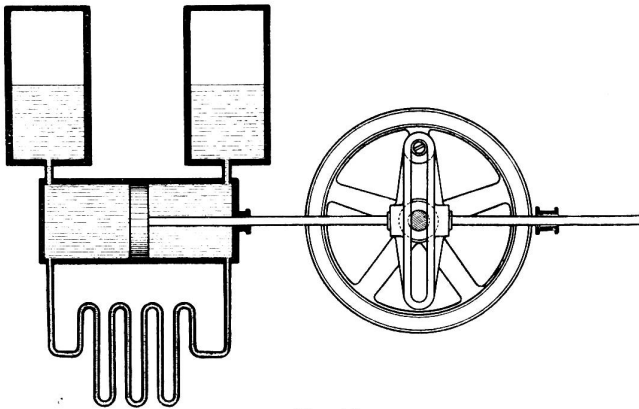


Fig. 17.

Indem das Rad sich mit gleichbleibender Geschwindigkeit einmal um seine Achse dreht, wird der Kolben, infolge der besonderen Kuppelung mit einem am Rade befestigten exzentrischen Zapfen, von der Mittellage aus zuerst nach rechts, dann in der entgegengesetzten Richtung über die Mittellage hinaus nach links und schließlich wieder nach der Mittellage zurück bewegt. Bei dieser Hin- und Herbewegung des Kolbens wird das Wasser abwechselungsweise in den einen Windkessel hineingepreßt und aus dem andern herausgesogen. Im erstern wird die Luft verdichtet, im zweiten verdünnt. Auf diese Weise entsteht zwischen den beiden Abteilungen der Pumpe eine Druckdifferenz, welche nach unserer Annahme proportional sein muß der verschobenen Wassermenge. Diese ist aber ihrer-

<sup>1)</sup> Es wurde schon früher auf das unpassende dieser Bezeichnung aufmerksam gemacht. Von *Spannung* kann man mit Recht nur beim Kondensator sprechen, während die EMK einer Batterie besser der Vorstellung eines *Drucks* entspricht.

seits proportional dem vom Kolben von der Mittellage aus zurückgelegten Weg. Kennen wir den maximalen Druck  $E_0$ , während der Kolben sich in der äußersten Lage rechts oder links von der Mittellage befindet, so kann der Druck  $E_t$  für jede beliebige Lage des Kolbens aus seiner Entfernung von der Mittellage berechnet werden.

Ist in Fig. 18  $OA$  der Radius des vom exzentrischen Zapfen beschriebenen Kreises, also auch gleich dem vom Kolben von der Mittellage aus zurückgelegten größten Weg, so kann derselbe als Maßstab gelten für den vorderhand noch nicht näher bestimmten maximalen Druck  $E_0$ , welcher erreicht ist, wenn  $OA$  sich um den Winkel  $90^\circ$  oder  $270^\circ$

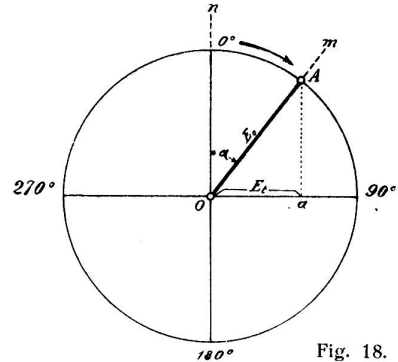


Fig. 18.

von der Ausgangsstellung  $0^\circ$  entfernt hat. Hat  $OA$  sich um den Winkel  $\alpha$  vom Ausgangspunkt  $0^\circ$  gedreht, so hat der Kolben gleichzeitig den Weg  $Oa$  zurückgelegt und der Druck  $E_t$  verhält sich in diesem Moment zum maximalen Druck  $E_0$ , wie  $Oa : OA$ . Dies ist aber nichts anderes als der Sinus des Winkels  $\alpha$  und so haben wir

$$\frac{Oa}{OA} = \frac{E_t}{E_0} = \sin \alpha, \text{ woraus folgt: } E_t = E_0 \sin \alpha.$$

In der Zeit, in welcher der Punkt  $A$  mit konstanter Geschwindigkeit den Kreisbogen von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  beschreibt, legt der Kolben den Weg  $OA$  zurück. Es ist nun die Frage, mit welcher Geschwindigkeit er sich dabei bewegt.

Offenbar ist die Kolbengeschwindigkeit gleich derjenigen des Punktes  $A$ , wenn dieser durch die Stellungen  $0^\circ$  und  $180^\circ$ , d. h. durch die Mittellagen geht. Sie ist aber null, wenn  $A$  durch die Stellungen  $90^\circ$  und  $270^\circ$  eilt, da  $A$  sich hier senkrecht zur Kolbenstange bewegt. Wie groß ist sie, wenn  $OA$  sich zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  befindet und z. B. gerade den Schenkel  $Om$  des Winkels  $nOm = \alpha$  passiert? Wie lautet das wichtige Gesetz dieser Geschwindigkeit für jeden beliebigen Winkel  $\alpha$ ?

