

# Prazisionsmessungen von Kapazitäten, dielektrismen Verlusten und Dielektrizitat- skonstanten

Dr. Erich Blechschmidt

 Springer

# **Verfahrens- und Meßkunde der Naturwissenschaft**

---

Herausgegeben von Dr. Hermann Ebert

Oberregierungsrat und Mitglied bei der Physikal.-Techn. Reichsanstalt

Unter ständiger Mitwirkung von G. Angenheister, K. Beurlen, E. Kleinschmidt, H. Kienle, A. Leonhard, H. I. Schuhmacher, L. Wolf

---

Die Sammlung umfaßt die Gebiete Physik, Physikalische Chemie, Chemie, Astrophysik, Astronomie, Geophysik, Meteorologie, Geologie, Mineralogie, Kristallographie, Elektrotechnik, Glastechnik, Biologie und Medizin.

Die Verfahrens- und Meßkunde der genannten Gebiete will die vielfach zerstreuten Mitteilungen sammeln und in der notwendigen Ausführlichkeit brauchbare Anweisungen für die Verfahren und Messungen geben. Die Aufstellung einer Systematik der Verfahren und Messungen ist beabsichtigt.

Die Physik gliedert: Mechanik allgemein, feste Körper (Ballistik), Flüssigkeiten (Hydrodynamik), Gase (Aerodynamik). — Akustik. — Optik (Beleuchtungs-Lichttechnik). — Wärme. — Elektrizität, Magnetismus, Elektromagnetismus (Elektrodynamik), Hochfrequenz- und Funktechnik. — Molekularphysik. — Atomphysik (Radioaktivität).

---

# Präzisionsmessungen von Kapazitäten, dielektrischen Verlusten und Dielektrizitäts- konstanten

von

**Dr. Erich Blechschmidt**

Regierungsrat



---

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

**Herausgeber dieses Heftes:  
Oberregierungsrat Dr. H. Ebert**

**Mit 62 Abbildungen**

**Alle Rechte vorbehalten**

ISBN 978-3-663-00932-0  
DOI 10.1007/978-3-663-02845-1

ISBN 978-3-663-02845-1 (eBook)

## Vorwort

Das vorliegende Heft in der Sammlung Verfahrens- und Meßkunde soll einen Überblick über die gebräuchlichen Meßmethoden zur Bestimmung von Kapazitäten, dielektrischen Verlusten und Dielektrizitätskonstanten geben. In neuerer Zeit sind bereits verschiedene Werke erschienen, in denen auch über Kondensatoren und ihre Messung berichtet wird. Wenn ihnen dieser Band hinzugefügt wird, so scheint mir das seine Berechtigung zu haben, da hier ganz besonderer Wert auf experimentelle Einzelheiten gelegt wurde. Dies kann besonders den Physikern, Ingenieuren und Technikern von Nutzen sein, die noch nicht Spezialisten auf diesem Arbeitsgebiet sind. Sie werden nach der richtigen Auswahl des geeigneten Verfahrens die zahlreichen Fehlerquellen leichter vermeiden und in der Lage sein, unter Benutzung der bereits anderweitig gewonnenen Erfahrungen wirkliche Präzisionsmessungen auszuführen. Bei der Darstellung ist insofern eine Auslese getroffen, als die eingehende Beschreibung solcher Schaltungen unterblieben ist, die nur eine Entwicklungsstufe zu vollkommeneren Anordnungen bilden.

Die zur Planung und Auswertung von Messungen notwendigen theoretischen Hilfsmittel sind in einem besonderen Teil der eigentlichen Verfahrenskunde vorangestellt. Es ist dabei bewußt auf eine streng mathematische Ableitung der Beziehungen verzichtet worden, sie hätte einen zu großen Umfang dieses Heftes bedingt, kann in speziellen Werken nachgelesen werden und würde auch dem messenden Ingenieur keinen besonderen Vorteil bieten. Wohl ist aber versucht worden, in knapper Darstellung alles das zu bringen, was zum allgemeinen Verständnis und zur Berechnung von Wechselstromschaltungen als Rüstzeug notwendig ist. In den meisten Fällen werden die mitgeteilten Formeln zur Berech-

#### IV

nung von Kapazitäten und zur Auswertung von Meßergebnissen ohne zusätzliche Entwicklungen ausreichen.

Neben den eigentlichen Meßverfahren wurden auch eine Anzahl von handelsüblichen Präzisionsnormalen der Kapazität beschrieben und auf deren besondere Eigenschaften in meßtechnischer Hinsicht aufmerksam gemacht. Hierbei konnten die langjährigen Erfahrungen verwertet werden, die gerade auf dem Gebiet der Kapazitätsnormale und der Kapazitätsmessung in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt erworben worden sind.

Berlin-Charlottenburg, im Februar 1940.

Dr. Erich Blechschmidt

# Inhalt

	Seite
<b>I. Theoretische Übersicht</b> .....	1
1. Begriff der Kapazität und Teilkapazität .....	1
2. Die Dielektrizitätskonstante .....	3
3. Berechnung von Kondensatoren .....	3
a) Kugelkondensator .....	6
b) Zylinderkondensator .....	7
c) Zweiplattenkondensator .....	8
d) Dreiplattenkondensator .....	9
e) Schutzringkondensator .....	9
f) Doppelleitung .....	10
g) Drehstromkabel .....	13
4. Die Kapazität in Wechselstromkreisen .....	14
5. Verluste im Kondensator .....	17
6. Einheiten .....	21
<b>II. Kapazitätsnormale</b> .....	23
1. Übersicht .....	23
2. Absolute Kapazitätsnormale .....	23
a) Schutzringplattenkondensator .....	23
b) Schutzringzylinderkondensator .....	23
3. Gebrauchsnormale .....	24
a) Allgemeine Anforderungen .....	24
b) Luftkondensatoren .....	25
$\alpha$ ) Festkondensatoren .....	25
Bereich 100—1000 $\mu\mu\text{F}$ .....	25
Bereich 1000—10000 $\mu\mu\text{F}$ .....	26
Bereich 10—100 $\mu\mu\text{F}$ .....	27
Bereich 10000—100000 $\mu\mu\text{F}$ .....	27
$\beta$ ) Veränderliche Kondensatoren .....	28
Plattenkondensatoren .....	28

	Seite
Zylinderkondensatoren .....	30
Schraubkondensatoren .....	31
Differentialkondensatoren .....	31
Kondensatoren kleiner Anfangskapazität .....	32
c) Glimmerkondensatoren .....	33
$\alpha$ ) Stöpselkondensatoren .....	33
$\beta$ ) Kurbelkondensatoren .....	37
$\gamma$ ) Eigenschaften der Glimmerkondensatoren .....	39
d) Spezialkondensatoren für Hochspannungszwecke .....	39
e) Technische Kondensatoren .....	40
<b>III. Meßmethoden</b> .....	<b>40</b>
1. Übersicht .....	40
2. Unmittelbare Meßmethoden .....	41
a) Bestimmung der Kapazität aus Strom- und Spannungsmessungen .....	41
b) Messung mittels ballistischen Galvanometers .....	42
c) Die Maxwell-Thomson-Brücke .....	43
3. Mittelbare Meßmethoden .....	48
a) Vergleich zweier Kapazitäten mit dem ballistischen Galvanometer .....	48
b) Brückenmethoden: Allgemeine Übersicht .....	50
$\alpha$ ) Messungen mit Wechselstrombrücken .....	50
$\beta$ ) Indikatorinstrumente, Wechselstromquellen .....	50
$\gamma$ ) Empfindlichkeit der Brücke .....	51
$\delta$ ) Streufelder .....	52
$\epsilon$ ) Der Wagnersche Hilfszweig .....	54
$\zeta$ ) Substitutionsverfahren .....	55
c) Schaltungen .....	56
$\alpha$ ) Übersicht .....	56
$\beta$ ) Messungen in der Giebe-Zickner-Brücke .....	56
Schaltung, Brückenbedingungen .....	56
Ein System mit dem Gehäuse verbunden .....	60
Abgeschützter Kondensator, beide Systeme vom Gehäuse isoliert .....	60
Messung der Betriebskapazität eines abgeschützten Kondensators .....	63
Messung eines nicht abgeschützten Kondensators .....	63
Messung sehr kleiner Kapazitäten .....	64



Inhalt	VII
	Seite
Messung sehr großer Kapazitäten .....	66
Messung eines Schutzringkondensators .....	67
Genaue Eichung eines Kondensatorsatzes .....	68
γ) Die Hochspannungsbrücke nach Schering .....	70
δ) Messung von Elektrolytkondensatoren .....	71
ε) Sonderanordnungen zur Bestimmung der Betriebskapazität von verlegten Kabeln .....	71
ζ) Vergleichung einer Kapazität mit einer Gegeninduktion ...	74
Die Carey-Foster-Brücke .....	74
Campbells Kapazitätsmeßbrücken .....	75
d) Messung von Kapazitäten bei Hochfrequenz .....	78
α) Die Resonanzbrücke .....	78
Allgemeines .....	78
Aufbau der Brücke .....	80
Meßverfahren .....	82
Fehlerquellen .....	82
β) Messungen im Schwingungskreis .....	83
Aufbau der Anordnung .....	84
Kapazitätmessungen .....	84
Verlustfaktormessungen .....	85
Aus der Resonanzkurve .....	85
Nach dem Verfahren von Lindemann und Rohde ..	87
e) Weitere Methoden zur Verlustfaktormessung .....	89
4. Messung von Dielektrizitätskonstanten .....	89
a) Allgemeines Meßverfahren .....	89
b) Messung an festen Körpern .....	89
c) Messungen an Flüssigkeiten .....	91
α) Methode von Nernst für schwache Leitfähigkeit .....	91
β) Methode von Nernst für mittlere Leitfähigkeiten .....	91
γ) Messungen mit Hochfrequenz am Lecherdrahtsystem ..	92
δ) Wiensche Barrettermethode .....	93
d) Messungen an Gasen .....	96
<b>IV. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>97</b>
<b>Namenverzeichnis .....</b>	<b>112</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>113</b>

# I. Theoretische Übersicht

## 1. Begriff der Kapazität und Teilkapazität

Wenn man einer isolierten leitenden Kugel im leeren Raum vom Radius  $R$  eine Elektrizitätsmenge  $Q$  zuführt, so wird sie auf ein Potential  $V$  aufgeladen, dessen Größe von dem Verhältnis der zugeführten Elektrizitätsmenge zum Radius der Kugel abhängt, es gilt die Beziehung

$$(1) \quad V = Q/R.$$

Das Verhältnis der zugeführten Elektrizitätsmenge zum Potential des Leiters nennt man seine Kapazität ( $C$ ). Es ist somit

$$(2) \quad C = Q/V.$$

Im Falle der isolierten Kugel im Raum ist  $C = R$ , d. h. die Kapazität ist gleich dem Radius der Kugel, sie hat also die Dimension einer Länge.

Die elektrostatische Einheit der Kapazität hat eine Kugel vom Radius 1 cm, als elektrostatische Einheit der Kapazität ist dementsprechend das Zentimeter gewählt worden.

Praktisch kommt der einfache Fall einer isolierten Kugel im leeren

Raum, d. h. in unendlicher Entfernung von einem anderen Leiter nicht vor. Zumeist befinden sich mehrere voneinander isolierte Leiter nahe beieinander, von denen jeder eine andere Ladung und andere Abmessungen hat. Die von einem Leiter ausgehenden Kraftlinien verlaufen dann nicht mehr radial ins Unendliche, sondern werden von den übrigen Leitern beeinflusst. Damit bekommt jeder Leiter nicht nur eine Kapazität gegen das Unendliche mit dem Potential Null, die (vgl. Abb. 1) für den Leiter 1 mit  $k_{10}$ , für den Leiter 2 mit  $k_{20}$  usf. bezeichnet werde, sondern auch eine Kapazität gegen jeden der benach-

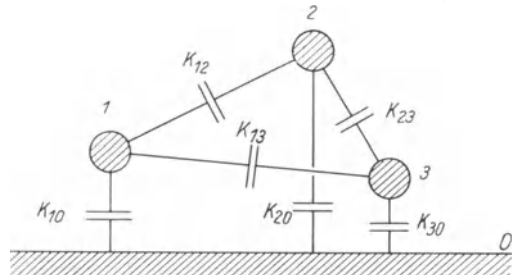


Abb. 1

barten Leiter, es treten also noch Teilkapazitäten  $k_{12}, k_{13}, \dots, k_{21}, k_{23}, \dots$  usf. auf, wobei  $k_{12}$  numerisch gleich  $k_{21}$  ist. Für die Ladungen der einzelnen Leiter erhält man dann die folgenden Gleichungen:

$$(3) \begin{cases} q_1 = k_{10}(v_1 - v_0) + k_{12}(v_1 - v_2) + k_{13}(v_1 - v_3) + \dots + k_{1n}(v_1 - v_n), \\ q_2 = k_{20}(v_2 - v_0) + k_{21}(v_2 - v_1) + k_{23}(v_2 - v_3) + \dots + k_{2n}(v_2 - v_n), \\ \vdots \\ q_n = k_{n0}(v_n - v_0) + k_{n1}(v_n - v_1) + k_{n2}(v_n - v_2) + \dots + k_{n, n-1}(v_n - v_{n-1}), \\ q_0 = k_{10}(v_1 - v_0) + k_{20}(v_2 - v_0) + k_{30}(v_3 - v_0) + \dots + k_{n0}(v_n - v_0) = 0. \end{cases}$$

Die Größe  $v_0$  ist entsprechend der gemachten Voraussetzung gleich Null, braucht also nicht geschrieben zu werden, wie es in der Ausgangsgleichung (1) geschehen ist. Tatsächlich setzt man nun nicht das Potential des Unendlichen, sondern das der Erde zu Null an. Das ist zwar eine willkürliche Festsetzung, man kann das aber bedenkenlos tun, da es bei der Bestimmung von Kapazitäten stets nur auf die Potentialdifferenzen zwischen den Leitern ankommt, und das Potential der Erdkugel infolge ihrer Größe als unveränderlich angesehen werden kann. Die Größen  $k_{10}, k_{20}$  usf. stellen dadurch die Teilkapazitäten der Leiter gegen Erde dar bzw. gegen andere Leiter, die durch leitende Verbindung mit der Erde auf Erdpotential gebracht worden sind.

Von besonderer Bedeutung ist das Problem zweier Leiter, z. B. zweier einander gegenüberstehender Platten, ein System, das man als Kondensator bezeichnet. In einem solchen Fall hat man es mit drei Teilkapazitäten zu tun, nämlich der Teilkapazität  $k_{12}$  zwischen den beiden Platten, der Teilkapazität  $k_{10}$  des Leiters 1 gegen Erde und der Teilkapazität  $k_{20}$  des Leiters 2 gegen Erde. Einigermaßen definiert ist in diesem Falle allerdings nur die Teilkapazität  $k_{12}$ , während  $k_{10}$  und  $k_{20}$  von der Lage des Kondensators zur Umgebung, d. h. zur Erde oder anderen Leitern abhängig sind. In geringerem Maße gilt das selbst für  $k_{12}$ , da in der Nähe befindliche Leiter auch den Kraftlinienverlauf zwischen den beiden Leitern beeinflussen. Will man von diesen Zufälligkeiten unabhängig sein, so umgibt man die beiden Leiter vollständig mit einer leitenden Hülle, die man am besten auf Erdpotential bringt. Dann sind die drei Teilkapazitäten ein für allemal festgelegt und von äußeren Einflüssen unabhängig. Für den Fall des Zweiplattenkondensators ergeben sich dann die folgenden drei Gleichungen:

$$(4) \begin{cases} q_1 = k_{10} v_1 + k_{12} (v_1 - v_2), \\ q_2 = k_{20} v_2 + k_{12} (v_2 - v_1), \\ 0 = k_{10} v_1 + k_{20} v_2. \end{cases}$$

Daraus folgt mit  $q_1 = -q_2$  und nach Einsetzen der dritten in die erste Gleichung (4) nach einigen Umformungen:

$$(5) \quad \frac{q_1}{v_1 - v_2} = C = k_{12} + \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}},$$

die sogenannte Betriebskapazität des Zweiplattenkondensators. Verbindet man, was häufig geschieht, das System 1 oder 2 mit dem Gehäuse, so erhält man:

$$(6) \quad C = k_{12} + k_{20} \quad \text{oder} \quad C = k_{12} + k_{10}.$$

## 2. Die Dielektrizitätskonstante

Die Größe der Kapazität eines Kondensators hängt einmal von den Abmessungen der Leiter und ferner von ihrem Abstand voneinander ab. Außerdem spielt aber das Medium, das sich zwischen den elektrisch geladenen Flächen des Kondensators befindet, das Dielektrikum, eine wichtige Rolle. Bisher war die Voraussetzung gemacht worden, daß sich alle Leiter im leeren Raum, im Vakuum befanden. In jedem anderen Medium hat die Kapazität einen anderen Wert. Die Zahl, die angibt, um wieviel die Kapazität in dem betreffenden Medium anders als im Vakuum ist, nennt man die Dielektrizitätskonstante des Mediums. Für den leeren Raum ist ihr Wert gleich 1 gesetzt, ein Wert, der nahezu auch noch für Luft unter Atmosphärendruck gilt, deren Dielektrizitätskonstante gleich 1,0006 ist. Für eine Reihe wichtiger Stoffe ist die Dielektrizitätskonstante in Tabelle 1 angegeben.

