

Messung der Capacität von Condensatoren mit Wechselstrom

J. Sahulka.

Aus dem Elektrotechnischen Institute der k. k. technischen Hochschule in Wien.

(Mit 4 Textfiguren.)

Der Zweck der vorliegenden Arbeit war, zu untersuchen, wie sich die Condensatoren im Wechselstrombetriebe verhalten, und insbesondere zu prüfen, ob sie dieselbe Capacität haben, wie sie mit einer Gleichstromquelle gemessen wird oder nicht. Die Capacität von Condensatoren, welche in einen Wechselstromkreis eingeschaltet sind, könnte in der Weise gefunden werden, dass man die Stärke des Ladungsstromes und die Spannungsdifferenz am Condensator misst. Zur Untersuchung verschiedener Condensatoren würde man mehrere Strom- und Spannungsmesser benöthigen. Nach den Versuchen von Steinmetz¹ verbrauchen die Condensatoren mit festem Dielektricum im Wechselstrombetriebe eine Arbeit, welche innerhalb eines weiten Bereiches dem Quadrate der Spannungsdifferenz proportional ist. Da ich nicht bloss die Capacität, sondern auch die Arbeitsverluste der Condensatoren ermitteln wollte, wählte ich zur Messung eine Methode, welche analog ist der Joubert'schen Methode zur Bestimmung der Selbstinductions-Coëfficienten. Das Resultat meiner Untersuchungen ist, dass die Capacität der Condensatoren mit festem Dielektri-

¹ Dielektrische Hysteresis, von CH. Steinmetz. Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin 1892, S. 227.

cum im Wechselstrombetriebe beträchtlich kleiner ist als die mit einer Gleichstromquelle gemessene Capacität.

Als Messinstrument verwendete ich ein Elektrometer, und zwar ein Multicellular-Voltmeter von W Thomson, mit welchem Spannungsdifferenzen von 80 bis 400 Volt gemessen werden konnten. Das Instrument enthält in gleichen Abständen über einander eine Reihe von Quadrantenpaaren *AA* (Fig. 1), welche unter einander leitend verbunden sind; diese bilden das feste System. In den einzelnen so entstehenden Zellen befinden sich Aluminiumnadeln *B*, welche unter einander in fester Weise leitend verbunden sind und von einem feinen Platindrahte und einer Spirale getragen werden. Das Instrument hat

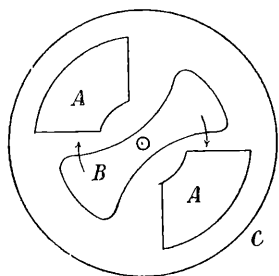


Fig. 1.

zwei Klemmen, von welchen die eine mit dem festen System, die andere mit den Nadeln und einem das Instrument einschliessenden Metallgehäuse *C* leitend verbunden ist. Wenn zwischen den Klemmen des Instrumentes keine Spannungsdifferenz besteht, so nehmen die Nadeln eine Stellung zwischen den Quadranten ein. Wird das Instrument an zwei Punkte angeschlossen, welche eine Spannungsdifferenz haben, so werden die Nadeln in der Richtung der Pfeile zu den Quadranten bewegt. Die Drehung ist stets kleiner als 90° . Die Ablesung erfolgt mit Hilfe eines Zeigers, welcher auf einer Scala einspielt. Bei dem verwendeten Instrumente waren nur die Intervalle zwischen 120 und 220 Volt hinreichend gross, um eine genaue Ablesung zu ermöglichen. Um nun zu wissen, ob in jedem Falle die Capacität und der Ladestrom des Instrumentes vernachlässigt werden kann, wollte ich zunächst diese beiden Grössen bestimmen. Dies war mit keiner der bekannten Methoden ausführbar, da sowohl der Ladestrom, als auch die Capacität ausserordentlich klein sind. Die Bestimmung geschah in folgender Weise: Um eine passende Spannungsdifferenz zu haben, wurde der zur Verfügung stehende Wechselstrom von circa 100 Volt Spannungsdifferenz mit Hilfe eines Transformators, dessen Umsetzungsverhältniss 1 2 war,