Das Rad unseres Modells mache in der Sekunde  $n$  Umdrehungen. Dann beschreibt die Kurbel  $A$  in der Sekunde den Weg  $OA \cdot 2\pi n$ ; sie besitzt also die Geschwindigkeit  $OA \cdot 2\pi n$ . Während  $A$  nun mit dieser Geschwindigkeit den dem Winkel  $\alpha$  entsprechenden Kreisbogen  $n-m$  durchheilt, legt der Kolben den kürzern Weg  $Oa$  zurück mit einer anfänglichen Geschwindigkeit  $OA \cdot 2\pi n$ , die aber mit dem Vorrücken von  $A$  stets kleiner wird.

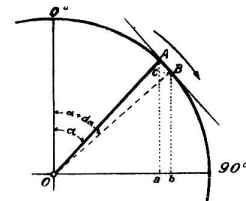


Fig. 19.

Bewegt sich  $A$  nun vom Schenkel  $Om$  des Winkels  $\alpha$  aus um einen kleinen Winkel  $da$  mit dem Kreisbogen  $AB$  weiter (Fig. 19), so legt der Kolben in der gleichen Zeit die kleine Strecke  $ab$  zurück.

Die Gerade  $BC = ab$  bildet mit der Tangente in  $B$  einen Winkel, der gleich ist dem Winkel  $\alpha + d\alpha$ . Denkt man sich nun  $AB$  und  $d\alpha$  als unendlich klein, so kann der Kreisbogen  $AB$  als eine Gerade betrachtet werden, die mit der Tangente in  $B$  zusammenfällt. Der Winkel  $\alpha + d\alpha$  wird gleich dem Winkel  $\alpha$  und  $ABC$  wird ein unendlich kleines rechtwinkliges Dreieck, dessen Kathete  $BC = ab = AB \cdot \cos \alpha$  ist.

Während also der Punkt  $A$  mit der konstanten Geschwindigkeit  $OA \cdot 2\pi n$  die unendlich kleine Strecke  $AB$  durchläuft, legt der Kolben den unendlich kleinen Weg  $ab = AB \cdot \cos \alpha$  zurück und da bei gleicher Zeitdauer die Strecken proportional den Geschwindigkeiten sind, und diese für unendlich kleine Strecken als konstant angenommen werden dürfen, so ergibt sich für den Drehungswinkel  $\alpha$  eine Kolbengeschwindigkeit

$$v = OA \cdot 2\pi n \cdot \cos \alpha.$$

Da dieser Wert nur für den unendlich kurzen Moment gilt, wo  $OA$  die Schenkellinie  $Om$  des Winkels  $\alpha$  passiert, so heißt er der Momentanwert der Geschwindigkeit für den Winkel  $\alpha$ .

Für  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$  ist die Geschwindigkeit also gleich  $OA \cdot 2\pi n$ ; für  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$  ist auch die Geschwindigkeit null.

Da nun  $OA$  auch als Maß für den maximalen Druck  $E_0$  gilt und die Druckveränderung proportional dem vom Kolben zurückgelegten Weg ist, so kann der gefundene Ausdruck für den Momentanwert der Kolbengeschwindigkeit zugleich als Ausdruck für die momentane Druckveränderung in der Zeiteinheit gelten, also

$$\frac{de_t}{dt} = E_0 \cdot 2\pi n \cdot \cos \alpha.$$

Um diesen Wert würde die Spannung zu oder abnehmen, wenn der Kolben sich 1 Sekunde lang mit der konstanten Geschwindigkeit  $OA \cdot 2\pi n \cdot \cos \alpha$  bewegen würde. Er gilt aber nur für einen unendlich kurzen Moment und ist daher gewissermaßen die Momentaufnahme der zeitlichen Druckveränderung für den Winkel  $\alpha$ .

Das Produkt  $2\pi n$  aus dem Umfang des Einheitskreises und der sekundlichen Umdrehungszahl  $n$ , der Frequenz, heißt die *Kreisfrequenz* (auch Pulsation) des Wechselstromes und wird allgemein mit  $\omega$  bezeichnet. Der Ausdruck  $E_0 \cdot 2\pi n \cdot \cos \alpha$  für den Momentanwert der zeitlichen Druck- oder Spannungsänderung kann daher auch geschrieben werden

$$E_0 \cdot \omega \cdot \cos \alpha.$$

Die Druckunterschiede zwischen den beiden Windkesseln haben das Bestreben, sich durch das Rohr, den äußeren Stromkreis (Fig. 17) auszugleichen. Bewegt sich der Kolben nach rechts, so nimmt der Druck im rechten Windkessel zu und erreicht ein Maximum, wenn der Kolben in seiner äußersten Lage rechts angelangt ist. Entsprechend dieser Druckzunahme, welcher auf der andern Seite eine zunehmende Saugwirkung gegenübersteht, beginnt im Rohr das Wasser von rechts nach links zu fließen. Es fließt um so schneller, je größer der Druck ist, und da wir annehmen, daß die Schnelligkeit proportional dem Druckunterschied sei, so folgt auch die Wasserstromstärke genau dem Sinusgesetz.