## 3. Berechnung von Kondensatoren

Für eine Reihe von Kondensatorformen läßt sich die Kapazität berechnen. Von den folgenden Formeln zur Berechnung von Kondensatoren ist nur diejenige für den Kugelkondensator streng gültig, d. h. die Kapazität zweier konzentrischer Kugeln gegeneinander, falls die äußere der beiden Kugeln geerdet ist. Nur in diesem Falle verlaufen sämtliche Kraftlinien auf direktem Wege von der einen Kugel fläche zur anderen. Streng realisierbar ist aber selbst dieser Fall nicht, da die äußere Kugel notwendigerweise eine Öffnung aufweisen muß, um die Spannungszuführung zur inneren Kugel hindurchzulassen. Den Zylinderkondensator und den Plattenkondensator kann man sich aus einem sehr großen Kugelkondensator durch entsprechende Aus-

1\*

## Dielektrizitätskonstanten und dielektrische Verlustfaktoren bei Raumtemperaturen

Stoff	Dielektrizitätskonstante		Verlustfaktor in 10 <sup>-4</sup>		
	Niederfrequenz	Hochfrequenz	50 Hz	~ 1000 Hz	Hochfrequenz
Aminoplast K . . . . .		4,5			200
Bakelit . . . . .	4,8—5,3			125—300	180—270
Balata . . . . .	2,9—3,4			48—50	
„ stark entharzt . . . . .	3,1			26	
Bernstein . . . . .	2,8—2,9				50
Cellon . . . . .	7,0			700	500—600
Celluloid . . . . .	3,5—18,6			260—330	500
Cellulose . . . . .	6,6				
Natroncellulosepapier . . . . .		1,3			150—190
Sulfitcellulosepapier . . . . .		1,2			145—170
Ceresin . . . . .	2,1—2,3			0,3	
Ebonit (Hartgummi) . . . . .	2,3—3,5			25—270	60—80
Eis . . . . .	94				
Flußspat . . . . .	6,8				
Glimmer . . . . .	5—8		3—15	2—10	1,6—1,7
Glas: . . . . .	5—9			90—240	4—130
Bleiglas . . . . .	7				5—11
Kronglas . . . . .				180	220
Geräteglas . . . . .	7				50—75
Minoglas . . . . .	8			10—16	5—7
Tempaxglas . . . . .	7				28
Thüringer Glas . . . . .	7				34—48
Guttapercha . . . . .	2,5—3,2			190—240	360
Harz . . . . .	2,6				
Kalkspat    . . . . .	7,6				
„ ⊥ . . . . .	8,5				
Kautschuk . . . . .	1,7—2,8			50—270	
„ vulkanisiert . . . . .	2,7—2,9			20	250—600
Keramische Stoffe:					
Porzellan . . . . .	4,4—6,8		500		
„ unglasiert . . . . .	5,8			110—140	135
Hartporzellan . . . . .	5,8				48—85
„ Melalith . . . . .	5—6,5				70—120
Calan . . . . .	6,5				3,6—4,7
Calan spezial . . . . .	6,5				2,1—2,2
Calit . . . . .	6,5				13—15
Calit spezial . . . . .	6,5				5—6
Diacond . . . . .		16		10	1
Ergan . . . . .		4,5		getrocknet	2—5
				imprägniert	8—12
Frequenta . . . . .		6	10—15	10	2—5
Frequenta D . . . . .		6			2—4
Frequentit . . . . .		6			6—10
Kerafar R . . . . .	88	80		300	5—15
Kerafar S . . . . .	80	70		300	5—20
Kerafar T . . . . .		45		5—10	5—20
Kerafar U . . . . .		60		5—10	5—20

Stoff	Dielektrizitätskonstante		Verlustfaktor in $10^{-4}$		
	Niederfrequenz	Hochfrequenz	50 Hz	~ 1000 Hz	Hochfrequenz
Kerafar V .....		19			10—15
Sipa .....		5			40—70
Steatit .....		6,5			15—20
Marmor .....	8,3			1000	60
Mikanit .....	4,5—6				240
Mycalex .....		8,5			18
Paraffin .....	1,7—2,3			0,8	3—9
Papier trocken .....	1,8—2,6			40—700	
„ paraffiniert .....				30—100	480
Hartpapier .....		4,5—6			280—290
Pertinax .....	4,8	5,4		250	230—990
Preßspan .....		3,4			265
Phenoplast .....		5,5—9			200—700
Quarkristall    .....	4,7	4,7		} 1,6—1,8	1,6—1,8
„ ⊥ .....	4,6				
Quarzglas .....	3,7—4,2	4,2			1—3
Quarzgut .....	3,5—3,8				7—27
Schiefer .....	6,6—7,4			3400	2500
Schellack .....	2,7—3,7				65—110
Schwefel .....	2,9—4,6				
Seide .....	4,6—4,9				
Selen .....	6,1				
Steinsalz .....	5,8				
Trolit .....	5,9	6,2		350	265—290
Trolitul .....		2,1		1—2	1—5
Triacetat .....				140	250—300

## Dielektrizitätskonstanten von Flüssigkeiten und Gasen

Aceton .....	21	Luft .....	1,000 580
Amylalkohol .....	16	Kohlendioxyd .....	1,000 989
Benzol .....	2,3	Helium .....	1,000 074
Kohlendioxyd .....	1,4	Wasserstoff .....	1,000 282
Tetrachlorkohlenstoff ..	2,3	Stickstoff .....	1,000 606
Paraffinöl .....	2,0—2,5	Sauerstoff .....	1,000 547
Petroleum .....	2,0—2,2		
Toluol .....	2,3		
Wasser .....	81		

schnitte entstanden denken. In diesen beiden Fällen treten aber an den Begrenzungslinien Kraftlinienstreuungen auf, die eine Korrektur bedingen. Angenähert gilt für die Teilkapazität  $k_{12}$  für alle drei Kondensatoren die Beziehung:

$$(7) \quad k_{12} = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \pi a}$$

( $\varepsilon$  = Dielektrizitätskonstante,  $F$  = Plattenoberfläche,  $a$  = Plattenabstand). Sind  $r_1$  und  $r_2$  der innere und der äußere Radius beim Kugel- bzw. Zylinderkondensator, so gilt Formel (7) solange für viele Zwecke mit hinreichender Genauigkeit, als  $r_2 - r_1 \ll \frac{1}{2}(r_1 + r_2)$  ist.

Sind diese Voraussetzungen nicht mehr zutreffend, so sind die im folgenden aufgeführten Formeln zur Kapazitätsberechnung zu benutzen, wobei auch einige Spezialfälle berücksichtigt sind. Alle Abmessungen sind in die Formeln in cm einzusetzen, sie gelten außerdem für die Dielektrizitätskonstante 1, für andere Dielektrizitätskonstanten

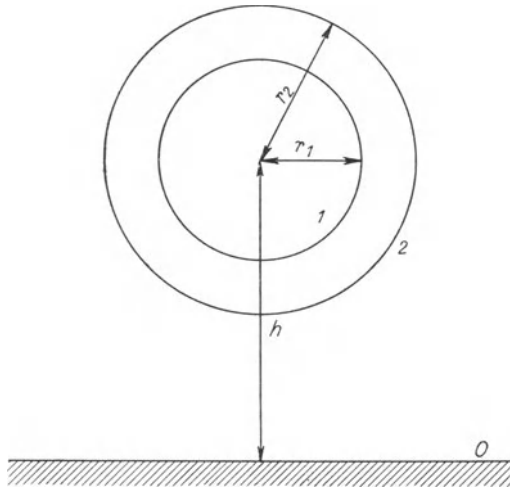


Abb. 2

sind die Formeln mit ihrem Werte  $\varepsilon$  zu multiplizieren. Die Kapazitäten ergeben sich in elektrostatischen Einheiten, d. h. in cm. Über die Umrechnung in andere Einheiten der Kapazität siehe Abschnitt 6 dieses Kapitels.

a) Kugelkondensator (Abb. 2):

$$(8) \quad k_{12} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1}, \quad k_{20} = r_2 \left( 1 + \frac{r_2}{2h} \right),$$

$h$  ist der Abstand des Kugelmittelpunktes von der leitenden Fläche, im Grenzfall ergibt sich  $k_{20} = r_2$ . Ist die äußere Kugel geerdet, so ist  $C = k_{12}$ .

Kapazität zweier Kugeln gegeneinander (Kugelfunkenstrecke), Radien der Kugeln gleich groß, Mittelpunktsabstand  $a$ :

$$(9) \quad k_{12} = \frac{r}{2} \left( 1 + \frac{r(a^2 - r^2)}{a(a^2 - ar - r^2)} \right).$$

b) Zylinderkondensator der Länge  $l$  (Abb. 3):

$$(10) \quad k_{12} = \frac{l}{2 \ln r_2/r_1}.$$

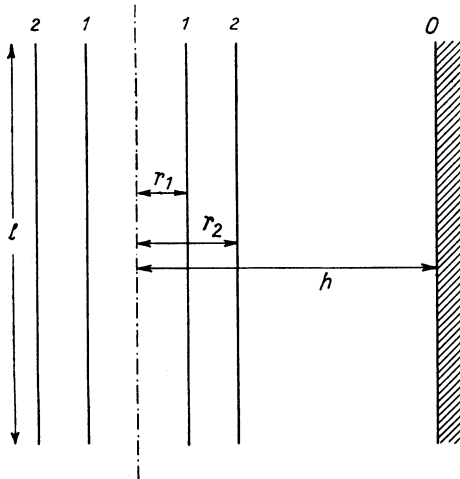


Abb. 3

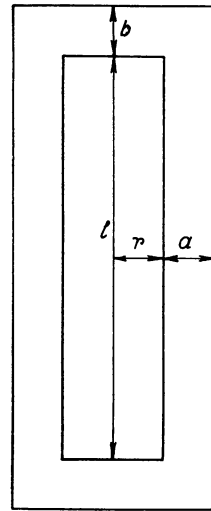


Abb. 4

Verläuft die Zylinderachse senkrecht zur leitenden Ebene im Abstand  $h$ , so gilt:

$$(10a) \quad k_{20} = \frac{l}{2 \ln 2l/r_2},$$

verläuft die Zylinderachse parallel zur leitenden Ebene, gilt:

$$(10b) \quad k_{20} = \frac{l}{2 \ln 2h/r_2}.$$

Ist der äußere Mantel geerdet, so ist  $C = k_{12}$ . Die Formeln sind nur dann hinreichend genau, wenn  $r_1$  und  $r_2 \ll l$  sind.



Kapazität eines Zylinderkondensators, der durch Endflächen abgeschlossen ist (Abb. 4):

$$(11) \quad k_{12} = \frac{l + \delta l}{2 \ln \left( 1 + \frac{a}{r} \right)},$$

$$(11a) \quad \delta l = \delta_x + \delta_y \cdot \frac{a}{b},$$

$$(11b) \quad \delta_x = \frac{2}{\pi} \left[ 2b \operatorname{arctg} \frac{a}{b} - a \ln \frac{4a^2}{a^2 + b^2} \right],$$

$$(11c) \quad \delta_y = \frac{2}{\pi} \left[ 2a \operatorname{arctg} \frac{b}{a} - b \ln \frac{4b^2}{a^2 + b^2} \right],$$

$$a \ll r, \quad b \ll r.$$

c) Zweiplattenkondensator (Abb. 5), beide Platten gleich groß und kreisförmig ( $r$  = Radius der Platten,  $a$  = Abstand der inneren Belegungen,  $d$  = Plattendicke, letztere häufig zu vernachlässigen):

$$(12a) \quad k_{12} = \frac{r^2}{4a} + \frac{r}{4\pi} \left( \ln \frac{16\pi r(a+d)}{a^2} + \frac{d}{a} \ln \frac{a+d}{d} - 3 \right),$$

$$(12b) \quad k_{10} = k_{20} = \frac{r}{\pi},$$

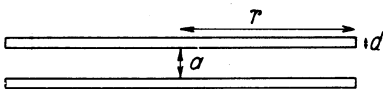


Abb. 5

falls sich die Platten in großer Entfernung von Erde oder anderen Leitern befinden. Ist eine Platte geerdet, so ist die Gesamtkapazität des Plattenkondensators

$$C = k_{12} + k_{20} \quad \text{bzw.} \quad C = k_{12} + k_{10},$$

und wenn man die beiden ersten Ausdrücke in der Klammer, Gleichung (12a), mit  $\alpha$  bezeichnet, ergibt sich:

$$(13a) \quad C = \frac{r^2}{4a} + \frac{r}{4\pi} (\alpha + 1).$$

Sind beide Platten nicht geerdet, so gilt

$$C = k_{12} + \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}},$$

d. h. da

$$(13b) \quad \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}} = \frac{r}{2\pi},$$

$$C = \frac{r^2}{4a} + \frac{r}{4\pi} (\alpha - 1).$$

d) Dreiplattenkondensator. Dreiplattenkondensator, die beiden äußeren Platten verbunden und geerdet, das Dielektrikum muß

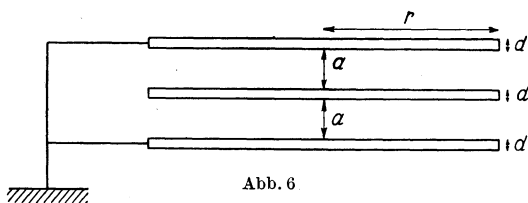


Abb. 6

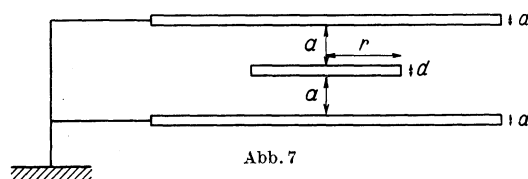


Abb. 7

die Plattenränder überragen. Platten kreisförmig und gleich groß, die mittlere Platte gleich weit von den beiden äußeren entfernt (Abb. 6):

$$(14) \quad C = \frac{r^2}{2a} + 1,1078 \frac{r}{\pi} + \frac{2r}{3\pi} \left\{ \left( 1 + \frac{2d}{a} \right) \ln \left( 1 + \frac{2d}{a} \right) - \frac{2d}{a} \ln \frac{2d}{a} \right\}.$$

Dreiplattenkondensator, die beiden äußeren Platten geerdet, die innere Platte gleich weit von den beiden äußeren entfernt und wesentlich kleiner als die beiden äußeren, die Plattenmittelpunkte übereinander liegend (Abb. 7):

$$(15) \quad C = \frac{r^2}{2a} + \frac{2r}{\pi} \ln 2 + \frac{2r}{\pi} \left\{ \left( 1 + \frac{d}{4a} \right) \ln \left( 1 + \frac{d}{4a} \right) - \frac{d}{4a} \ln \frac{d}{4a} \right\}.$$

e) Schutzringkondensator (Abb. 8). Der Schutzringplattenkondensator besteht aus einer ebenen Kondensatorplatte 1, der gegen-

über im Abstand  $a$  sich eine wesentlich kleinere kreisförmige ebene Platte 2 befindet. Letztere ist, durch einen schmalen Luftspalt getrennt, von einer kreisringförmigen Platte 0 umgeben. Die Platten 2 und 0 werden auf gleiches Potential aufgeladen. Dann gilt für die Kapazität  $k_{12}$  zwischen den Platten 1 und 2:

$$(16) \quad k_{12} = \frac{(r + r')^2}{16a} - \frac{r + r'}{2\pi} (x \cdot \operatorname{tang} x + \ln \cos x),$$

$$x = \operatorname{arctg} \frac{r' - r}{2a}.$$

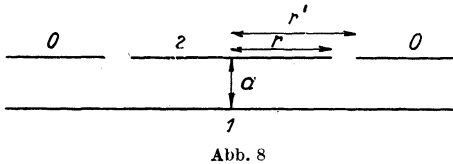


Abb. 8

Die Randstreuungen sind bei diesem Kondensator an den Außenrand von 0 verlegt. Das zweite Glied von Gleichung (16) ist bei sehr schmalen Spalt zwischen 2 und 0 vernachlässigbar.