transformirt. Es wurde hierauf die Spannungsdifferenz E zwischen den Klemmen des Secundärkreises des Transformators gemessen, wenn derselbe nur durch das Multicellular-Voltmeter geschlossen war. Hierauf wurde zu dem Voltmeter ein bekannter grosser Graphitwiderstand in Serie geschaltet. Das Voltmeter zeigte nun eine kleinere Spannungsdifferenz E' an. Da das Voltmeter als ein kleiner Luftcondensator angesehen werden kann, muss die auf dasselbe entfallende Spannungsdifferenz E' (Fig. 2) im Vergleich zu dem Ladestrom J in der Phase um 90° nachfolgen, während die gleichzeitig auf den Graphitwiderstand entfallende Spannungsdifferenz E'' mit dem Strome J in der Phase übereinstimmt.¹ Es ist daher:

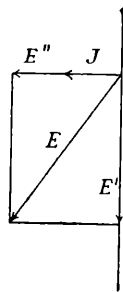


Fig. 2.

$$E = \sqrt{E'^2 + E''^2}.$$

Da E und E' beobachtet wurde, ist E'' bekannt; nun kennt man auch den Ladestrom

$$J = \frac{E''}{R}.$$

Ist n die Periodenzahl des Wechselstromes, welche als bekannt vorausgesetzt ist, so hat man:

$$J = 2\pi n E' C. \quad 1)$$

Der verwendete Wechselstrom hatte 5000 Polwechsel in der Minute, so dass $p = 2\pi n = 262$ ist. In der folgenden Tabelle sind die Resultate einer Versuchsreihe zusammengestellt. Die Grössen R sind in Megohm, die Grössen E , E' , E'' in Volt, J in Milliontel-Ampère, C in Milliontel-Mikrofarad ausgedrückt. Die letzte Reihe enthält den scheinbaren Widerstand des Voltmeters in Megohm.

¹ Unter E , J sind die Quadratwurzeln aus dem mittleren Quadrate der veränderlichen Spannungsdifferenz, respective des Stromes verstanden.

R	E	E'	E''	J	C	R'
11·05	207·2	195·3	69·2	6·26	122	31·2
20·78	207·6	177·1	108·3	5·21	112	34·0
33·16	207·6	154·6	138·6	4·18	103	37·0
41·90	207·9	140·3	153·4	3·66	99·6	38·3
52·40	208·0	124·4	166·7	3·18	97·6	39·1

In der Figur 3 sind die Versuchsergebnisse graphisch dargestellt. Die Einheit der Abscissen bedeutet 1 Volt, die Einheit der Ordinaten bedeutet für die Curve C : $\frac{1}{10^6}$ Mikrofarad, für die Curve J $\frac{1}{10^7}$ Ampère. Wie ersichtlich ist, wächst die Capacität des Instrumentes mit zunehmender Voltzahl; dies musste sich ergeben, weil bei zunehmender Spannungsdifferenz sich die Nadeln zu den Quadranten bewegen. Würde man bei der Messung das bewegliche System stets mit Hilfe eines Torsionsknopfes in die Nullstellung zurückdrehen, so wäre die Capacität constant; dann könnte auch die Scala über die ganze Peripherie reichen. Es wäre dann die Spannungsdifferenz E' und der Ladungsstrom J proportional der Quadratwurzel aus dem Torsionswinkel. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, verbraucht das Instrument nicht mehr Strom als ein Spiegelgalvanometer. Wenn für ein Instrument die Curve J (Fig. 3) aufgenommen ist, so kann man umgekehrt mit dem Instrumente grosse Widerstände messen, welche frei sind von Capacität und Selbstinduction.