Die Stromstärke ist also null, wenn der Kolben sich in der Mittellage ( $0^\circ$ ) befindet; sie besitzt das positive Maximum, wenn er sich rechts befindet ( $90^\circ$ ), wird wieder null, wenn sich der Kolben von rechts nach links durch die Mittellage ( $180^\circ$ ) bewegt, fängt dann an, in entgegengesetztem Sinne zu strömen (von links nach rechts) und erreicht ein negatives Maximum in der äußersten Stellung links ( $270^\circ$ ) des Kolbens.

Die Stromstärke ist also zeitlich in Uebereinstimmung mit dem Druck, sie ist in Phase mit der Spannung.

### Der Kondensator im Gleichstromkreis.

Wenn der Kondensator, wie bereits bemerkt, dem Gleichstrom den Weg versperrt, (siehe Fig. 16) so ist scheinbar auch jede weitere Erörterung über das Verhalten des Kondensators im Gleichstromkreis gegenstandslos. Wir kennen jetzt bereits das Wesen der Ladung, das Verhältnis derselben zur Kapazität und zur Spannung, und wir wissen, daß die Sperrwirkung nicht einer eigentlichen Unterbrechung des Stromkreises gleichkommt, sondern daß der Sperrung immer ein Verschiebungsstrom vorausgeht, durch welche der Kondensator geladen oder gespannt wird. Aber diesen Verschiebungsstrom müssen wir jetzt noch etwas näher auf seinen zeitlichen Verlauf und seine Abhängigkeit von der Batteriespannung, der Kapazität und dem ohmschen Widerstand untersuchen.

Die vollständige Sperrwirkung tritt erst ein, wenn durch den äußeren Druck soviel Wasser, bezw. Elektrizität durch den Kondensator verschoben worden ist, daß die innere Kondensator-Spannung dem äußeren Druck gleich ist.

Beim Beginn der Verschiebung, d. h. beim Stromschluss, wo der Kondensator noch ungeladen, die Membran — das Dielektrikum — also noch ungespannt ist, wird die momentane Stärke  $J_0$  des Verschiebungsstromes einzig durch die Batteriespannung  $E_0$  und den Widerstand  $R$  (Fig. 20)

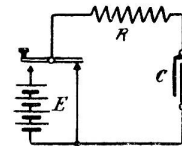


Fig. 20.

der Zuleitung bestimmt. Der Verschiebungsstrom nimmt also während der Verschiebung (Ladung) von der Stärke

$$J_0 = \frac{E_0}{R}$$

stetig ab bis zum Wert null, während die der Batteriespannung entgegengesetzte Kondensatorspannung vom Wert null an stetig zunimmt bis zum Werte  $E_0$ . In jedem beliebigen Moment zwischen Beginn und Ende der Ladung der Verschiebung wird die Stromstärke  $J_t$  bestimmt durch die Differenz zwischen der Batteriespannung  $E_0$  und der entgegengesetzt gerichteten momentanen Kondensatorspannung  $E_t$ , also

$$J_t = \frac{E_0 - E_t}{R}$$

Da das Verhältnis der momentanen Kondensatorspannung  $E_t$  zur Batteriespannung  $E_0$  abhängig ist vom Verhältnis der im Moment  $t$  durch den Kondensator hindurch verschobenen Elektrizitätsmenge, d. h. der momentanen Ladung, zur ganzen Ladung  $CE_0$  und da diese Menge für eine bestimmte Kapazität um so rascher zunimmt, je größer die momentane Stromstärke ist, so folgt daraus, daß eine bestimmte Kondensatorspannung  $E_t$  umso schneller erreicht ist, je kleiner  $R$  ist.

Andererseits ist natürlich die Ladung auch umso schneller vollzogen, je kleiner unter sonst gleichen Verhältnissen die Kapazität ist.

Die Zunahme der Kondensatorspannung und die Abnahme der Ladestromstärke erfolgen nach einer logarithmischen Funktion.