Abgesehen vom Plattenkondensator lassen sich auch Zylinderkondensatoren mit einem Schutzring versehen (vgl. auch II, 2).

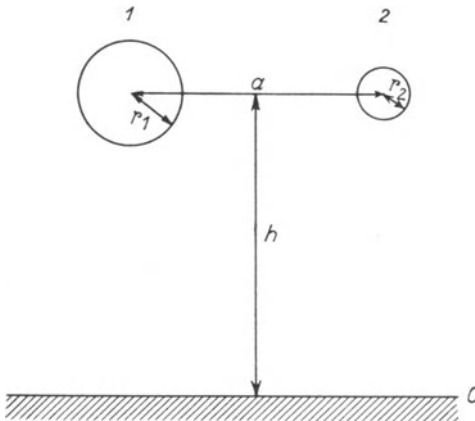


Abb. 9

f) Doppelleitung (Abb. 9). Eine am Ende offene Doppelleitung verhält sich angenähert wie ein Kondensator der Kapazität

$$C \cdot l$$

( $C$  = Kapazität pro Längeneinheit der Doppelleitung). Eine solche Doppelleitung besitzt aber außerdem stets eine Selbstinduktion  $L$  und einen Widerstand  $R$ . Der Scheinwiderstand (vgl. Abschnitt 4) der offenen Doppelleitung setzt sich aus diesen drei Größen zusammen zu

$$(17) \quad \mathfrak{Z} = C \cdot l + \frac{1}{3} L \cdot l + \frac{1}{3} R \cdot l.$$

Eine am Ende kurzgeschlossene Doppelleitung verhält sich angenähert wie eine Selbstinduktion. Ihr Scheinwiderstand ergibt sich zu

$$(18) \quad \mathfrak{Z} = L \cdot l + R \cdot l + \frac{1}{3} C \cdot l.$$

Die Größe  $C$  der Gleichungen (17) und (18) errechnet sich wie folgt. Sind der Abstand der beiden Drahtzentren  $a$  und die Radien der Drähte  $r_1$  und  $r_2$ , so gilt:

$$(19) \quad k_{12} = \frac{l}{2 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}},$$

wo

$$(19a) \quad \lambda_1 = -\frac{1}{2} \frac{p}{r_1} + \sqrt{1 + \frac{1}{4} \frac{p^2}{r_1^2}}, \quad \lambda_2 = \frac{1}{2} \frac{p}{r_2} + \sqrt{1 + \frac{1}{4} \frac{p^2}{r_2^2}}$$

und

$$(19b) \quad p^2 = \frac{(a + r_1 + r_2)(a + r_1 - r_2)(a - r_1 + r_2)(a - r_1 - r_2)}{a^2}.$$

Spezialfälle: Beide Radien gleich groß:  $r_1 = r_2$ :

$$(20) \quad k_{12} = \frac{l}{4 \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - 4r^2}}{2r}}.$$

Da dieser Fall in der Praxis sehr häufig gebraucht wird, sind in Abb. 10 die Kapazitäten von 1 m Doppelleitung als Funktion von  $a/r$  dargestellt. Für die Teilkapazitäten  $k_{10}$  bzw.  $k_{20}$  einer Doppelleitung gegen eine leitende Ebene im Abstand  $h$  ergibt sich

$$(21) \quad k_{10} = \frac{l}{2 \ln \frac{4h^2}{r_1 a}} \quad \text{bzw.} \quad k_{20} = \frac{l}{2 \ln \frac{4h^2}{r_2 a}}.$$

Sind die Radien der beiden Leiter klein gegen ihren Abstand, so erhält man:

$$(22) \quad k_{12} = \frac{l}{2 \ln \frac{a^2}{r_1 \cdot r_2}},$$

und falls  $r_1 = r_2$ :

$$(22a) \quad k_{12} = \frac{l}{2 \ln \frac{a}{r}}.$$

Kapazität eines einzelnen Leiters gegen eine Ebene im Abstand  $h$  von seiner Mittellinie:

$$(23) \quad C = \frac{l}{2 \ln \frac{h + \sqrt{h^2 - r^2}}{r}},$$

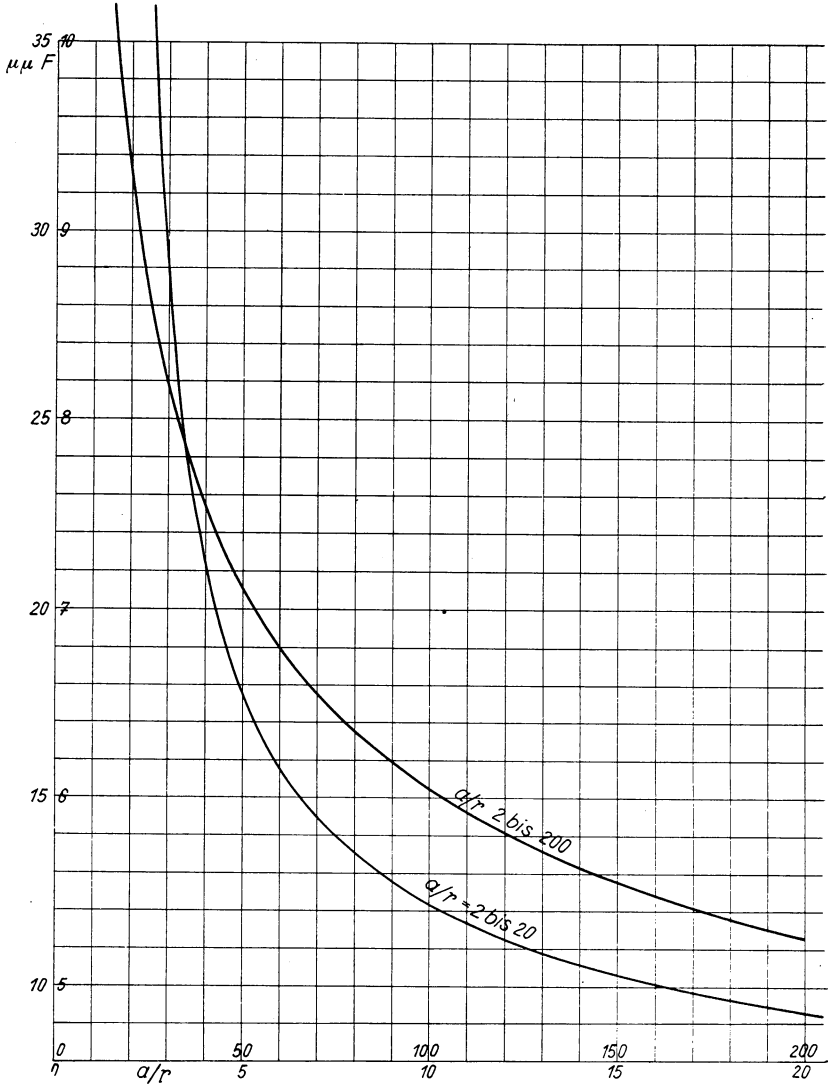


Abb. 10. Kapazität  $k_{1,2}$  einer 1 m langen Doppelleitung mit den Drahradien  $r$  und dem Drahtachsenabstand  $a$  in  $\mu\mu F$ . Die Zahlen außerhalb des Koordinatennetzes gehören zu der Kurve  $a/v = 2$  bis 20.

und wenn  $r$  klein gegen den Abstand von der Ebene ist:

$$(24) \quad C = \frac{l}{2 \ln \frac{2h}{r}}$$

g) Kapazität eines symmetrischen Drehstromkabels (Abb. 11), d. h. drei Leiter in gleichem Abstand voneinander und in gleichem Abstand von der leitenden Hülle:

$$k_{10} = k_{20} = k_{30} \quad \text{und} \quad k_{12} = k_{13} = k_{23}:$$

$$(25 a) \quad k_{10} = \frac{l}{2 \ln \frac{R^6 - d^6}{3 R^3 d^2 r}}$$

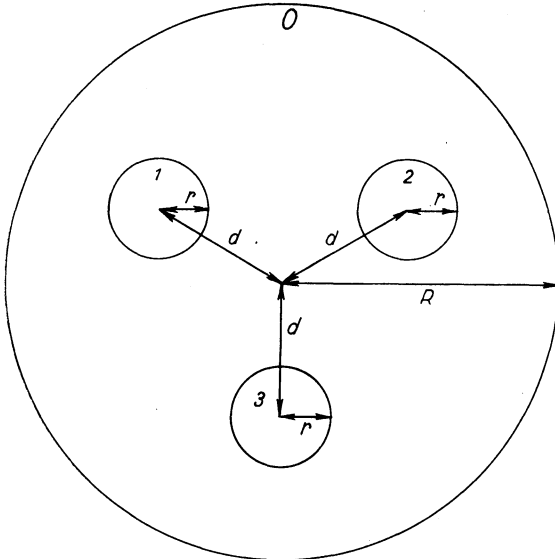


Abb. 11

Gesamtkapazität eines Leiters:

$$(25 b) \quad C = k_{10} + 3k_{12} = \frac{l}{2} \frac{1}{\ln \frac{R^2 - d^2}{r \sqrt{R^4 + R^2 d^2 + d^4}}}$$

( $R$  = Radius der Hülle,  $r$  = Radius der Leiter,  $d$  = Abstand der Leitermittelpunkte vom Mittelpunkt der Hülle).

#### 4. Die Kapazität in Wechselstromkreisen

Jeder Wechselstromkreis setzt sich zusammen aus Reihenschaltungen von Ohmschem Widerstand  $R$ , Selbstinduktion  $L$  und Kapazität  $C$  (Abb. 12). Legt man an eine solche Schaltung eine Wechselspannung an, so besteht zwischen der angelegten Spannung, dem in diesem Kreis fließenden Strom und dem Ohmschen, induktiven und kapazitiven Widerstand das folgende Gesetz:

$$(26) \quad e = i \cdot R + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt.$$

Unter der Voraussetzung rein sinusförmiger Spannungen und Ströme,  $e = e_m \sin \omega t$  und  $i = i_m \sin \omega t$  ( $e$  und  $i$  die Augenblickswerte,  $e_m$  und

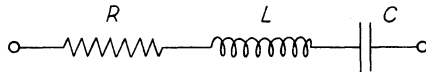


Abb. 12

$i_m$  die Maximalwerte von Spannung und Strom,  $\omega = 2\pi f =$  Kreisfrequenz,  $f =$  Zahl der vollen Schwingungen pro sec), geht diese Gleichung über in:

$$(27) \quad e = e_m \sin \omega t = R i_m \sin \omega t + \omega L i_m \cos \omega t - \frac{1}{\omega C} i_m \cos \omega t,$$

$$(28) \quad = R i_m \sin \omega t + \omega L i_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{\omega C} i_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Aus der letzten Gleichung läßt sich folgendes ablesen: An einem rein Ohmschen Widerstand sind Strom und Spannung in Phase, d. h. sie durchlaufen gleichzeitig ihr Maximum und gehen zur selben Zeit durch Null, kehren zur gleichen Zeit ihr Vorzeichen um usw. An einer reinen Selbstinduktion eilt die Spannung dem Strom um eine viertel Periode bzw. in der Darstellung am Einheitskreis um  $90^\circ$  vor, an einer reinen Kapazität eilt die Spannung dem Strom um den gleichen Betrag nach. Zur Berechnung von Wechselstromkreisen bedient man sich mit besonderem Vorteil der vektoriellen Darstellung und der Rechnung mit komplexen Größen. Das Voreilen eines Vektors gegen einen anderen, in diesem Falle der Spannung gegen den Strom um  $90^\circ$ , wird durch Multiplikation mit  $+j$ , das Nacheilen um den gleichen Betrag

durch Multiplikation mit  $-j$  dargestellt, wobei  $j = \sqrt{-1}$ ,  $j^2 = -1$  ist. Führt man diese Größe  $j$  ein, so erhält die Gleichung (28) die Form:

$$(29) \quad \left\{ \begin{aligned} \mathfrak{E} &= \mathfrak{Z} R + \mathfrak{Z} j \omega L - \mathfrak{Z} j \frac{1}{\omega C} \\ &= \mathfrak{Z} \left[ R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] \\ &= \mathfrak{Z} (R + j B) = \mathfrak{Z} \cdot \mathfrak{B}. \end{aligned} \right.$$

Die Größe  $\mathfrak{Z}$  nennt man den Widerstandsoperator, auch Scheinwiderstand oder Impedanz, der reelle Teil der Gleichung heißt Wirkwiderstand, der mit der imaginären Größe  $j$  multiplizierte Teil heißt Blindwiderstand. Die Form der Gleichung (29) zeigt zugleich, daß zwischen Strom und Spannung bei Wechselstrom die gleiche Beziehung besteht, wie sie durch das Ohmsche Gesetz für Gleichstrom gegeben ist, wenn man den Gleichstromwiderstand des Ohmschen Gesetzes durch den Widerstandsoperator ersetzt. Man nennt diese Gleichung auch das allgemeine Ohmsche Gesetz. Einige weitere Beziehungen lassen sich leicht aus der vektoriellen Darstellung der Gleichung (29) ablesen. Hierbei werden die reellen Größen in Richtung der reellen  $x$ -Achse eines rechtwinkligen Koordinatensystems, die imaginären Größen in Richtung der imaginären  $y$ -Achse aufgetragen (vgl. Abb. 13). Der sich durch das Zusammenwirken von  $R$ ,  $C$  und  $L$  ergebende Phasenwinkel  $\varphi$  ist dann einfach

$$\text{tang } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

und der Betrag (oder auch Modul) von  $\mathfrak{Z}$  ergibt sich zu

$$(30) \quad Z = \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Stellen wir schließlich noch fest, daß auch die Kirchhoffschen Gesetze in Wechselstromkreisen ihre Gültigkeit behalten, wenn man nur die

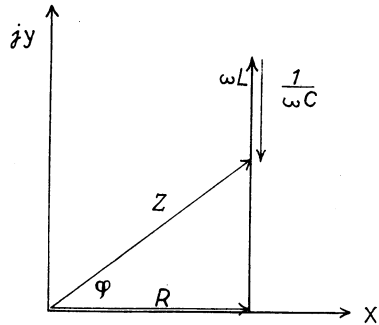


Abb. 13



dort auftretenden Widerstände durch die Operatoren ersetzt, so stehen praktisch alle Hilfsmittel zur Verfügung, die zur Berechnung von Wechselstromkreisen nötig sind. Aus diesen beiden Kirchhoffschen Gesetzen, daß die Summe der an einem Verzweigungspunkt zu- und abfließenden Ströme Null ist ( $\Sigma \mathfrak{I} = 0$ ), und daß in einem geschlossenen Stromkreis die Summe der Produkte aus Stromstärke und Widerstand gleich der Summe der in dem Stromkreis erzeugten Spannungen ist ( $\Sigma \mathfrak{I} \mathfrak{Z} = \Sigma \mathfrak{E}$ ), ergibt sich für in Reihe geschaltete Widerstandsoperatoren die Beziehung

$$\mathfrak{Z}_n = \Sigma \mathfrak{Z}, \quad \text{also} \quad \mathfrak{Z}_n = \mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{Z}_3 + \dots$$

und für parallel geschaltete Operatoren

$$\frac{1}{\mathfrak{Z}_n} = \Sigma \frac{1}{\mathfrak{Z}}, \quad \text{also} \quad \frac{1}{\mathfrak{Z}_n} = \frac{1}{\mathfrak{Z}_1} + \frac{1}{\mathfrak{Z}_2} + \frac{1}{\mathfrak{Z}_3} + \dots$$

Für die reine Parallelschaltung von Kapazitäten folgt daraus:

$$(31) \quad C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

und für die Reihenschaltung von Kapazitäten:

$$(32) \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

Zum Schluß sei noch darauf hingewiesen, daß für das Rechnen mit imaginären Größen, soweit es für die Berechnung von Wechselstromschaltungen in Frage kommt, die gleichen Rechenregeln gelten wie sonst auch, mit der Abweichung, daß in Gleichungen mit reellen und imaginären Größen reelle und imaginäre Größen für sich gleich gesetzt werden können, daß man also stets zwei Bestimmungsgleichungen erhält, die beide gleichzeitig erfüllt sein müssen. Auf die Wechselstromtechnik übertragen heißt das nur, daß zwei Ströme nur dann wirklich gleich sind, wenn sie nicht nur gleiche Größe, sondern auch gleiche Phase haben.