Um die Capacität eines Condensators im Wechselstrombetriebe zu messen, schaltete ich zu demselben einen inductionslosen Widerstand R in Serie, der von derselben Größenordnung sein muss wie der scheinbare Widerstand des Condensators; zu jedem Condensator gibt es einen solchen geeigneten Widerstand. Mit dem Multicellular-Voltmeter wurde die gesammte Spannungsdifferenz E , die am Condensator E' und die am Widerstande herrschende E'' gemessen. Ist der Condensator ein Luftcondensator, so kann E als Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreieckes dargestellt werden, dessen Katheten $E'E''$

sind (Fig. 2). Hat er jedoch ein festes Dielektricum, so ist E' im Vergleich mit dem Ladestrome J und daher auch im Vergleich mit E'' um einen Winkel φ in der Phase verschoben, welcher kleiner ist als 90° , wie dies im Polardiagramm (Fig. 4) dargestellt ist. Die Componente E' überwindet den inductiven Widerstand des Condensators. Da das Dielektricum des Con-

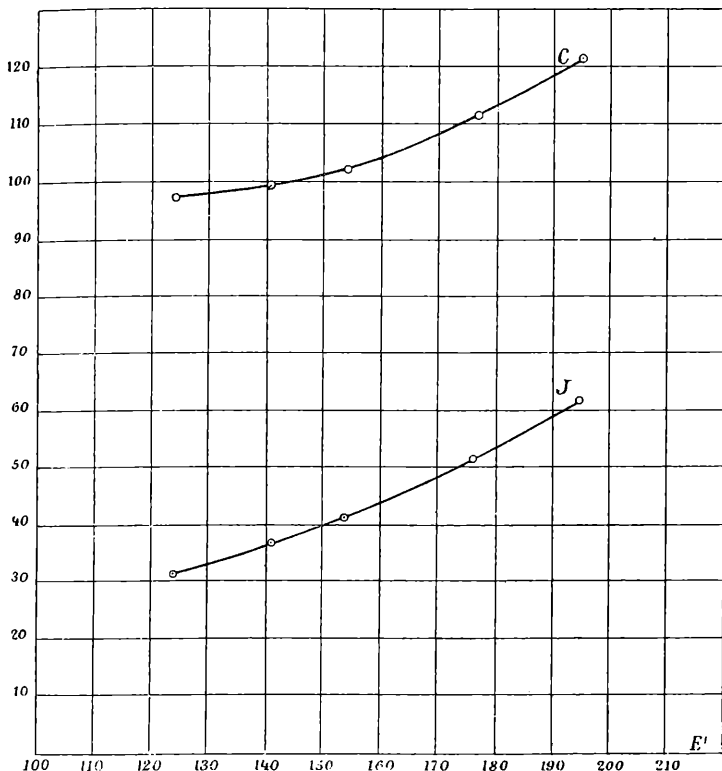


Fig. 3.

densators im Wechselstrombetriebe Arbeit verbraucht, was auch an der Erwärmung desselben kenntlich ist, so folgt, dass die Capacität des Condensators in jedem Zeitmomente eine andere ist. Sowie nun die Stromstärke oder Spannungsdifferenz im Wechselstrombetriebe definirt wird als die Quadratwurzel aus dem mittleren Quadrate der veränderlichen Stromstärke, respective Spannungsdifferenz, so muss auch für die Capacität C' eines Condensators im Wechselstrombetriebe eine Definition

gewählt werden. Die Definition könnte mit Rücksicht auf die Formel 1) lauten:

Der inductive Widerstand eines in einen Wechselstromkreis eingeschalteten Condensators ist gleich dem Quotienten aus der durch die Ladung des Condensators hervorgerufenen Spannungsdifferenz E' und der Stromstärke J .

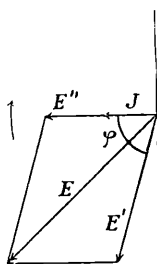


Fig. 4.

Die Capacität C' des Condensators ist gleich dem reciproken Werthe des Productes aus dem inductiven Widerstande und $2\pi n$.