Für die Momentanwerte der Kondensatorspannung  $E_t$  und der Ladestromstärke  $J_t$  zur Zeit  $t$  Sekunden nach Stromschluss gelten folgende Formeln:

$$E_t = E_0 \left(1 - e^{-\frac{t \cdot 10^6}{CR}}\right) \text{ und } J_t = \frac{E_0 - E_t}{R} = \frac{E_0}{R} \cdot e^{-\frac{t \cdot 10^6}{CR}}$$

( $e$  bedeutet hier die Basis des natürlichen Logarithmensystems gleich 2,7182818.)

Berechnungsbeispiele.

Ein Kondensator von 2 Mikrofarad werde durch einen Widerstand von 500000 Ohm auf 100 Volt geladen.

1. Frage: Welches ist die momentane Stromstärke beim Beginn der Ladung, also zur Zeit  $t = 0$ ?

Offenbar  $J_0 = \frac{E_0}{R} = 100 : 500000 = 0,0002$  Ampère.

2. Frage: Auf welchen Wert ist  $E_t$  angewachsen 1 Sekunde nach Stromschluss, also für  $t = 1$ ?

Antwort:

$$\text{Für } t = 1 \text{ wird } \frac{t \cdot 10^6}{CR} = \frac{1 \cdot 10^6}{2 \cdot 500000} = 1$$

$$\text{und } e^{-1} = \frac{1}{e} = \frac{1}{2,718...} = 0,37;$$

$$\text{daher } E_t = 100 (1 - 0,37) = 63 \text{ Volt.}$$

3. Frage: Welches ist nun die momentane Lade-stromstärke zur Zeit  $t = 1$ ?

Antwort: Da der Batteriespannung von 100 Volt die Kondensatorspannung 63 Volt entgegenwirkt, so beträgt die wirksame Batteriespannung nur noch 37 Volt. Der Strom ist also zur Zeit  $t = 1$  nur noch 74 Mikroampère stark.

4. Frage: In welcher Zeit ist der Kondensator bis auf  $\frac{1}{100}$  geladen, also  $E_t = 0,99 E_0$ ?

Antwort: Für  $E_t = 0,99 E_0$  wird  $1 - e^{-x} = 0,99$  und  $e^{-x} = 0,01$ . Aus der Tabelle der Werte  $e^{-x}$ , die sich in den Hilfsbüchern, z. B. in dem von Grawinkel und Strecker findet, ersehen wir, daß dem Wert  $e^{-x} = 0,01$  ein  $x = 4,6$  entspricht. Somit wird

$$\frac{t \cdot 10^6}{2 \cdot 500000} = t = 4,6 \text{ Sekunden.}$$

Diese Ladedauer spielt bekanntlich eine wichtige Rolle beim Telegraphenaufwurf mit Verzögerungsvorrichtung, wo das verzögernde Organ just in einem Widerstand von 500000 Ohm besteht.<sup>1)</sup> Die Zeit, nach welcher die Ladung bis auf  $\frac{1}{b}$  vollständig ist, wird auch gefunden nach der Formel  $t = CR \cdot 10^{-6} \cdot 2,3 \log \text{ vulg } b$ .

Die Momentanwerte für  $E_t$  und  $J_t$  als Funktionen der Zeit sind im Diagramm (Fig. 21) graphisch dargestellt. Die abnehmende Kurve bedeutet die Stromstärke, die zunehmende die Kondensator-Spannung.

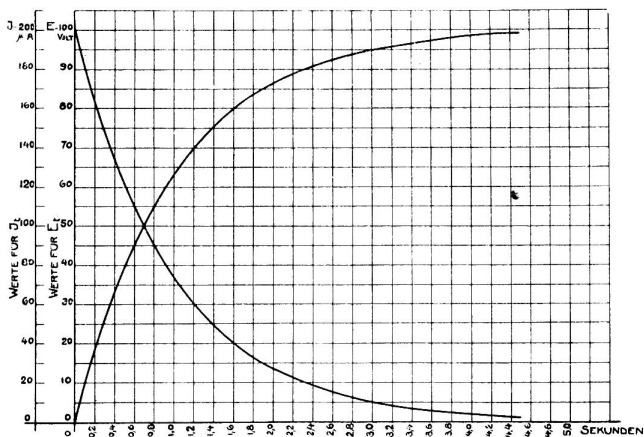


Fig. 21.

Wenn die Taste der Fig. 20 losgelassen wird, so kann sich der auf E Volt geladene Kondensator über den Widerstand R entladen. Die Entladung beginnt mit der Anfangs-

<sup>1)</sup> Siehe Technische Beilage 1917 Nr. 1, Seite 3, Fig. 1.

stromstärke  $J_0 = \frac{E}{R}$  und der Strom fließt nun in umgekehrter Richtung. Dabei nimmt aber die Spannung und mithin auch die Stromstärke stetig ab und zwar erfolgt diese Abnahme genau in der gleichen Weise, wie in einem mit Wasser gefüllten Gefäß der Druck und die Wasserstromstärke abnehmen, wenn sich der Inhalt des Gefäßes durch eine auf dem Niveau des Bodens wagrecht ange-setzte dünne Röhre entleert.