Bei der Berechnung von Wechselstromkreisen treten häufig Kombinationen von Wechselstromwiderständen auf, die sich in Form eines Dreiecks zusammenfügen, oder auch solche, die sternförmig zu einem Punkt zusammenlaufen, zum Teil lassen sich verwickelte Schaltungen auch auf solche Formen vereinfachen. Oft ist aber die Berechnung dann in der einen Form sehr viel bequemer oder überhaupt nur mit einfachen Mitteln durchführbar. Hier hilft ein von A. E. Kennelly bewiesener Satz, der besagt, daß jede Dreieckschaltung durch eine in bezug auf den äußeren Stromkreis äquivalente Sternschaltung ersetzt werden

kann, und umgekehrt. Die Transformation der Dreieckschaltung nach Abb. 14 in eine äquivalente Sternschaltung nach Abb. 15 erfolgt nach folgenden Formeln:

$$(33) \quad \left\{ \begin{aligned} \mathfrak{z}_1 &= \frac{\mathfrak{z}_b \mathfrak{z}_c}{\mathfrak{z}_a + \mathfrak{z}_b + \mathfrak{z}_c}, \\ \mathfrak{z}_2 &= \frac{\mathfrak{z}_c \mathfrak{z}_a}{\mathfrak{z}_a + \mathfrak{z}_b + \mathfrak{z}_c}, \\ \mathfrak{z}_3 &= \frac{\mathfrak{z}_a \mathfrak{z}_b}{\mathfrak{z}_a + \mathfrak{z}_b + \mathfrak{z}_c}. \end{aligned} \right.$$

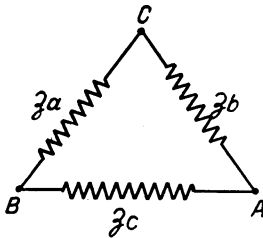


Abb. 14

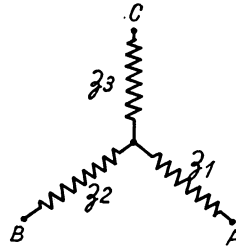


Abb. 15

Umgekehrt erfolgt die Transformation der Sternschaltung in die Dreieckschaltung durch folgende Beziehungen:

$$(34) \quad \left\{ \begin{aligned} \mathfrak{z}_a &= \frac{\mathfrak{z}_1 \mathfrak{z}_2 + \mathfrak{z}_1 \mathfrak{z}_3 + \mathfrak{z}_2 \mathfrak{z}_3}{\mathfrak{z}_1}, \\ \mathfrak{z}_b &= \frac{\mathfrak{z}_1 \mathfrak{z}_2 + \mathfrak{z}_1 \mathfrak{z}_3 + \mathfrak{z}_2 \mathfrak{z}_3}{\mathfrak{z}_2}, \\ \mathfrak{z}_c &= \frac{\mathfrak{z}_1 \mathfrak{z}_2 + \mathfrak{z}_1 \mathfrak{z}_3 + \mathfrak{z}_2 \mathfrak{z}_3}{\mathfrak{z}_3}. \end{aligned} \right.$$

### 5. Verluste im Kondensator

Verluste im Dielektrikum eines Kondensators entstehen einmal dadurch, daß das Dielektrikum kein vollkommener Isolator ist, sondern ein geringes Leitvermögen besitzt. Das kann aber nicht die einzige Ursache sein, denn die Verluste sind häufig keine Materialkonstante, sondern hängen außer von der Temperatur von der angelegten Spannung, der Dicke des Dielektrikums und der Frequenz ab. Außerdem sind sie meist wesentlich größer, als es der Leitfähigkeit des Materials ent-

sprechen würde. Über die wahre Ursache der dielektrischen Verluste sind eindeutige Kenntnisse noch nicht vorhanden. Versuche zu ihrer Deutung sind zuerst von Maxwell, später von K. W. Wagner und auf moderner physikalischer Grundlage von Debye gemacht worden, ohne daß jedoch eine der Theorien alle Phänomene restlos zu klären imstande ist. Es sollen daher nur die Erscheinungen kurz erwähnt werden, die für die Meßtechnik von Bedeutung sind.

Wird an einen verlustbehafteten Kondensator Gleichspannung angelegt, so entsteht zunächst ein kurz andauernder starker Ladestrom,

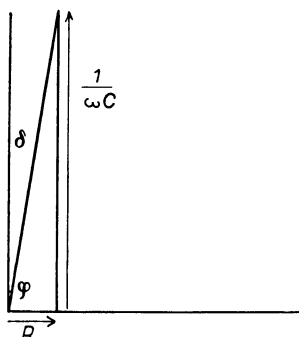


Abb. 16

auf den ein stetig abnehmender, länger andauernder Strom folgt, der sogenannte Nachladestrom. Umgekehrt ist es bei der Entladung des Kondensators: zunächst entsteht ein starker Entladestromstoß, dem ein langsam abnehmender Strom folgt. Man nimmt an, daß ein Teil der Elektrizitätsmenge in das Dielektrikum eindringt, dort in irgendeiner Form gespeichert wird, und von da aus nach Entladung der Belegungen wieder zurückfließen kann. Man nennt das auch Rückstandsbildung. Diese Erscheinung bringt

es mit sich, daß Kapazitätsmessungen mit Gleichstrom an verlustbehafteten Kondensatoren nur unter ganz besonderen Vorsichtsmaßnahmen zu einigermaßen einwandfreien Resultaten führen.

Bei Anlegen von Wechselspannung an einen idealen Kondensator eilt der Strom der Spannung genau um den Phasenwinkel  $\varphi = 90^\circ$  vorauf. Dieser Idealzustand wird aber nur bei sehr sorgfältig gebauten Luftkondensatoren erreicht; sind Verluste vorhanden, so ist diese Phasenverschiebung geringer. Der Betrag, um den der Phasenwinkel kleiner als  $90^\circ$  ist, nennt man seinen Verlustwinkel  $\delta$ , es gilt also

$$(35) \quad \begin{aligned} 90 - \varphi &= \delta, \\ \text{tang } \delta &= \text{tang } (90 - \varphi) = \text{cotg } \varphi. \end{aligned}$$

Während  $\text{tang } \varphi$  das Verhältnis von Blindwiderstand zu Wirkwiderstand ist, ergibt sich  $\text{tang } \delta$  umgekehrt als Verhältnis von Wirkwiderstand zu Blindwiderstand (vgl. Abb. 16). Die Größe  $\text{tang } \delta$  nennt man Verlustfaktor.

Ein mit Verlusten behafteter Kondensator läßt sich ersetzen durch einen verlustfreien Kondensator, dem ein Ohmscher Widerstand vor-

oder parallelgeschaltet ist. Es ist das allerdings nur ein reines, immer nur für eine bestimmte Frequenz gültiges Rechenverfahren, da man zumeist nicht von vornherein sagen kann, welcher Ersatz den tatsächlichen Verhältnissen am besten entspricht. Bei Verlusten infolge von Leitfähigkeit kommt ein Ersatz durch Parallelwiderstand in Frage, bei Verlusten infolge von Widerstand der Zuleitungen, der Kontakte usw. ein Ersatz durch Vorwiderstand. Oft, treten beide Erscheinungen gleichzeitig auf. Bei Ersatz durch Vorwiderstand ergibt sich:

$$(36) \quad \text{tang } \delta = \omega \cdot c \cdot r,$$

bei Ersatz durch Parallelwiderstand

$$(37) \quad \text{tang } \delta = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R}.$$

Das Produkt  $C \cdot R$  heißt die Zeitkonstante eines Kondensators,  $1/R$  seine Ableitung  $G$ .  $G$  ergibt sich aus den gemessenen Größen  $C$ ,  $\omega$  und  $\text{tang } \delta$  zu

$$(38) \quad G = \omega \cdot C \cdot \text{tang } \delta.$$

Die im Kondensator in Wärme umgesetzte Wirkleistung beträgt

$$(39) \quad N = E \cdot I \cdot \cos \varphi,$$

wenn  $E$  und  $I$  Strom und Spannung am Kondensator sind, oder, mit  $\varphi = 90 - \delta$ ,  $N = E \cdot I \cdot \sin \delta$ , und da für kleine Winkel  $\sin \delta \sim \text{tang } \delta$

$$(40) \quad N \sim E \cdot I \cdot \text{tang } \delta.$$

Die Erfahrung hat gelehrt, daß die Verluste eines Werkstoffs um so größer sind, je inhomogener der Werkstoff ist, wobei unter Inhomogenität insbesondere das Vorhandensein von Schichten verschiedener Leitfähigkeit zu verstehen ist. Dieses Verhalten ist um so ausgeprägter, je niedriger die Meßfrequenz ist. Ist das Dielektrikum oder seine Oberfläche leitfähig, so sinkt der Verlustfaktor mit zunehmender Frequenz, die Ableitung bleibt dabei konstant. Bei Vorwiderstand wird der Verlustfaktor mit zunehmender Frequenz größer. Bei reinen dielektrischen Verlusten ist der Verlustfaktor frequenzunabhängig. Häufig treten jedoch alle Erscheinungen gleichzeitig auf und geben dann kein einheitliches Bild. In Tabelle 1 sind für eine Reihe von Stoffen die Verlustfaktoren für verschiedene Frequenzen angegeben.

Der Verlust eines Kondensators bedingt zugleich eine scheinbare Abhängigkeit der Kapazität und damit auch der Dielektrizitäts-

konstanten des Dielektrikums von der Frequenz, und zwar wird die Kapazität zumeist mit zunehmender Frequenz kleiner. Bei reinem Vorwiderstand ist die Kapazität frequenzunabhängig, bei Parallelwiderstand hingegen ergibt sich

$$(41) \quad C_{\omega} = C (1 + \tan^2 \delta),$$

wobei  $C$  die Kapazität bei sehr hohen Frequenzen bedeutet, auch geometrische Kapazität genannt. Solange die Verluste klein sind, ist der Unterschied zwischen  $C_{\omega}$  und  $C$  vernachlässigbar, bei manchen Werkstoffen erreicht er aber nennenswerte Beträge. Tritt eine Frequenzabhängigkeit nach Art der Gleichung (41) auf, so ist im allgemeinen auf das Vorhandensein von Leitungsverlusten zu schließen. Infolge der Beziehung (41) sind auch die in den Gleichungen (36) und (37) auftretenden Kapazitätswerte nicht identisch, es gilt vielmehr

$$(42) \quad c = C (1 + \tan^2 \delta).$$

Eine scheinbare Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators von der Frequenz kann auch dann auftreten, wenn z. B. die Zuleitungen von den Klemmen zu den Belegungen eine merkliche Selbstinduktion haben. Dann gilt

$$(43) \quad c_{\omega}^* = c (1 + \omega^2 c l) \quad \text{bzw.} \quad C_{\omega}^* = C_{\omega} (1 + \omega^2 C_{\omega} l).$$

Der Einfluß der Selbstinduktion ist besonders bei höheren Frequenzen und größeren Kapazitäten nicht mehr vernachlässigbar. Auch der Verlustfaktor erfährt hierdurch eine scheinbare Vergrößerung, die allerdings in den meisten Fällen unbedeutend sein wird.

Sind mehrere Kondensatoren  $C_1, C_2, C_3, \dots$  mit den Verlustfaktoren  $\tan \delta_1, \tan \delta_2, \tan \delta_3, \dots$  und den Ableitungen  $g_1, g_2, g_3 \dots$  parallel geschaltet, so ergibt sich der Verlustfaktor der Kombination zu

$$(44) \quad \tan \Delta = \frac{C_1 \tan \delta_1 + C_2 \tan \delta_2 + C_3 \tan \delta_3 + \dots}{C_1 + C_2 + C_3 + \dots}$$

und die Ableitung

$$(45) \quad G = g_1 + g_2 + g_3 + \dots$$

Bei Reihenschaltung ergibt sich, falls nur zwei Kondensatoren in Reihe geschaltet sind:

$$(46) \quad \tan \Delta = \frac{C_1 \tan \delta_2 + C_2 \tan \delta_1}{C_1 + C_2}$$

und

$$(47) \quad G = \frac{g_1 C_2^3 + g_2 C_1^3}{(C_1 + C_2)^2}.$$

Sind  $n$  Kondensatoren mit den Verlustfaktoren  $\text{tg } \delta_1 \dots \text{tg } \delta_n$  hintereinandergeschaltet, so gilt:

$$(48) \quad \text{tang } \Delta = \frac{\frac{\text{tang } \delta_n}{C_n} + \frac{\text{tang } \delta_{n-1}}{C_{n-1}} + \frac{\text{tang } \delta_{n-2}}{C_{n-2}} + \dots + \frac{\text{tang } \delta_1}{C_1}}{\frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_{n-1}} + \frac{1}{C_{n-2}} + \dots + \frac{1}{C_1}}$$

und

$$(49) \quad G = \frac{\frac{g_1}{C_1^3} + \frac{g_2}{C_2^3} + \frac{g_3}{C_3^3} + \dots + \frac{g_n}{C_n^3}}{\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}\right)^2}.$$

## 6. Einheiten

Die Formeln (7 bis 25) zur Berechnung von Kapazitäten ergeben die Kapazität in elektrostatischen Einheiten, d. h. in cm, wenn alle in den Formeln auftretenden Abmessungen in cm eingesetzt werden. Das hat für die Berechnung den Vorteil einfacherer Formeln. Durch das Reichsgesetz über die elektrischen Maßeinheiten vom 1. Juni 1898 sind die gesetzlichen Einheiten auf die Einheiten des elektromagnetischen Maßsystems zurückgeführt, d. h. letzten Endes auf die Einheiten für Masse, Zeit und Länge, auf das CGS-System. Danach ist die Einheit der Kapazität das Farad, das ist die Kapazität eines Kondensators, welcher durch eine Amperesekunde (1 Coulomb) auf 1 Volt aufgeladen wird. Die auf Grund des Gesetzes vom 1. Juni 1898 festgelegte Kapazitätseinheit wird auch als internationales Farad bezeichnet. Später hat sich gezeigt, daß die den elektrischen Maßeinheiten zugrunde liegenden Einheiten der Stromstärke und des Widerstands mit den absoluten CGS-Einheiten nicht völlig übereinstimmen. Steigerung der Meßgenauigkeit und neuere Meßmethoden ließen diesen Fehler erkennen. Man hat dieser Tatsache in neuester Zeit Rechnung getragen, in absehbarer Zeit — der genaue Termin steht noch nicht fest — werden die internationalen Einheiten durch die absoluten abgelöst. Es ist dann ein absolutes Farad innerhalb der

derzeitigen Meßgenauigkeit genau gleich  $10^{-9} \text{ sec}^2/\text{cm}$ . Die Kapazität, in absoluten Farad angegeben, ist, wie sich zeigte, um etwa  $0,5^{0/100}$  kleiner als in internationalen. Es gelten folgende Beziehungen:

$$\begin{aligned} 1 \text{ int. Ohm} &= 1,0005 \text{ abs. Ohm,} \\ 1 \text{ int. Henry} &= 1,0005 \text{ abs. Henry,} \\ 1 \text{ int. Farad} &= 0,9995 \text{ abs. Farad.} \end{aligned}$$

Während einer Übergangszeit werden dadurch noch gewisse Schwierigkeiten auftreten, als dann Kapazitäts- und auch sonstige Normale in Benutzung sein werden, die noch in internationalen Einheiten, und solche, die bereits in den neuen absoluten Einheiten geeicht sind. Für sehr genaue Messungen hat man also darauf zu achten.