In der folgenden Tabelle sind einige Versuchsergebnisse zusammengestellt, welche an Condensatoren angestellt wurden, die paraffinirtes Papier als Dielektricum hatten. C ist die mit einer Gleichstromquelle in bekannter Art gemessene Capacität in Mikrofarad, der vorgeschaltete Widerstand R ist in Ohm, E , E' , E'' in Volt, J in Ampère ausgedrückt, $C' = \frac{J}{E' \cdot 2\pi n}$ ist die Capacität des Condensators im Wechselstrombetriebe und ist ebenfalls in Mikrofarad ausgedrückt. Es wurde ferner noch die Phasenverschiebung φ und der Arbeitsverbrauch A im Condensator in Watt ausgedrückt berechnet gemäss den Formeln:¹

$$\cos \varphi = \frac{E^2 - E'^2 - E''^2}{2E'E''}$$

$$A = E'J \cos \varphi.$$

Endlich wurden noch gerechnet die Grössen:

$$\rho = \frac{E'}{J} \cos \varphi \quad \text{und} \quad \frac{1}{2\pi n C''} = \frac{E'}{J} \sin \varphi$$

Der untersuchte Condensator verhält sich wie ein Luftcondensator von der constanten Capacität C'' , dem ein Ohm'scher Widerstand ρ vorgeschaltet ist.

¹ Die Bestimmung der in einem Wechselstromapparate verbrauchten Energie mit Hilfe der Beobachtung von drei Spannungsdifferenzen wurde zuerst von Ayrton und Sumpner ausgeführt. Phil. Mag., Bd. 32, p. 204, 1891.

Die Grösse C'' , welche durch die obige Formel defnirt ist, könnte man die effective Capacität des Condensators nennen; diese ist ein wenig grösser als C'

Nr.	C	R	E	E'	E''	J	C'		A		$\frac{1}{pC''}$	C''
1	1·004	4000	206·9	147·8	135·2	0·0338	0·873	86° 9'	0·336	293·7	4363	0·875
2		5000	206·8	132·0	149·2	0·0298	0·862	85°31'	0·308	346·6	4416	0·864
3		6000	207·5	120·1	161·1	0·0269	0·855	86° 2'	0·224	309·1	4454	0·857
4		7000	207·4	107·5	170·0	0·0243	0·863	85°59'	0·183	309·7	4413	0·865
5	0·514	9000	207·6	139·7	145·3	0·0161	0·440	86°30'	0·137	527·9	8661	0·441
6	2·618	2000	207·1	129·8	152·5	0·0763	2·244	85°58'	0·697	119·7	1697	2·249

Es scheint mir am Vortheilhaftesten zu sein, bei einem Condensator die effective Capacität C'' , sowie den Arbeitsverlust, der in ihm bei einer bestimmten Spannungsdifferenz und Periodenzahl stattfindet, anzugeben. Da sich die Grösse $\cos \varphi$ als eine Differenz von grossen Zahlen ergibt, ist die Bestimmung von φ etwas unsicher. Dadurch ist auch ρ und der Arbeitsverbrauch etwas unsicher bestimmt, so dass sich namentlich bei Spannungsvariationen leicht Abweichungen ergeben können, wie dies bei dem mit Nr. 2 bezeichneten Versuche der Fall war. Will man φ , ρ und den Arbeitsverbrauch genau ermitteln, so muss man jeden Versuch mehrmals wiederholen und die Mittelwerthe nehmen. Die Werthe des C'' differiren bei ruhigem Gange der Maschine nur um 1%.

Nimmt man aus den ersten vier Versuchen, welche sich auf denselben Condensator beziehen, das Mittel, so ersieht man, dass das Verhältniss der C'' der drei Condensatoren (1 0·510

2·600) übereinstimmt mit dem Verhältnisse der Werthe der C (1:0·512:2·608). Es ergaben sich aber die Werthe C'' um 14% kleiner als die Werthe C . Man ersieht daraus, dass die Condensatoren im Wechselstrombetriebe eine kleinere Capacität haben als die, welche sich bei einer Messung mit einer Gleichstromquelle ergibt; nur bei den Luftcondensatoren kann dies nicht der Fall sein. Die Ursache dieser Erscheinung liegt in der Beschaffenheit des Dielektricum. Wenn auch dasselbe einen sehr grossen Widerstand hat, nimmt es bei