Zur Bestimmung der Momentanwerte  $E_t$  und  $J_t$  bei der Entladung gelten ähnliche Formeln, wie bei der Ladung, nämlich

$$E_t = E_0 \cdot e^{-\frac{t \cdot 10^6}{CR}} \text{ und } J_t = \frac{E_t}{R} = \frac{E_0}{R} \cdot e^{-\frac{t \cdot 10^6}{CR}}$$

Spannung und Stromstärke nehmen nach der gleichen Funktion ab, wie bei der Ladung die Stromstärke.

Der Kondensatorstrom bei kontinuierlich veränderter Batteriespannung.

In dem aus einer Batterie von 4 Volt E. M. K. und einem Meßdraht  $p-n$  von 4 Ohm gebildeten Stromkreis (Fig. 22) fließe ein Strom von 1 Ampère. Auf dem Meßdraht kann ein Gleitkontakt  $k$  verschoben werden, der mit der einen Belegung eines 2 Mikrofarad-Kondensators verbunden ist, während die andere Belegung fest ans Ende  $p$  des Meßdrahtes angeschlossen ist.

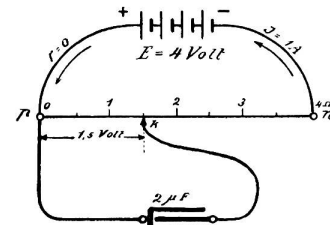


Fig. 22.

Zwischen diesen Abzweigungen zum Kondensator herrscht nun eine Spannung, welche gleich ist dem Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand der Strecke  $p-k$  des Meßdrahtes und der Kondensator besitzt eine dieser Spannung entsprechende Ladung. Spannung und Ladung sind null, wenn  $k$  bei  $p$  ist, und 4 Volt bzw. 8 Mikroculomb, wenn  $k$  sich bei  $n$  befindet.

Bei der in der Figur gezeichneten Stellung von  $k$  steht der Kondensator unter einer Spannung von 1,5 Volt und besitzt somit eine Ladung von  $1,5 \times 2 = 3$  Mikroculomb. Wird  $k$  nun nach Stellung 4 ( $= n$ ) verschoben, welche der Spannung 4 Volt entspricht, so nimmt die Ladung um 5 Mikroculomb zu. Sie beträgt jetzt 8 Mikroculomb und es ist die Frage, in welcher Weise die 5 Mikroculomb durch den Kondensator geflossen sind.

Wenn der Kontakt  $k$  mit gleichbleibender Geschwindigkeit bewegt wird, so nimmt die Kondensatorspannung von 1,5 Volt bis 4 Volt und mithin auch die Ladung von 3 auf 8 Mikroculomb in einer zeitlich konstanten Weise zu. Einer zeitlich konstanten Zunahme der Ladung entspricht aber ein konstanter Ladestrom.

Hat der Kontakt  $k$  auf dem Meßdraht den Weg von Punkt 1,5 bis Punkt 4 mit konstanter Geschwindigkeit, z. B. in 0,5 Sekunden zurückgelegt, so ist in dieser Zeit die Elektrizitätsmenge 5 Mikroculomb in Gestalt eines konstanten Stromes von  $5 : 0,5 = 10$  Mikro-Ampère durch den Kondensator geflossen.

Wird der Kontakt  $k$  jetzt in 1 Sekunde mit konstanter Geschwindigkeit von Punkt 4 nach  $p$  bewegt, so nimmt die Spannung in dieser Zeit konstant bis auf null ab und der Kondensator verliert seine ganze Ladung von 8 Mikroculomb. Wie die Abnahme der Spannung, so ist auch

die Abnahme der Ladung kontinuierlich und zeitlich konstant, und die Entladung, d. h. das Rückwärtsströmen der 8 Mikrocoulomb findet daher während der Entladedauer von 1 Sekunde mit der konstanten Stromstärke von 8 Mikro-Ampère statt.

Ist allgemein  $\frac{V-V'}{t}$  die konstante und  $\frac{d(v-v')}{dt}$  die

momentane Zunahme oder Abnahme der Spannung in der Zeiteinheit, so hat der Lade- bzw. Entladestrom die Stärke

$$J = C \cdot \frac{V-V'}{t} \quad \text{und} \quad i_t = C \cdot \frac{d(v-v')}{dt}$$

Die Stromstärke wird in Ampère erhalten, wenn  $V$  in Volt,  $C$  in Farad und  $t$  in Sekunden angegeben wird.

Obige Ausdrücke bedeuten also, daß jede kontinuierliche Aenderung der Spannung zwischen den Klemmen eines Kondensators einen kontinuierlichen Lade- oder Entladestrom zur Folge hat, welcher in jedem Moment proportional ist der Kapazität und der konstanten oder momentanen Geschwindigkeit der Spannungsänderung.