Zwischen dem absoluten Farad und der elektrostatischen Einheit der Kapazität, dem cm, besteht die folgende Beziehung:

$$1 \text{ abs. Farad} = c^2 \cdot 10^{-9} \text{ cm} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ cm} = 10^9 \text{ Farad}/c^2,$$

wo  $c$  die Lichtgeschwindigkeit bedeutet.  $c$  ist angenähert gleich  $3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec}$ . Der genaue Wert ist  $2,9980 \cdot 10^{10} \text{ cm/sec}$ . Daraus folgt:

$$\begin{aligned} 1 \text{ abs. Farad} &= 0,8988 \cdot 10^{12} \text{ cm,} \\ 1 \text{ int. Farad} &= 0,8983_5 \cdot 10^{12} \text{ cm,} \\ 1 \text{ cm} &= 1,1126 \cdot 10^{-12} \text{ abs. Farad,} \\ &= 1,1131_5 \cdot 10^{-12} \text{ int. Farad.} \end{aligned}$$

Als Untereinheiten des Farad sind gebräuchlich:

$$\begin{aligned} 10^{-6} \text{ Farad} &= 1 \mu\text{F} \text{ (Mikrofarad)} \\ 10^{-12} \text{ Farad} &= 1 \mu\mu\text{F} \text{ (Mikromikrofarad), neuerdings auch als} \\ &1 \text{ pF (Pikrofarad) bezeichnet.} \end{aligned}$$

Daneben findet man gelegentlich noch die Bezeichnung

$$10^{-9} \text{ Farad} = 1 \text{ nF (Nanofarad)} = 1000 \mu\mu\text{F.}$$

Der Verlustfaktor  $\text{tang } \delta$  ist eine dimensionslose Zahl, er wird für kleine Werte gewöhnlich mit  $10^{-4}$  multipliziert angegeben.

Die Einheit der Ableitung ist das Siemens ( $S$ ), daneben wird noch verwendet:

$$10^{-6} \text{ Siemens} = 1 \mu S \text{ (Mikrosiemens).}$$

Formel (38) ergibt die Ableitung in Siemens bzw. Mikrosiemens, wenn die Kapazität  $C$  in Farad bzw. Mikrofarad eingesetzt ist.

## II. Kapazitätsnormale

### 1. Übersicht

Die Eichung von Kondensatoren erfolgt im allgemeinen durch Vergleich mit Kapazitätsnormalen. Man unterscheidet absolute Normale, deren Kapazitätswert aus den geometrischen Dimensionen berechenbar ist und Gebrauchsnormale, die z. B. in der Maxwell-Thomson-Anordnung in absoluten Einheiten gemessen sind. Die Normale gruppieren sich in Festkondensatoren und veränderliche Kondensatoren. Für Zwecke höchster Präzision kommen nur Luftkondensatoren in Frage, in ihren Eigenschaften stehen ihnen die Glimmerkondensatoren nur wenig nach. Die technischen Kondensatoren — Papierkondensatoren, Elektrolytkondensatoren, Luftkondensatoren geringerer Präzision u. a. — sind meist nur für untergeordnetere Zwecke brauchbar. Als Spezialkondensatoren sind insbesondere solche für Hochspannungszwecke zu erwähnen.

### 2. Absolute Kapazitätsnormale

a) Schutzringplattenkondensator. Eine wirklich strenge Berechnung der Kapazität läßt sich außer beim Kugelkondensator nur noch beim Schutzringkondensator durchführen. Die in Abb. 8 dargestellte Anordnung eines Schutzringplattenkondensators wird für genaue Meßzwecke in ein Gehäuse eingebaut, das mit dem Schutzring so verbunden wird, daß Streuungen von der einen Belegung um den Schutzring herum zur anderen Belegung unterbunden sind. Die Kapazitätsberechnung erfolgt nach Formel (16). Die Teilkapazität  $k_{12}$  ist verlustfrei, wenn das zum Aufbau benötigte Isolationsmaterial nur in den Teilkapazitäten  $k_{10}$  und  $k_{20}$  liegt (vgl. auch I, 3e).

b) Schutzringzylinderkondensator. Ähnlich wie einen Plattenkondensator kann man auch einen Zylinderkondensator als Schutzringkondensator ausbilden. Ininigem Abstand von den beiden Enden des inneren Zylinders ist dieser durch Luftspalte unterbrochen. Die abgetrennten Zylinderenden (Schutzzyylinder) werden geerdet, der



mittlere Zylinder wird auf nahezu dem gleichen Potential gehalten, wie diese Schutzzyylinder, ohne geerdet zu werden. Ist  $l$  die Länge des mittleren inneren Zylinders,  $a$  die Breite jedes Schutzringes,  $r$  der Radius des inneren und  $R$  der Radius des äußeren Zylinders, so gilt, falls  $a \ll (R - r)$  ist:

$$(50) \quad k_{12} = \frac{l + a}{2 \ln \frac{R}{r}}.$$

Der mittlere innere Zylinder erscheint beiderseits um die halbe Spaltbreite vergrößert. — Als absolutes Kapazitätsnormal käme schließlich noch der Kugelkondensator in Frage. Er ist jedoch infolge gewisser Aufbauschwierigkeiten in der Praxis nur von geringerer Bedeutung.

### 3. Gebrauchsnormale

a) Allgemeine Anforderungen. Absolute Kapazitätsnormale lassen sich nur mit verhältnismäßig geringen Kapazitätswerten bauen. Man wird daher in den meisten Fällen für Vergleichsmessungen den absolut geeichten Gebrauchsnormalen den Vorzug geben. An solche Normale müssen ganz bestimmte Anforderungen gestellt werden. 1. Ihre Kapazität muß eindeutig definiert sein. Das geschieht durch vollständige Abschätzung des Kondensators, wobei die Hülle entweder mit einem System verbunden ist oder auch beide Belegungen des Kondensators isoliert sind. 2. Die Normale müssen zeitlich unveränderlich sein, d. h. ihr Aufbau muß eine besonders hohe Stabilität aufweisen; gegebenenfalls ist vor Ingebrauchnahme eine Alterung vorzunehmen, da sonst alle Kondensatoren ihre Werte noch längere Zeit nach der Herstellung ändern. 3. Die Verluste sollen verschwindend klein sein ( $\tan \delta \ll 1 \cdot 10^{-4}$ ). Da nur die Gase völlig verlustfrei sind, so ist die Verwendung von festen Isoliermaterialien weitgehend einzuschränken. Soweit sie nicht zu vermeiden sind, muß auch ihr Isolationswiderstand sehr hoch sein. Als besonders geeignet hat sich blasenfreies Quarzglas erwiesen. Bernstein, der statisch ein sehr hochwertiger Isolator ist, zeigt bei Wechselstrom Verluste. 4. Der Temperaturkoeffizient soll möglichst klein sein. 5. Die Kondensatoren müssen sich ohne zusätzliche Verbindungskapazitäten parallel schalten lassen.

Verlustfreie Luftkondensatoren lassen sich in Einheiten bis zu  $0,1 \mu\text{F}$  bauen und durch Parallelschaltung mehrerer von ihnen kann noch eine Kapazität von  $1 \mu\text{F}$  erreicht werden. Darüber hinaus dürften

die Aufbauten zu umfangreich werden. Man verwendet dann besser Kondensatoren, die als Dielektrikum sehr dünne, hochwertige Glimmerblättchen enthalten; bei sorgfältigem Aufbau betragen die Verlustfaktoren solcher Kondensatoren etwa  $\text{tang } \delta = 1 \text{ bis } 2 \cdot 10^{-4}$ .

b) Luftkondensatoren. Als Normalluftkondensatoren sind in Deutschland größtenteils die nach Modellen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt gebauten Formen in Gebrauch. Man hat zwischen in ihren Kapazitätswerten festen und veränderlichen Typen zu unterscheiden. Von den Festkondensatoren kommen je nach der Kapazitätsgröße wiederum verschiedene Ausführungsformen in Betracht.

*α) Festkondensatoren.* Bereich 100 bis 1000  $\mu\mu\text{F}$  (vgl. Abb. 17 und 18). Jede der beiden Belegungen besteht aus einem Paket von Platten, die auf je drei auf einer massiven Grundplatte befestigten Metallsäulen unter Einfügen von Messingzwischenstücken zwischen je zwei Platten aufgesetzt und zum Schluß fest verschraubt sind. Die Säulen des einen Systems sind um  $60^\circ$  gegen die Säulen des anderen Systems versetzt und gehen durch Löcher in den Platten des anderen Systems und der zugehörigen Grundplatte hindurch. Die beiden Grundplatten sind durch je drei kleine Quarzglaszylinder gegeneinander, gegen das Gehäuse und gegen einen mit dem Gehäuseboden fest verschraubten Druckring isoliert, der für die feste Lage der ganzen Anordnung sorgt. Jedes der beiden Plattenpakete wird also als Ganzes gegen das andere und das Gehäuse isoliert. In jede der zu den beiden Plattenpaketen gehörige Grundplatte ist eine Messingstange eingeschraubt, die bis zu den Außenflächen des Gehäusebodens und -deckels frei durchgeführt ist und Bohrungen für Bananenstecker enthält. Jede der Stangen kann mittels einer aufgeschraubten Metallmutter mit dem Gehäuse verbunden werden, so daß wahlweise das eine oder das andere System an das Gehäuse angeschlossen werden

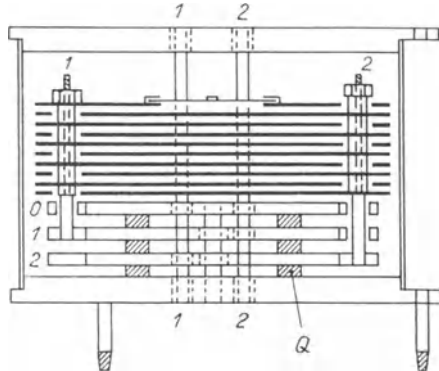


Abb. 17 Normalkondensator

Jedes der beiden Plattenpakete wird also als Ganzes gegen das andere und das Gehäuse isoliert. In jede der zu den beiden Plattenpaketen gehörige Grundplatte ist eine Messingstange eingeschraubt, die bis zu den Außenflächen des Gehäusebodens und -deckels frei durchgeführt ist und Bohrungen für Bananenstecker enthält. Jede der Stangen kann mittels einer aufgeschraubten Metallmutter mit dem Gehäuse verbunden werden, so daß wahlweise das eine oder das andere System an das Gehäuse angeschlossen werden

kann. Die drei Teilkapazitäten des Kondensators  $k_{12}$ ,  $k_{10}$  und  $k_{20}$  können also zu den Betriebskapazitäten  $k_{12} + k_{10}$ ,  $k_{12} + k_{20}$  und  $k_{12} + \frac{k_{10} k_{20}}{k_{10} + k_{20}}$  zusammenschaltet werden.

Der Plattendurchmesser beträgt 120 mm, der Plattenabstand 2 mm, die Plattenstärke 1 mm. Die oberste Platte hat einen Ausschnitt, der mittels eines feststellbaren Flügels geschlossen werden kann. Diese Vorrichtung gestattet eine Abgleichung des Kondensators auf einen

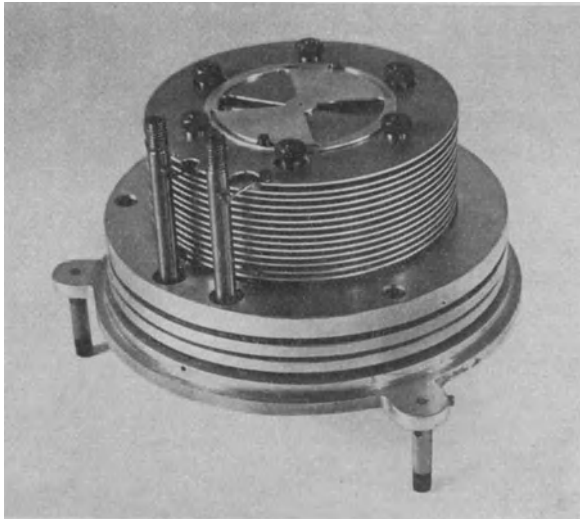


Abb. 18. Normalkondensator der PTR

runden Wert. Das Parallelschalten der Kondensatoren erfolgt durch Aufeinandersetzen derselben, wobei in die Buchsen der dafür vorgesehenen Stangen Doppelbananenstecker eingesetzt werden. Um ein Verbiegen dieser Stangen zu verhindern, greifen drei am Boden des einen Kondensators befestigte Füße in entsprechende Ringe ein, die an den Deckel des anderen angegossen sind. Der unterste Kondensator wird auf einen ähnlich konstruierten Untersatz aufgesetzt, der mit Anschlußklemmen für die Versuchsanordnung versehen ist und der bei allen Messungen an diese Anordnung angeschlossen bleibt (vgl. Abb. 19).

Bereich 1000 bis 10000  $\mu\mu\text{F}$ . Die Konstruktion der Kondensatoren der übrigen Dekaden ist ganz ähnlich. Für den Bereich 1000 bis 10000  $\mu\mu\text{F}$  beträgt bei gleichen Gehäusedimensionen der Plattendurch-

messer 158 mm, die Plattenstärke 3 mm, der Plattenabstand 1 mm. Neuerdings werden auch Kondensatoren dieses Kapazitätsbereichs mit einem Gehäusedurchmesser von 225 mm und einem Plattenabstand von 2 mm hergestellt, die dann auch auf einen entsprechend großen Teller aufzusetzen sind.

Bereich 10 bis 100  $\mu\mu\text{F}$ . Bei den Kondensatoren zwischen 10 und 100  $\mu\mu\text{F}$  besteht das System nur noch aus den obenerwähnten Grundplatten, die außerdem nur als Ringe ausgebildet sind und einen Abstand von etwa 5 mm haben. Bei den kleineren Einheiten werden nur noch Ringsegmente (vgl. Abb. 20) und bei 10  $\mu\mu\text{F}$  zwei gerade zylindrische Leiter als Belegungen benutzt.

Bereich 10000 bis 100000  $\mu\mu\text{F}$ . Bei den Kondensatoren über 10000 bis 100000  $\mu\mu\text{F}$  ist stets ein System mit dem Gehäuse verbunden. Aus Gründen größerer Stabilität werden je vier Trägerstangen verwendet, die in einem Ringsystem oben und unten befestigt sind. Die Bauform ist größer, der Plattendurchmesser beträgt 300 mm, die Plattendicke 1,25 mm, ihr Abstand 2 mm. Die größte Type von 100000  $\mu\mu\text{F}$  hat bei einem Plattendurchmesser von 350 mm je fünf Trägerstangen, davon je eine nahe der Plattenmitte. Letztere sind in je einem die Ringe verbindenden Quersteg befestigt. Die Plattendicke beträgt 1,25 mm, der Plattenabstand 1 mm.