der Ladung doch elektrische Energie auf. Bei der Entladung wird ein Theil dieser Energie wieder zurückgegeben, während ein anderer Theil in Wärme umgewandelt wurde. Aus diesem Grunde beobachtet man bei der Verwendung einer Gleichstromquelle sowohl einen zu grossen Ladungs-, als auch einen zu grossen Entladungsausschlag am Spiegelgalvanometer, weil dasselbe nicht bloss die Elektrizitätsmenge anzeigt, welche die Belegungen aufgenommen haben, sondern auch die, welche vom Dielektricum aufgenommen, respective bei der Entladung theilweise zurückgegeben wurde. Im Wechselstrombetriebe erfolgt Ladung und Entladung in sehr kurzer Zeit, indem sich während der Dauer einer Viertelperiode die Spannungsdifferenz vom Nullwerthe bis zum Maximalwerthe ändert. Daher hat das Dielektricum bei jeder einzelnen Ladung nicht hinreichend Zeit, so viel elektrische Energie aufzunehmen, wie sie bei gleicher Spannungsdifferenz von einer Gleichstromquelle aufnehmen würde; ebenso gibt es bei der Entladung weniger Energie ab. Aus diesem Grunde ist es erklärlich, dass die Capacität der Condensatoren im Wechselstrombetriebe viel kleiner ist als bei Verwendung von Gleichstrom. Man muss daher für den Wechselstrombetrieb eine besondere Definition der Capacität geben, wie dies zuvor gemacht wurde.

Betrachtet man die Werthe für die Verluste A in dem ersten Condensator, so sieht man, dass sie mit dem von Steinmetz an der citirten Stelle angegebenen Gesetze, dass die Verluste dem Quadrate des E' proportional sind, annähernd übereinstimmen. Sollte das Gesetz genau erfüllt sein, so müssten die Zahlen lauten $0\cdot352$, $0\cdot281$, $0\cdot232$, $0\cdot186$.

Ich habe in gleicher Weise auch die Capacität von Leydnerflaschen untersucht, es war aber dann nothwendig, zu den Flaschen einen Widerstand von 1 Megohm in Serie zu schalten. Da das Multicellular-Voltmeter je nach der Ablenkung einen Widerstand von 30 bis 40 Megohm hatte, durfte man, wenn genaue Messungen ausgeführt werden sollten, den durch das Voltmeter fliessenden Strom nicht mehr vernachlässigen. Die Berechnung gestaltet sich dann etwas complicirter.

Bei zwei cylindrischen Leydnerflaschen von 14 *cm* Durchmesser, deren Belegungen 14 *cm* hoch waren, und deren Glas-

dicke im Mittel $3\cdot60\text{ mm}$ war, ergab sich, wenn man den durch das Multicellular-Voltmeter fließenden Strom vernachlässigte, eine Capacität von $\frac{3370}{10^6}$ Mikrofarad, welche beiden Flaschen zusammen zukommt.

Eine ganz kleine Leydnerflasche schaltete ich mit dem Multicellular-Voltmeter direct in Serie. Man kann angenähert annehmen, dass die Spannungsdifferenz E' an der Leydnerflasche mit der Spannungsdifferenz E'' am Voltmeter in der Phase übereinstimmt. Dann verhalten sich diese Grössen verkehrt wie die Capacitäten. Die verwendete Flasche hatte $7\cdot5\text{ cm}$ Durchmesser, die Höhe der Belegung war 11 cm . Es wurde beobachtet: $E = 207\cdot6$, $E' = 190\cdot6$; daher ist $E'' = 17\cdot0$. Da das Multicellular-Voltmeter bei der Spannungsdifferenz von $190\cdot6$ Volt eine Capacität von $\frac{119}{10^6}$ Mikrofarad hat, wie aus der Figur 3 ersichtlich ist, so ergibt sich für die Capacität der Leydnerflasche der Werth:

$$C'' = \frac{119}{10^6} \cdot \frac{190\cdot6}{17} = 0\cdot00133 \text{ Mikrofarad.}$$

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse](#)

Jahr/Year: 1893

Band/Volume: [102_2a](#)

Autor(en)/Author(s): Sahulka Johann

Artikel/Article: [Messung der Capacität von Condensatoren mit Wechselstrom. 773-781](#)