Dieser Satz ist von größter Wichtigkeit in Bezug auf das Verhalten des Kondensators im Wechselstromkreis.

### Der Kondensator im Wechselstromkreis.

Ueber diesen Gegenstand geben unsere Lehrbücher mit Hilfe der Vektordiagramme und der Mathematik für alle möglichen Schaltungen des Kondensators in Wechselstromkreisen erschöpfend Aufschluss. Für uns handelt es sich nur darum, eine klare Vorstellung zu gewinnen über das Verhalten des Kondensators im einfachsten Falle, wo er ohne Vorschaltwiderstand direkt an die Wechselstromquelle angeschlossen ist. Denn damit ist auch für das Verständnis des Verhaltens in komplizierteren Fällen soviel gewonnen, daß wir den mathematischen Ableitungen leichter zu folgen vermögen. Zudem bietet unser Modell nicht mehr die sinnfällige Anschaulichkeit, sobald an es die Forderung gestellt wird, auch die Wirkungen von Selbstinduktion und Widerstand auf den Stromverlauf darzustellen.

Wenn der Kolben unseres Modells (Fig. 23) in der bekannten charakteristischen Weise hin- und herbewegt wird und so abwechselungsweise zwischen den beiden Abteilungen der Maschine Druckunterschiede erzeugt, so wird natürlich auch das unten angeschlossene Kondensatormodell entsprechend beeinflusst. Im Verbindungsrohr bewegt sich das Wasser auf und nieder und die elastische Zwischenwand wird nach beiden Seiten hin ausgebaucht und gespannt. Es ist nun sehr wichtig, sich über den zeitlichen Verlauf dieser Bewegungen im Kondensatorstromkreis in Abhängigkeit von der Kolbenbewegung Rechenschaft zu geben.

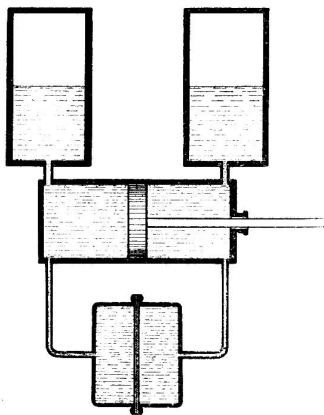


Fig. 23.

Wir gehen dabei von dem Moment aus, wo der Kolben in seiner äußersten Lage rechts angelangt ist und im Begriff steht, den Rückweg anzutreten. In diesem Moment

steht er gerade stille und der Druck hat ein Maximum erreicht, das wir willkürlich als positiv bezeichnen wollen. Die Kautschuk-Membrane des Kondensators ist jetzt am stärksten nach links ausgebaucht; ihre Spannung hält dem Druck der Pumpe das Gleichgewicht und *das Wasser im Verbindungsrohr steht still*. Geht der Kolben nun erst langsam und dann immer schneller von rechts nach links zurück, so nimmt auch der Druck der Pumpe erst langsam und dann immer schneller ab. Jede kleinste Verminderung dieses Druckes hat aber auch eine entsprechende Abnahme des Kondensator-Drucks zur Folge, so daß in jedem Moment zwischen Pumpendruck und Kondensatordruck Gleichgewicht herrscht. Dieser stetige Ausgleich zwischen Druck und Gegendruck findet durch eine Verschiebung des Wassers im Kondensatorkreis statt. Im Kondensator und im Verbindungsrohr, das der Voraussetzung nach nur ganz kurz und weit ist und keinen Reibungswiderstand besitzt, fließt das Wasser entsprechend der Schnelligkeit der Druckverminderung erst langsam und dann immer schneller von links nach rechts. Wie wir gesehen haben, ist im Moment, wo der Kolben durch die Mittellage eilt, seine Geschwindigkeit und mithin auch die zeitliche Druckveränderung am größten. Folglich bewegt sich in diesem Moment das Wasser im Kondensatorkreis auch am schnellsten, die Stromstärke ist am größten. Wie nun der Kolben nach Ueberschreiten der Mittellage mit stetig verminderter Geschwindigkeit nach der äußern Stellung links eilt, nimmt die Spannung im entgegengesetzten Sinne erst schnell und dann immer langsamer zu, bis sie schließlich das negative Maximum erreicht hat. Die während der Dauer dieser halben Periode stets gleichgerichtete Bewegung des Wassers im Kondensatorkreis verlangsamt sich immer mehr und hört vollständig auf, wenn der Kolben ganz links steht und auch die *Druckzunahme* aufgehört hat. Die Membrane des Kondensators ist jetzt nach rechts ausgebaucht und hält dem negativen maximalen Pumpendruck das Gleichgewicht.