Die Kondensatoren bis zu 50000  $\mu\mu\text{F}$  sind nach Beendigung der Alterungserscheinungen, die bis zu einigen Jahren nach der Herstellung andauern und die bei den größeren Werten Kapazitätsänderungen bis zu einigen Promille hervorrufen können, bis auf etwa 0,2<sup>0</sup>/<sub>00</sub> konstant. Die Isolationswiderstände betragen im getrockneten Zustand etwa  $10^{13}$  bis  $10^{15}$  Ohm. Feuchtigkeitshäute auf den Quarz-



Abb. 19. Kondensatorsatz

isolatoren bedingen Verluste. Die Kondensatoren sind innen gut sauber zu halten. Gelegentlich in das Innere gelangte Fasern usw. können besonders im feuchten Zustand zu erheblichen Verlusten führen. Die kleineren Kondensatoren sollten stets in einem Trockenschrank aufbewahrt werden, an den größeren werden zweckmäßig Trockengefäße für Phosphorpentoxyd fest angebaut. Im sauberen und trockenen Zustand sind Verlustwinkel bis zu Frequenzen von  $10^6$  Hertz nicht

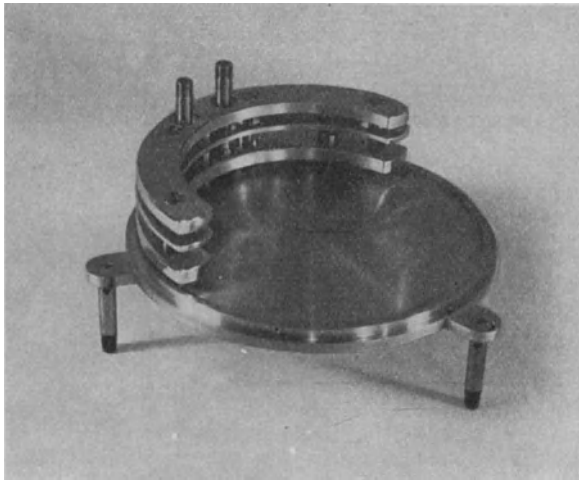


Abb. 20. Normalkondensator mit Ringsegmenten

nachweisbar. Der Temperaturkoeffizient ergibt sich zu etwa  $+0,01\%$  pro Grad Temperaturerhöhung. Die Selbstinduktion der größten Kondensatoren beträgt etwa 1000 cm, die der kleinsten etwa 50 cm. Diese Zahlen können jedoch nur einen rohen Anhalt über die Größenordnung geben.

Ähnliche Konstruktionen sind auch in anderen Ländern entwickelt worden, siehe Literaturverzeichnis.

*β) Veränderliche Kondensatoren.* Plattenkondensatoren. In Ergänzung zu den festen Kondensatorsätzen werden nach den gleichen Grundsätzen auch Normaldrehkondensatoren hergestellt. Bei der Eichung von Kapazitäten ist es vorteilhaft, solche Plattenformen zu verwenden, die eine der Lagenänderung des drehbaren Systems proportionale Kapazitätsänderung bedingen. Man verwendet daher halbkreisförmige Platten. Bei den Modellen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ist das feste System in der gleichen Weise hergestellt wie bei

den Festkondensatoren (vgl. Abb. 21). Drei auf einer Grundplatte bzw. auf einem Ring befestigte Messingstützen tragen die durch Distanzstücke im richtigen Abstand gehaltenen und zum Schluß durch eine Mutter befestigten Platten. Die Achse des drehbaren Systems ist oben und unten in je einer Platte gelagert, die durch Stützen verbunden sind. Beide Systeme sind gegeneinander, gegen das Gehäuse und gegen den mit dem Gehäuseboden verschraubten Druckring (s. oben) durch Quarzglas iso-

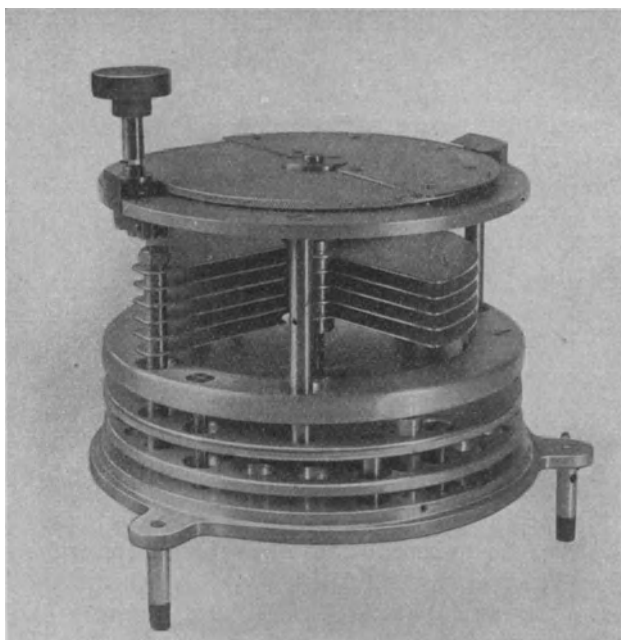


Abb. 21. Normaldrehkondensator

liert. Die Anschlüsse mit Buchsen für Bananenstecker gehen frei durch den Gehäuseboden hindurch, durch Muttern lassen sie sich wahlweise mit dem Gehäuse verbinden. Soll das Gehäuse an ein System angeschlossen werden, so ist es vorteilhafter, diese Verbindung mit dem beweglichen System vorzunehmen. Die Skalenscheibe liegt innerhalb des Gehäuses und ist durch ein Fenster an einem Nonius ablesbar. Der Antrieb erfolgt durch Friktion mit einem großen Übersetzungsverhältnis, wobei sich die Skalenscheibe mit dem System bewegt und kein toter Gang auftritt. Der durch Quarzglas isolierte Drehknopf ist mit Löchern

zum Einsetzen von Einstellstangen versehen, um eine feinere Einstellung zu ermöglichen. Außerdem bleiben eventuelle Handkapazitäten ohne Einfluß. — Zur Erzielung einer linearen Eichkurve wird die Skala etwas gegen die Stellung der Drehplatten versetzt, bei der Einstellung Null sind die beweglichen Platten bereits ein kleines Stück in das feste System eingedreht, allerdings reicht der veränderliche Bereich dann nur bis zu etwa  $160^\circ$ . Die Anfangskapazität hat auf diese Weise einen ziemlich hohen Betrag, sie ist vielfach auf  $100 \mu\mu\text{F}$  einreguliert. Kondensatoren dieser Art werden mit Steigungen von 0,5, 1, 1,5 und  $3 \mu\mu\text{F}$  pro Grad gebaut. Daneben kommen noch etwas abweichende Formen mit 0,25, 0,15 und  $0,1 \mu\mu\text{F}$  Steigung pro Grad zur Ausführung. Die Anfangskapazität hat bei diesen Typen einen Wert von 20 bzw.  $10 \mu\mu\text{F}$ . Für größere Kapazitätsänderungen werden Drehkondensatoren mit einer äußeren Abmessung von 225 mm Durchmesser hergestellt, die auch auf einen entsprechend größeren Untersatz zu setzen sind. Diese Drehkondensatoren sind zum Teil mit doppelten Systemen ausgerüstet, im übrigen aber ähnlich aufgebaut wie die kleinere Ausführung. Der Steigungsfaktor beträgt 6, 10 und  $30 \mu\mu\text{F}$  pro Grad, die Anfangskapazität 200 bzw.  $300 \mu\mu\text{F}$ . Die Platten haben in allen Fällen einen Abstand von 2 mm, die Überschlagnungsspannung ist höher als 1000 Volt. Die zeitliche Konstanz der Absolutwerte ist etwas geringer als bei den Festkondensatoren, die Differenz der Kapazitätswerte zweier Einstellungen dagegen zumeist ebenso konstant.

Zylinderkondensatoren. Neben den Plattenkondensatoren lassen sich auch Zylinderkondensatoren als Kapazitätsvarioren ausbilden. Dabei wird ein auf einer Achse bewegliches Zylindersystem parallel zu einem zweiten festen verschoben. Die Ablesung der Einstellungen erfolgt an einer auf dem Gehäuse angebrachten Millimeterteilung mittels eines Nonius. Häufig befindet sich die Teilung auf einer Trommel, die mit der die Verschiebung bewirkenden Schraubenspindel verbunden ist. Auch diese Kondensatoren besitzen eine lineare Eichkurve. Ausführungsformen sind von Gerdien und Wulf angegeben.

Wie bereits erwähnt, sind die meisten Drehkondensatoren so abgeglichen, daß sie neben einer festen Anfangskapazität ein bestimmtes, durch einen einfachen Zahlenfaktor darstellbares Steigungsverhältnis aufweisen. Im allgemeinen ist diese Abgleichung für  $k_{12} + k_{20}$  durchgeführt. Dann ist z. B.

$$k_{12} + k_{20} = (100 + 1,5\alpha) \mu\mu\text{F}.$$

Von dieser Form treten meist, durch konstruktive Eigenschaften des Kondensators bedingt, kleine Abweichungen auf. Diese Abweichungen  $\Delta c$  trägt man sich am besten in Abhängigkeit von der Kondensator-einstellung  $\alpha$  auf Koordinatenpapier auf und erhält so eine Korrektionskurve. Der genaue Kapazitätswert ist dann

$$k_{12} + k_{20} = (100 + 1,5 \alpha + \Delta c) \mu\mu\text{F}.$$

**Schraubkondensator.** Zur Messung sehr kleiner Kapazitätsänderungen läßt sich ein abgeschirmter Kohlrausch-Kondensator verwenden. In der Mitte des Gehäuses befindet sich auf drei zylindrischen Quarzisolatoren eine runde Metallplatte, ihr gegenüber, auf einer mit dem Gehäuse verbundenen Schraubenspindel von 1 mm Ganghöhe montiert, eine zweite gleich große. Die Einstellung erfolgt durch einen mit der Spindel verbundenen außerhalb des Gehäuses angebrachten Drehknopf, dessen Einstellungen wie bei einem Schraubenmikrometer abgelesen werden können. Der Kondensator hat eine Anfangskapazität von etwa  $5 \mu\mu\text{F}$ . Die Eichkurve ist stark gekrümmt. Die Kapazitätsänderung beträgt am Skalenanfang etwa  $0,001 \mu\mu\text{F}/\text{Skalenteil}$ . In diesem Gebiet lassen sich also noch  $0,0005 \mu\mu\text{F}$  einigermaßen sicher ablesen. Man benutzt diese Kondensatoren am besten nur bis zu Plattenabständen von mehreren mm, da sonst die Eichkurve zu steil und zu krumm wird. Die Kapazitätswerte eines solchen Kondensators lassen sich nach einer Formel etwa der folgenden Art berechnen:

$$C = C_0 + \frac{\gamma}{\alpha + a} + \Delta c,$$

wo  $C_0$  etwa gleich der Anfangskapazität des Kondensators ist,  $\gamma$  und  $\alpha$  Konstanten bedeuten und  $a$  die an der Mikrometerschraube abgelesene Einstellung des Kondensators in cm ist.  $\Delta c$  sind wieder die kleinen Abweichungen der nach den ersten beiden Ausdrücken berechneten Kurve von den wirklichen Meßpunkten. Für einen bestimmten solchen Kondensator hatte die Formel z. B. die folgende Gestalt:

$$C = 5,65 + \frac{1,738}{0,018 + a} + \Delta c.$$

**Differentialkondensatoren.** Kleine, nahezu lineare Kapazitätsänderungen lassen sich mit „Differentialkondensatoren“ erzielen (Abb. 22). Diese enthalten eine halbkreisförmige feste Platte und eine drehbare Vollkreisplatte. Von der der festen Platte zugekehrten Oberfläche der beweglichen Platte ist ein halbkreisförmiges Stück abgefräst,



so daß sie eine Art Stufe enthält. Ist  $\Delta d$  die Höhe dieser Stufe,  $d$  der kürzeste Abstand zwischen fester und beweglicher Platte an einer unbearbeiteten Stelle und  $R$  der Plattenradius, dann beträgt die gesamte mit dem Kondensator erzielbare Kapazitätsänderung in erster Näherung:

$$\Delta C = \frac{\Delta d}{2} \left( \frac{R}{2d} \right)^2.$$

Diese Kondensatoren werden wie die anderen mit Quarzglasisolation und Gehäuse gebaut.

Kondensatoren kleiner Anfangskapazität. Für viele Zwecke ist es wichtig, die Anfangskapazität weitgehend herabzusetzen, ganz besonders trifft das für das Arbeiten bei höheren Frequenzen zu.

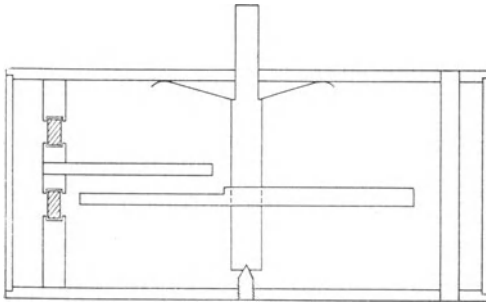


Abb. 22. Differentialkondensator

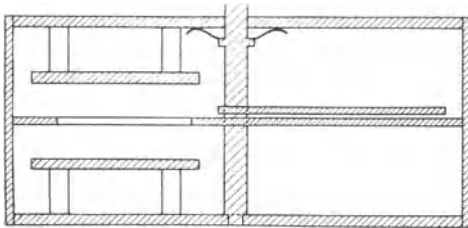


Abb. 23. Kondensator ohne Anfangskapazität in  $k_{12}$

einer Endkapazität von  $100 \mu\mu\text{F}$  ist im Tätigkeitsbericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt<sup>1)</sup> hingewiesen. Durch andere Abmessungen lassen sich noch kleinere Anfangskapazitäten erzielen.

Daneben sind Drehkondensatoren konstruiert worden, bei denen eine Teilkapazität,  $k_{12}$ , völlig zu Null gemacht werden kann (Abb. 23).

<sup>1)</sup> Phys. Z. 38, 342, 1937.

Durch konstruktive Maßnahmen kommt man über eine bestimmte Grenze nicht hinaus. Man kann sich so helfen, daß man mit dem Drehkondensator in Reihe einen kleinen festen Kondensator schaltet. Damit wird allerdings auch die Endkapazität herabgesetzt. Außerdem ist für Hochfrequenzzwecke oft eine Symmetrie der Anordnung erwünscht. Dies läßt sich erreichen, wenn man zwei Drehkondensatoren, unter Umständen auf der gleichen Achse, in Reihe schaltet. Auf einen solchen Kondensator mit einer Anfangskapazität von  $2,5 \mu\mu\text{F}$  und

In diesem Falle sind die beiden einander gegenüberstehenden Belegungen 1 und 2 in ihrer Lage zueinander unveränderlich, sie sind über Isolatoren am Gehäuse befestigt. Zwischen ihnen befindet sich eine mit dem Gehäuse verbundene Trennwand, die über der Stelle, wo die Belegungen sitzen, eine Öffnung etwa von der Größe der Belegungen besitzt. Diese Öffnung kann durch einen an der mit dem Gehäuse verbundenen Achse des Drehkondensators sitzenden Flügel geschlossen werden. Im geschlossenen Zustand können keine Kraftlinien von der Belegung 1 nach Belegung 2 verlaufen, sie enden vielmehr alle auf dem Flügel, die Kapazität  $k_{12}$  ist dann Null, während  $k_{10}$  und  $k_{20}$  am größten sind. Beim Herausdrehen des Flügels nimmt  $k_{12}$  zu, während  $k_{10}$  und  $k_{20}$  kleiner werden. Die Kapazität  $k_{12}$  ist verlustfrei, da sie keine festen Dielektrika enthält. Kondensatoren dieser Art können mit wirklichem Nutzen nur in Wechselstrombrücken gebraucht werden, wo das Gehäuse geerdet wird und nur die Teilkapazität  $k_{12}$  in die Messungen eingeht (s. S. 65). In Thomsonschen Schwingungskreisen oder anderen ähnlichen Anordnungen, in denen die Betriebskapazität

$k_{12} + \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}}$  maßgebend ist, ist die Anfangskapazität durch das Glied  $\frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}}$  gegeben, das natürlich nicht verschwindet. Über die Größenverhältnisse der Teilkapazitäten zweier Modelle kann die folgende Tabelle Auskunft geben (alle Werte in  $\mu\mu\text{F}$ ):

$k_{12}$	$k_{10}$	$k_{20}$	Steigungsfaktor
0—1	17—15	19—17	0,006
0—10	41—18	44—20	0,06

Auch bei den Untersätzen zu den Normalkondensatoren kann man durch Einziehen einer mit dem Gehäuse verbundenen Trennwand zwischen den Anschlüssen zu den Belegungen 1 und 2 die Teilkapazität  $k_{12}$  zu Null machen.

c) Glimmerkondensatoren.  $\alpha$ ) *Stöpselkondensatoren*. Glimmerkondensatoren werden in sehr guten Ausführungen von etwa 0,001  $\mu\text{F}$  an aufwärts hergestellt und einzeln oder zu Kapazitätssätzen zusammengestellt benutzt. Bei letzteren unterscheidet man zwischen Stöpsel- und Kurbelkondensatoren. Das Schaltschema eines Stöpselkondensators

ist in den Abb. 24 und 25 angegeben. Stöpselkondensatoren enthalten meist zwölf Abteilungen mit den Kapazitätswerten 0,001, 0,002, 0,002, 0,005, 0,01, 0,01, 0,02, 0,05, 0,1, 0,1, 0,2, 0,5  $\mu\text{F}$ , die Gesamtkapazität beträgt 1  $\mu\text{F}$ . Neuerdings werden auch solche mit den Stufen 0,001, 0,002, 0,003, 0,004, 0,01 usf. bis 0,4  $\mu\text{F}$  und einer Gesamtkapazität von 1,11  $\mu\text{F}$  gebaut. Daneben gibt es auch größere Kästen mit Stufen von 1 bis insgesamt 10  $\mu\text{F}$ . Bei Stöpselung auf der mit den Ziffern versehenen Schaltleiste ist die jeweilige Abteilung eingeschaltet, bei Stöpselung an der mittleren Schaltleiste kurzgeschlossen.