Während also in der betrachteten halben Periode der äußere Druck von einem positiven Maximalwert bis null abnahm und bis zum negativen Maximalwert wieder anstieg, nahm im Kondensatorkreis die Strömung des Wassers, d. h. die Stromstärke in negativer Richtung vom Wert null an zu, erreichte nach  $\frac{1}{4}$  Periode (Kolben in der Mittellage, Druck = 0) einen negativen Maximalwert und nahm in der zweiten Viertelperiode wieder bis zum Wert null ab.

In einem geschlossenen Stromkreis, der nur ohmschen Widerstand enthält, würde der negative Maximalwert der Stromstärke mit dem negativen Maximalwert der Spannung (Kolben links) zeitlich zusammenfallen; aber im widerstandslosen Kondensator-Kreis wird der negative Maximalwert der Stromstärke schon  $\frac{1}{4}$  Periode vor dem Maximalwert der Spannung erreicht. Die Stromstärke ist hier also nicht in Phase mit der Spannung, sondern *sie eilt der Spannung um  $\frac{1}{4}$  Periode oder um  $90^\circ$  voraus*.

Je nach der Drehungsgeschwindigkeit der Antriebswelle (Fig. 17) d. h. je nach der Dauer einer Periode, oder je nach der Periodenzahl in der Sekunde, der Frequenz, eilt der Kolben schneller oder langsamer hin und her und die Geschwindigkeit der Druckveränderung ist entsprechend größer oder kleiner. Ob aber die Periodenzahl groß oder klein sei, so wird bei gleichbleibendem Maximaldruck die Menge des durch den Kondensatorkreis verschobenen Wassers immer die gleiche sein; nur die Verschiebung wird um so schneller vor sich gehen, das Wasser wird um so rascher hin- und herströmen, *d. h. die maximale, die momentane oder die mittlere Stromstärke wird um so größer und der scheinbare Widerstand um so kleiner sein*, je größer die Frequenz, die Periodenzahl  $n$ . Welches ist der genauere Wert der Stromstärke und des scheinbaren Widerstandes?

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, daß die Stromstärke im Kondensatorkreis außer von der Kapazität auch

von der zeitlichen Aenderung der Spannung abhängig sei, und bei der Beschreibung des Wechselstrom-Modells lernten wir das Gesetz dieser zeitlichen Spannungsänderung beim Wechselstrom kennen, nämlich

$$\frac{d(v-v')}{dt} = E_0 \cdot 2\pi n \cdot \cos \alpha \text{ und } E_0 \cdot 2\pi n = E_0 \omega \text{ für}$$

$\alpha = 0$  und  $\cos \alpha = 1$ . Bedeutet also  $E_0 \omega$  die maximale Geschwindigkeit der Spannungsänderung, so beträgt die maximale Stromstärke im Kondensatorkreis  $J_0 = E_0 C \omega$ .

Das Produkt  $C \omega$  ist ein Ausdruck für das Leitvermögen des Kondensators, für die *Kondensator-Konduktanz* und sein umgekehrter Wert  $\frac{1}{C \omega}$  ist folglich ein Widerstand, die *Kondensator-Reaktanz* genannt. Da die Stromstärke  $J$  in Ampère erhalten wird, wenn  $E$  in Volt und  $C$  in Farad angegeben sind, so kann  $\frac{1}{C \omega}$  auch in Ohm angegeben werden.

Für die Periodenzahl  $n = 40$  wird die Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi n = 250$  und ein Kondensator von 2 Mikrofarad besitzt die Kapazität-Reaktanz von  $\frac{1}{0,000002 \cdot 250} = \frac{1000000}{2 \cdot 250} = 2000 \text{ Ohm}$ .

Bei den telephonischen Sprechströmen nimmt man eine mittlere Frequenz von  $n = 800$  an. Die Kreisfrequenz ist also

$$\omega = 2 \cdot 3,1416 \cdot 800 = 5000$$

und der Kapazitäts-Widerstand eines Kondensators von 2 Mikrofarad daher

$$\frac{1}{C \omega} = \frac{1000000}{2 \cdot 5000} = 100 \text{ Ohm}$$

Der Kondensator<sup>1)</sup> gibt wegen seiner Eigenschaft, für Wechselstrom durchlässig, dagegen für Gleichstrom so gut wie undurchlässig zu sein, ein bequemes Mittel an die Hand, Leitungswege gegen den Gleichstrom zu sperren, sie aber gleichzeitig für Ruf- und Sprechströme offen zu halten.

Bei den Sprechströmen ist ein Widerstand von 100 Ohm im Vergleich zu den übrigen in der Leitung gelegenen Widerständen ohne Bedeutung; man kann deshalb in Sprechstromkreisen Kondensatoren von weit geringerer Kapazität als 2 Mikro-Farad benutzen. Versuche zeigen, daß durch die Einschaltung von Kondensatoren mit einer Kapazität bis herab zu 0,1 Mikro-Farad die Lautübertragung nicht merklich beeinflußt wird; selbst bei 0,01 Mikro-Farad ist noch eine wenn auch schwache Verständigung möglich.

Der Rufstrom wird durch die Einschaltung von Kondensatoren in viel höherem Maße als die Sprechströme geschwächt. Die von der Kapazität herrührende Widerstandserhöhung wird hier in gewissem Grade durch die Selbstinduktion des Anrufzeichens, besonders wenn diese, wie bei den Wechselstromweckern, einen größern Wert erreicht, ausgeglichen, indem die Gesamtimpedanz kleiner ist als die Summe der Widerstände, die von der Kapazität und der Selbstinduktion je für sich dem Anrufstrom entgegengesetzt würden. Durch entsprechende Bemessung der Kapazität könnte man für jede Weckertype eine für das Ansprechen möglichst günstige Gesamtimpedanz erhalten. Aus Betriebsrücksichten sucht man aber mit Kondensatoren von einheitlicher Kapazität auszukommen, die man so niedrig als wirklich zugänglich wählt, um an den Kosten zu sparen. Es hat sich gezeigt, daß Kondensatoren von 2 Mikro-Farad diesen Ansprüchen am besten gerecht werden.

1) Vergleiche Hersen und Hart, Seite 70.

## Divers

### Câble Londres - Birmingham.

Pour faire face à l'augmentation du trafic téléphonique entre les villes de Londres, Birmingham et Liverpool, l'Administration anglaise des Télégraphes et des Téléphones a fait procéder en 1914 à la pose d'un câble souterrain Londres-Birmingham, long de 176,8 km, première section du câble Londres-Liverpool dont la longueur totale sera de 320 km.

Ce câble contient 2 paires de conducteurs de 3,5 mm de diamètre, 14 paires de 2,8 mm, 12 paires de 2,5 mm et 24 paires de 2 mm, ce qui permet d'échanger simultanément 52 conversations sur les lacets de base et 26 sur les lacets combinés. Les lacets de base et les lacets combinés sont munis de bobines Pupin.

Les essais d'audition ont donné les résultats suivants:

- Fils de 3,5 mm; longueur 354 km à peu près égale à la distance Genève-Romanshorn et obtenue en reliant en série 2 lacets Londres-Birmingham: Voix très forte et claire.
- Fils de 2,8 mm dans les mêmes conditions: Résultat identique.
- Fils de 2,8 mm. Longueur de 708 km équivalente, à peu près, à la distance Londres-Glasgow ou Frauenfeld-Marseille: Correspondance très bonne.
- Mêmes lacets que sous c, mais prolongés de 2 longueurs de conducteurs de 3,5 mm; longueur totale = 1060 km correspondant à peu près au trajet de Londres à Aberdeen ou de Bâle à Rome: La correspondance s'échange sans difficulté; mais cette distance doit toutefois être considérée comme limite commerciale.
- Mêmes lacets que sous d, mais prolongés de 2 lacets de 2,8 mm en série; longueur totale 1415 km, équivalente à la distance Francfort-Rome: La correspondance est encore possible, mais le son rendu par le récepteur est trop faible pour les besoins ordinaires. *Mi.*

### Zeitzeichen.

»Welche Zeit haben wir?« fragte der Mensch die Uhr.

»Wir? Welche Zeit?« antwortete ihm die Uhr, »ich habe keinen Begriff für Zeit! Mein Zifferblatt ist dein Werk! ... Zeit: das bist Du!«

\* \*

»Ich zeige die Stunden an ... das ist das Wichtigste!« sagte der Stundenzeiger.

»Die Minuten sind wohl die wichtigsten!« bemerkte der Minutenzeiger.

»Ohne mich könnt ihr überhaupt nichts anzeigen!« sagte das Zifferblatt und wölbte sich vor Stolz.

»Was Sekunden, Minuten, Stunden und Zifferblatt ... ich bin alles!« rasselte das Werk aus dem Hintergrunde.

»Wenn ich dich in Gang setze!« ergänzte der Mensch. »Ihr alle seid nur durch mich! Ich habe euch erdacht und geschaffen!« Der liebe Gott im Himmel schwieg stille.

\* \*

Wann werden alle Menschen sich verstehen, wann werden sie in Harmonie und Wohlwollen miteinander leben! Bis alle Uhren den gleichen Schlag haben. ... Die Turmuhren und die Taschenuhren, die grossen und die kleinen, die goldenen und die silbernen, die kostbaren und die wertlosen!

Das wird also noch eine gewisse Zeit dauern, ja, sogar eine ungewisse Zeit.

Max Hayek.

(Münchener Jugend 1918, No. 41.)