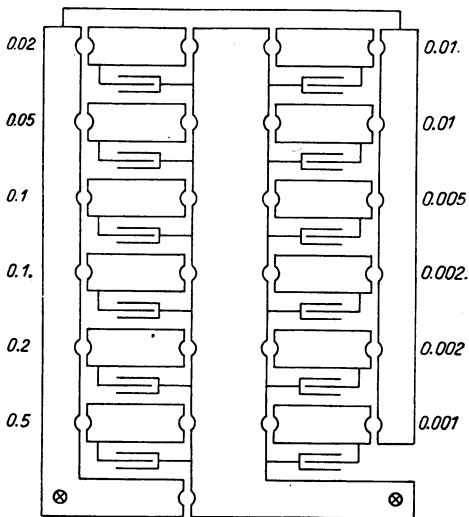


Abb. 24. Stöpselkondensator

Die zwischen den Kondensatorklemmen eines solchen Kondensators liegende Gesamtkapazität setzt sich zusammen aus der Schaltungskapazität  $c_s$  des Kondensators, d. h. der bei Kurzschluß aller Abteilungen zwischen den Kondensatorklemmen liegenden Kapazität, und der Kapazität der einzelnen Abteilungen. Im allgemeinen ist es zweckmäßig, nicht die jeweilige Gesamtkapazität zu messen, sondern die Schaltungskapazität und die Kapazitäten der einzelnen Abteilungen getrennt zu bestimmen, zu-

mal die Schaltungskapazität in höherem Maße als die Kapazität der Abteilungen von äußeren Umständen (Feuchtigkeit, Lage zu anderen Leitern) abhängig ist. Bei Normalkondensatoren umgibt die eine Belegung jeder einzelnen Kondensatorabteilung die andere, schirmt sie also elektrisch ab; die Außenbelegungen sämtlicher Abteilungen sind an die gleiche Klemme geführt. Die Einzelkondensatoren beeinflussen sich also gegenseitig nicht. Wohl tun das aber die mehr oder weniger langen Zuleitungen zu den Kondensatoren. Stöpselt man mehrere Abteilungen gleichzeitig, so ist aus diesem Grunde der gemessene Kapazitätswert (immer auf die Werte ohne Schaltungskapazität bezogen) meist kleiner als der aus den Einzelwerten berechnete. Diese

Beeinflussung ist besonders bei den kleinen Abteilungen störend, hier können die Abweichungen u. U. mehrere Promille der Kapazitätswerte betragen. Von einzelnen Firmen ist in neuerer Zeit dieser Fehler weitgehend vermieden worden. Trotzdem kann diese unabgeschützte Bauart der Kondensatoren zu Meßfehlern führen, da die Streukapazitäten  $k_{10}$  und  $k_{20}$  gegen Erde nicht definiert sind. In bestimmten Brückenanordnungen (s. später) legen sich diese Teilkapazitäten automatisch einzelnen Brückenäzweigen parallel, und da ihre Größen nicht bekannt sind und von Zufälligkeiten der Aufstellung der Kondensatoren abhängen, können sie nicht berücksichtigt werden und bedingen daher Ungenauigkeiten in den Meßergebnissen. Neuerdings werden daher für höchste Ansprüche diese Kondensatoren einschließlich aller Schaltorgane in besondere Blechgehäuse eingebaut, so daß nunmehr alle Teilkapazitäten gemessen werden können. Die bei einem solchen Kondensator auftretenden Kapazitätsverteilungen sind aus Abb. 25 zu ersehen, in der für zwei Abteilungen alle Teil-

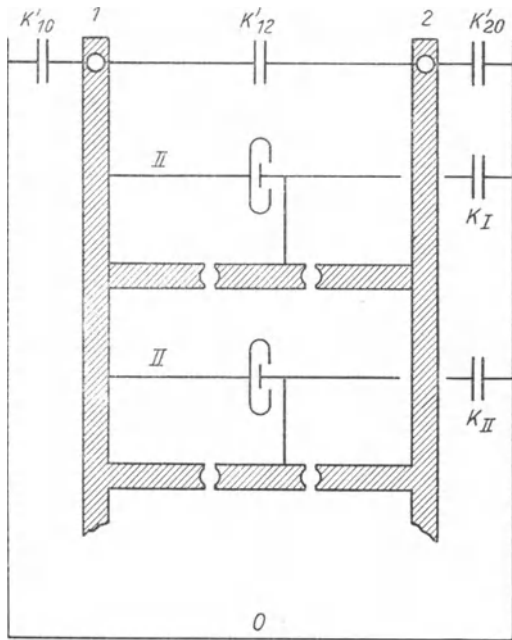


Abb. 25. Stöpselkondensator: Teilkapazitäten

kapazitäten eingezeichnet sind. Außer den Kapazitäten  $k_{12}$  der beiden Abteilungen I und II tritt eine Schaltungskapazität  $k'_{12}$  zwischen der Schaltleiste 1 einschließlich der Zuleitungen von dieser Schaltleiste zu den Belegungen 1 der Kondensatoren und der Schaltleiste 2 auf, ferner eine Schaltungskapazität  $k'_{10}$  zwischen Schaltleiste 1 einschließlich der Zuleitungen zu den Belegungen 1 und dem Gehäuse 0, und  $k'_{20}$  zwischen der Schaltleiste 2 und dem Gehäuse. Außerdem hat noch jede Zuführung zur Belegung 2 jeder Abteilung eine Kapazität  $k_I$  bzw.  $k_{II}$  gegen das Ge-

häuse. Ist die Abteilung eingeschaltet, so legt sich diese Kapazität zu  $k'_{20}$  parallel, ist die Abteilung kurzgeschlossen, so liegt sie zu  $k'_{10}$  parallel. Da die Schaltungskapazitäten  $k'_{10}$  und  $k'_{20}$  bei kurzgeschlossenen Einzelkondensatoren bestimmt werden, so ist bei Stöpselung einer Abteilung  $k'_{10}$  um  $k$  verkleinert,  $k'_{20}$  um  $k$  vergrößert. Bei Stöpselung einer Abteilung erhält man je nach der Schaltung des Kondensators die folgenden Beziehungen:

Klemme 1 mit dem Gehäuse verbunden:

$$(51) \quad C = k_{12} + k'_{12} + k'_{20} + k.$$

Klemme 2 mit dem Gehäuse verbunden:

$$(52) \quad C = k_{12} + k'_{12} + k'_{10} - k.$$

Wird keine der Klemmen mit dem Gehäuse verbunden, ist das Gehäuse aber geerdet, so gilt

$$(53) \quad C = k_{12} + k'_{12} + k_r.$$

Wird das Gehäuse nicht geerdet, so kann die Betriebskapazität etwas von der Lage des Kondensators zur Umgebung (Erde, andere Leiter) abhängen, Gleichung (53) gilt dann nur angenähert. Die Berechnung der Verlustwinkel kann mit hinreichender Genauigkeit nach den folgenden Formeln erfolgen. (Wegen  $\delta \approx \tan \delta$  für kleine Winkel  $\delta$  ist in den folgenden Formeln der Einfachheit halber  $\delta$  an Stelle von  $\tan \delta$  geschrieben.)

$$(54) \quad \Delta = \frac{k_{12} \delta_{12} + k'_{12} \delta'_{12} + (k'_{20} + k) \delta'_{20}}{k_{12} + k'_{12} + k'_{20} + k}$$

bzw.

$$(55) \quad \Delta = \frac{k_{12} \delta_{12} + k'_{12} \delta'_{12} + (k'_{10} - k) \delta'_{10}}{k_{12} + k'_{12} + k'_{10} - k}$$

bzw.

$$(56) \quad \Delta = \frac{k_{12} \delta_{12} + k'_{12} \delta'_{12} + k_r \delta_r}{k_{12} + k'_{12} + k_r}.$$

In diesen Ausdrücken ist

$$(56a) \quad k_r = \frac{(k'_{10} - k)(k'_{20} + k)}{k'_{10} + k'_{20}},$$

$$(56b) \quad \delta_r = \frac{(k'_{10} - k) \delta'_{20} + (k'_{20} + k) \delta'_{10}}{k'_{10} + k'_{20}}.$$

Für die Ableitungen gilt entsprechend:

$$(57) \quad G = g_{12} + g'_{12} + g'_{20}$$

bzw.

$$(58) \quad G = g_{12} + g'_{12} + g'_{10}$$

bzw.

$$(59) \quad G = g_{12} + g'_{12} + g_r.$$

Hierin ist

$$(59a) \quad g'_{20} = \omega (k'_{20} + k) \delta_{20},$$

$$(59b) \quad g'_{10} = \omega (k'_{10} - k) \delta'_{10},$$

$$(59c) \quad g_r = \omega k_r \delta_r, \quad g_{12} = \omega k_{12} \delta_{12}.$$

Für die größeren Kapazitätswerte wird der Einfluß der Größen  $k$  verschwindend klein, da ihre Beträge meist unterhalb der erzielbaren Meßgenauigkeit bleiben. Bei gleichzeitiger Stöpselung mehrerer Abteilungen 1, 2, 3, ... sind die resultierende Kapazität, ihr Verlustwinkel und ihre Ableitung nach den Formeln

$$(60) \quad C = c_s + c_1 + c_2 + c_3 + \dots$$

$$(61) \quad \Delta = \frac{c_s \delta_s + c_1 \delta_1 + c_2 \delta_2 + c_3 \delta_3 + \dots}{C},$$

$$(62) \quad G = g_s + g_1 + g_2 + g_3 + \dots$$

zu berechnen. Für  $c_1, c_2, \dots$  sind die Werte  $k_{12}$  einzusetzen, entsprechend ist bei  $\delta_1, \delta_2, \dots$  und  $g_1, g_2, \dots$  zu verfahren. Die Schaltkapazität  $c_s$  ist je nach der Schaltung aus den einzelnen Teilschaltkapazitäten zu berechnen, wobei alle zu den gestöpselten Abteilungen zugehörigen Größen  $k$  zu  $k'_{20}$  zuzuzählen bzw. von  $k'_{10}$  abzuziehen sind.

$\beta$ ) *Kurbelkondensatoren.* Die Kurbelkondensatoren enthalten häufig drei Dekaden, von denen immer je eine durch eine Kurbel geschaltet wird. Jede Dekade besteht aus zehn oder elf gleich großen Einzelkondensatoren von 0,001, 0,01 und 0,1  $\mu\text{F}$ . Gelegentlich werden auch noch Kurbelkondensatoren mit Stufen von 1  $\mu\text{F}$  benutzt (vgl. hierzu  $\gamma$ ). Die eine Belegung jedes einzelnen Kondensators umgibt wie bei den Stöpselkondensatoren die andere, schirmt sie also ab. Alle Außenbelegungen sind untereinander verbunden. Der Schaltmechanismus (Abb. 26) besteht aus zwei voneinander isolierten halbkreisförmigen Metallplatten, die mittels der Kurbel gleichzeitig bewegt werden und über Federkontakte die Einzelkondensatoren einschalten oder kurzschließen. An der einen Platte liegen über einen solchen Kontakt alle Außenbelegungen der Kondensatoren einschließlich der ihnen gemeinsamen Zuleitung zu der einen Kondensatorklemme, während die

zweite Klemme in der gleichen Weise mit der anderen Platte verbunden ist. Die Innenbelegungen der Kondensatoren werden über ebensolche Schleiffedern je nach der Schalterstellung an die eine oder andere Halbkreisplatte angeschlossen. Alle an Platte 1 liegenden Kondensatoren sind auf diese Weise kurzgeschlossen, alle an Platte 2 liegenden einander parallel- und eingeschaltet. Genau wie der Stöpselkondensator besitzt der Kurbelkondensator bei Kurzschluß aller Einzelkondensatoren eine Schaltkapazität, die jedoch nur beim völlig abgeschirmten Kondensator vollständig definiert ist. Ihre Teilkapazi-

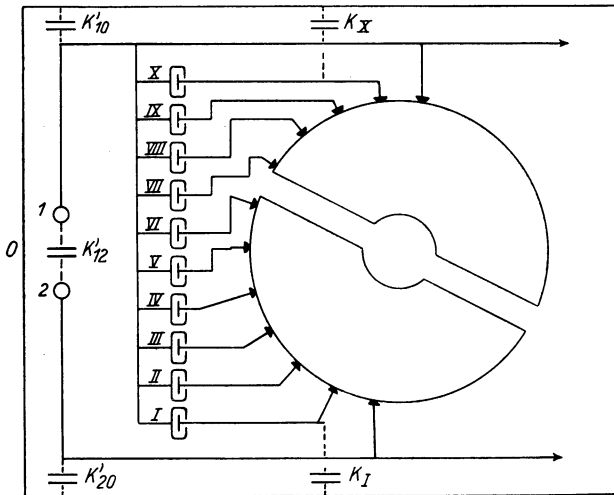


Abb. 26. Kurbelkondensator: Teilkapazitäten

tät  $k'_{12}$  liegt zwischen den Zuleitungen zu den Außenbelegungen der Einzelkondensatoren und der Zuleitung von der Klemme 2 zum Schaltmechanismus sowie zwischen den beiden Halbkreisplatten. Die Teilkapazitäten  $k'_{10}$  und  $k'_{20}$  liegen zwischen je einer dieser Zuleitungen bzw. Platten und dem Gehäuse. Außerdem hat noch jede Zuleitung von der inneren Belegung jeden Kondensators zu der zugehörigen Schleiffeder eine Kapazität  $k$  gegen das Gehäuse, die bei eingeschaltetem Kondensator zu  $k'_{20}$ , bei kurzgeschlossenem Kondensator zu  $k'_{10}$  parallel liegt. Bei Einschaltung einer Stufe wird hierdurch die bei Kurzschluß aller Stufen bestimmte Teilkapazität  $k'_{10}$  um  $k$  verkleinert,  $k'_{20}$  um  $k$  vergrößert. Für Kapazitäten, Verluste und Ableitungen gelten die gleichen Beziehungen, wie sie für den Stöpselkondensator angegeben sind.

γ) *Eigenschaften der Glimmerkondensatoren.* Die Verluste der Glimmerkondensatoren betragen bei einer Meßfrequenz von 800 Hertz bei guten Ausführungsformen von weniger als 1 bis zu  $2 \cdot 10^{-4}$  für den  $\tan \delta$ , bei älteren Kondensatoren sind sie zumal bei den kleinen Stufen oft erheblich größer. Bei 50 Hertz sind die Verluste etwa zwei- bis dreimal so groß. Je größer der Verlustfaktor ist, um so mehr besteht auch eine Frequenzabhängigkeit bezüglich der Kapazitätswerte. Diese sind bei 50 Hertz um 0,1 bis  $1\%$  größer als bei 800 Hertz. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Kapazität um etwa 0,02 bis  $0,2\%$  pro Grad, in einzelnen Fällen ist der Temperaturkoeffizient jedoch auch positiv. Der Verlustwinkel steigt mit der Temperatur um etwa 2 % pro Grad. Hohe Belastungen der Kondensatoren und starke Temperaturschwankungen führen oft zu dauernden Änderungen der Werte. Bei Kurbelkondensatoren machen häufig die Federkontakte Schwierigkeiten. Sie müssen sehr sauber gehalten und öfters gereinigt werden, da sonst Übergangswiderstände in Erscheinung treten, die zu Verlusten führen. Die Verluste nehmen nach Formel (36) beim selben Übergangswiderstand mit der Kapazität zu, weshalb die Verwendung von Kurbelkondensatoren mit sehr großen Kapazitätsstufen unzuweckmäßig ist, sobald die Verluste des Kondensators in die Messungen eingehen.

d) *Spezialkondensatoren für Hochspannung.* Als Normale für Hochspannungsmessungen werden vielfach Schutzringzylinderkondensatoren benutzt. Der von Petersen angegebene (s. Abb. 27) ist an den Enden kegelförmig erweitert und seine Ränder enden in Wülsten als Sprühschutz. Er ist bis 100 kV einwandfrei brauchbar. Die Durchschlagsspannung wird ein Maximum, wenn das Verhältnis vom äußeren Radius  $R$  zum inneren Radius  $r$  gleich  $e$ , der Basis der natürlichen Logarithmen ist.

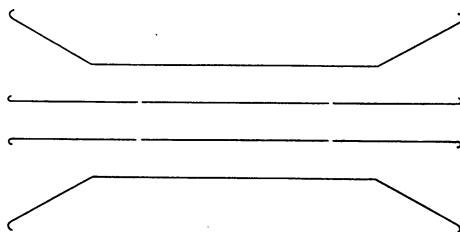


Abb. 27

Die Durchschlagfestigkeit aller Kondensatoren läßt sich erhöhen, wenn sie mit Gasen von erhöhtem Druck bis zu etwa 20 at gefüllt werden, sie sind unter dem Namen Preßgaskondensatoren in die Literatur eingegangen.



Bis zu 20 kV sind auch die von Schott u. Gen. in Jena hergestellten Minosflaschen geeignet, deren Belastbarkeit durch Reihenschaltungen bis zu 100 kV erhöht werden kann. Sie sind weitgehend von der Temperatur und der Spannung unabhängig, ihr Verlustfaktor  $\tan \delta$  beträgt etwa  $10 \cdot 10^{-4}$ .

e) Technische Kondensatoren. Außer den beschriebenen Normalkondensatoren sind noch eine große Anzahl von technischen Kondensatoren in Gebrauch, die zum Teil wohl bestimmte Anforderungen für Spezialzwecke gut erfüllen, wie z. B. hohe Durchschlagsfestigkeit, hohe Kapazität bei geringen Verlusten, hohe Kapazität bei geringen Abmessungen u. a. m., meist ist ihre Konstanz aber für Präzisionsmessungen nicht ausreichend. Bei diesen Kondensatoren werden als Dielektrikum vielfach Öle, mit Paraffin, Lacken oder Ölen getränkte Papiere, keramische Stoffe oder auch Elektrolyte benutzt. Elektrolytkondensatoren dienen besonders der Herstellung sehr großer Kapazitäten bis zu einigen tausend Mikrofarad, keramische Stoffe haben sich besonders in der Hochfrequenztechnik eingebürgert, wo verlustarme Kapazitäten benötigt werden. Diese keramischen Stoffe sind jedoch meist nur so lange einwandfrei, als ihre Brennhaut unverletzt ist. Beim Einbau in Kondensatoren werden sie häufig ganz oder an einzelnen Stellen geschliffen und sind dann um nichts besser als andere durchschnittliche Isolierstoffe.

### III. Meßmethoden

#### 1. Übersicht

Bei der Messung von Kapazitäten unterscheidet man zwischen unmittelbaren (absoluten) und mittelbaren (relativen) Verfahren. Absolute Meßmethoden gestatten die Ermittlung der Kapazität unmittelbar in Einheiten des absoluten Maßsystems, unter Umständen unter Rückführung auf andere Größen, deren Beziehungen zu den Grundeinheiten bekannt sind. Bei den Relativmethoden erfolgt eine Vergleichung mit Kapazitäts- oder auch anderen Normalen, die ihrerseits entweder absolut gemessen oder aber doch an eine Absolutmessung angeschlossen sind. Die Verfahren lassen sich unterteilen in solche, die mit Gleichstrom und solche, die mit Wechselstrom arbeiten. Eine besondere Bedeutung kommt dabei den Brückenmethoden zu,

die jedoch nicht für alle Frequenzen verwendbar sind. Somit ergibt sich noch eine weitere Unterteilung nach dem Frequenzgebiet.

### 2. Unmittelbare Meßmethoden

a) Bestimmung der Kapazität aus Strom- und Spannungsmessungen (Abb. 28). An die Klemmen eines verlustfreien Kondensators  $C$  wird eine sinusförmige Spannung  $V$  der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$  angelegt. Die Kapazität des Kondensators ergibt sich aus  $V$  und dem in dem Kreise fließenden Strom  $I$  zu

$$(63) \quad C = \frac{I}{\omega V}.$$

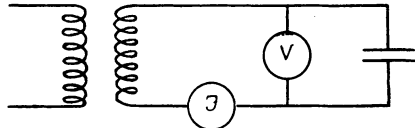


Abb. 28

Zur Spannungsmessung ist die Verwendung eines elektrostatischen Instruments mit geringer Stromaufnahme erforderlich. Solche Instrumente besitzen jedoch eine Eigenkapazität, deren Betrag meist nicht vernachlässigbar, und außerdem vom Ausschlag des Instruments abhängig ist. Diese Kapazität sowie diejenige der Zuleitungen sind von dem aus obiger Gleichung ermittelten  $C$  abzuziehen. Hat der zu messende Kondensator Verluste, so ergibt sich

$$(64) \quad C = \frac{I}{\omega V} \sqrt{1 + \tan^2 \delta}.$$

Die Ermittlung der Verluste kann auf dem Wege über eine Leistungsmessung erfolgen, wobei Instrumente mit hoher Leistungsempfindlichkeit, wie z. B. Thermowattmeter, zu verwenden sind. Aus der gemessenen Leistung  $N$  und den Werten  $I$  und  $V$  ergibt sich dann

$$(65) \quad \tan \delta = \frac{N}{\sqrt{V^2 I^2 - N^2}}.$$

Die Strommessung läßt sich auch durch Messung des Spannungsabfalls  $V_0$  an einem dem Kondensator vorgeschalteten Widerstand  $R$  mittels des elektrostatischen Voltmeters ersetzen. Dann gilt:

$$(66) \quad C = \frac{V_0}{\omega V R}.$$

Wählt man  $R$  so, daß  $V_0 = V$  wird, so ergibt sich  $C$  lediglich aus Frequenz und Widerstand zu

$$(67) \quad C = \frac{1}{\omega R}.$$

b) Messung mittels ballistischen Galvanometers (Abb. 29). Die Entladung eines verlustfreien Luftkondensators über einen nicht zu hohen Widerstand erfolgt in einem kleinen Bruchteil einer Sekunde. Läßt man diese Entladung durch ein ballistisches Galvanometer gehen, dessen Schwingungsdauer so groß ist, daß der Stromstoß innerhalb der Zeit verläuft, während der sich das bewegliche System des Galvanometers noch in Ruhe befindet, so ist der danach erfolgende Ausschlag sehr gut der Elektrizitätsmenge proportional, die das Galvanometer durchflossen hat. Es ist

$$(68) \quad Q = \alpha \frac{c T_0}{2 \pi} R^{(1/2 \pi) \operatorname{arc} \operatorname{tg} (2 \pi / \lambda)}.$$

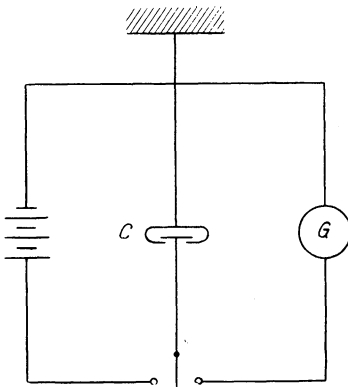


Abb. 29

In dieser Gleichung bedeutet  $\alpha$  den Galvanometerausschlag, alle anderen Größen sind Galvanometerkonstante:  $c$  ist der Reduktionsfaktor,  $T_0$  die volle Schwingungsdauer im ungedämpften Zustand des Galvanometers,  $k$  das Dämpfungsverhältnis,  $\lambda$  das logarithmische Dekrement. Da nun  $C = Q/V$  ist, so ergibt sich damit auch  $C$ .

Wie bereits oben angedeutet, führt diese Methode nur bei völlig verlust- und rückstandsfreien Kondensatoren zu einwandfreien Resultaten. Wie früher dargelegt, erfolgt die Entladung verlustbehafteter Kondensatoren in der Weise, daß zunächst ein rasch verlaufender Ausgleich der freien Ladung auf der Oberfläche der Belegungen eintritt, daß aber danach noch ein längere Zeit andauernder Strom infolge der vom Dielektrikum absorbierten Ladung fließt. Infolgedessen hängt der mittels Kondensatorentladung bestimmte Kapazitätswert von der Dauer der Ladung und Entladung ab.

An Stelle einer einzigen Ladung und Entladung des Kondensators kann man diesen auch über einen Unterbrecher periodisch laden und entladen. Man erhält dann einen konstanten Ausschlag des Galvanometers. Ist  $I$  die dem Ausschlag des Galvanometers entsprechende

Stromstärke,  $V$  die angelegte Spannung und  $n$  die Zahl der Unterbrechungen pro Sekunde, so gilt

$$(69) \quad C = \frac{I}{nV}.$$

Bei sehr raschem Wechsel wird die ohne Rückstandsbildung geltende Kapazität gemessen.

Die Weiterentwicklung dieses Verfahrens hat zu der Kapazitätsbrücke von Maxwell-Thomson geführt.

c) Die Maxwell-Thomson-Brücke. Das genaueste Verfahren zur absoluten Kapazitätsmessung, bei dem sich die Kapazität in Farad = sec/Ohm ergibt, ist die von Maxwell angegebene Unterbrechermethode. Der zu messende Kondensator bildet einen Zweig einer sonst nur aus Ohmschen Widerständen bestehenden Wheatstoneschen Brücke, in der er mit Hilfe eines Unterbrechers abwechselnd geladen und wieder entladen wird (vgl. Abb. 30). Als Indikatorinstrument dient ein

Gleichstromgalvanometer, als Spannungsquelle eine Gleichstrombatterie. Die mit der Kondensatorhülle verbundene Belegung des zu messenden Kondensators liegt an einem Spannungseckpunkt der

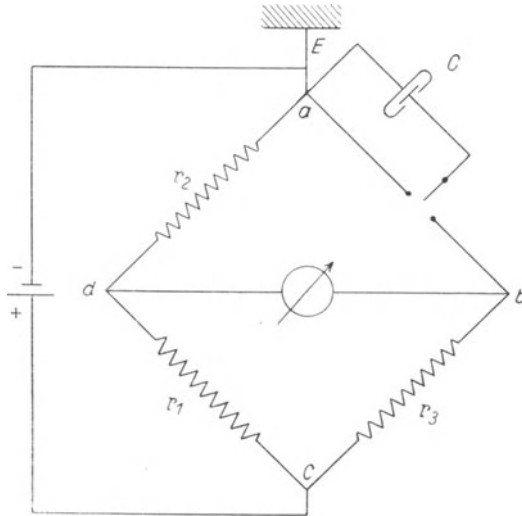


Abb. 30. Maxwell-Thomson-Brücke

Brücke, die andere an der Unterbrecherfeder. Der Brückeneckpunkt, an dem die Kondensatorhülle und die eine Spannungszuführung liegen, wird geerdet, um Streukapazitäten gegen Erde unschädlich zu machen, und um definierte Spannungen zu haben. Die Unterbrecherfeder legt sich einmal an den mit dem einen Galvanometereckpunkt ( $b$ ) verbundenen Kontakt, der Kondensator wird währenddessen aufgeladen. Im nächsten Augenblick verbindet die Unterbrecherfeder den Kon-

densator mit Punkt  $a$ , der Kondensator entlädt sich. Solange der Unterbrecher keinen Kontakt macht oder an  $a$  liegt, fließt durch das Galvanometer ein Strom von  $b$  nach  $a$ , liegt der Unterbrecher an  $b$ , wird also der Kondensator geladen, so gelangt der Ladestrom von  $c$  nach  $b$  auf zwei Wegen, nämlich einmal über  $r_3$  und zweitens über  $r_1$  und durch das Galvanometer in der Richtung von  $a$  nach  $b$ . Dieser Ladestrom sucht also das Galvanometer in der umgekehrten Richtung abzulenken wie der in den anderen Federstellungen fließende Gleichstrom. Hat das Galvanometer eine hinreichend lange Schwingungsdauer, so wird sich seine Spule erst dann in einer Richtung in Bewegung setzen, wenn bereits der Strom in der anderen Richtung eingesetzt hat. Als Folge davon stellt sich das Galvanometer schließlich auf einen Mittelwert zwischen beiden Strömen ein. Durch geeignete Wahl von  $r_2$  kann man erreichen, daß es überhaupt in Ruhe bleibt. Ist  $C$  die Kapazität des zu messenden Kondensators,  $c_s$  die Kapazität der Zuleitungen usw., so gilt:

$$(70) \quad C + c_s = \frac{1}{n} \cdot \frac{r_1}{r_2 \cdot r_3} \cdot F,$$

$n$  ist die Zahl der Ladungen bzw. Entladungen des Kondensators pro Sekunde, und  $F$  ein von J. J. Thomson berechnetes Korrektionsglied, das nur wenig von 1 verschieden ist. Es hat die Form:

$$(71) \quad F = \frac{1 - \alpha\beta}{\left(1 + \alpha \frac{e}{r_3}\right) \left(1 + \beta \cdot \frac{g}{r_2}\right)} \approx 1 - \alpha\beta - \alpha \frac{e}{r_3} - \beta \frac{g}{r_2},$$

$$\alpha = \frac{r_1}{r_1 + r_2 + e}, \quad \beta = \frac{r_1}{r_1 + r_3 + g}.$$

$e$  = Widerstand des Batteriekreises,  $g$  = Widerstand des Galvanometerkreises. Das Korrektionsglied weicht um so weniger von 1 ab, je kleiner die Widerstände des Batterie- und des Galvanometerkreises sind. Bei dieser Meßanordnung müssen also auch die Zuleitungswiderstände dieser Kreise so klein als möglich gemacht werden und bekannt sein. Als Batterien sind nur ausreichend dimensionierte und in gutem Zustand befindliche Akkumulatoren zu gebrauchen, deren innerer Widerstand meist wenige hundertstel Ohm beträgt. Ihr Widerstand ist zu messen. Zur Anzeige sind Spiegelgalvanometer mit kleinem Widerstand, langer Schwingungsdauer und großer Stromempfindlichkeit geeignet, ihr innerer Widerstand beträgt am besten weniger als 10 Ohm, die Schwingungsdauer etwa 15 Sekunden und die Stromempfindlichkeit

etwa  $1 \cdot 10^{-9}$  A/mm Ausschlag bei 1 m Skalenabstand; derartige Instrumente werden fabrikationsmäßig hergestellt. Außerdem soll für Messungen höchster Präzision die Induktanz des Galvanometers vom Strom durch seine Spule und deren Lage zum Magneten unabhängig sein. Das Galvanometer muß richtig integrieren, d. h. das Zeitintegral des Galvanometerstromes muß für jeden Zyklus Null sein. Zur Feststellung, ob ein Galvanometer diese Bedingung erfüllt, ist von Curtis und Moon die in Abb. 31 wiedergegebene Schaltung empfohlen. Das zu untersuchende Galvanometer wird mit einem Kondensator und der Zunge des Unterbrechers verbunden, so daß sowohl Lade- wie Entladestrom durch das Galvanometer hindurchgehen. Zeigt das Galvanometer dann keine Abweichung von der Ruhelage, so integriert es richtig. Die Widerstände  $R$  und  $r$  sind so zu wählen, daß in jedem Zyklus eine vollständige Ladung und Entladung des Kondensators stattfindet, am besten benutzt man die gleichen Widerstände wie in der eigentlichen Meßanordnung. Handelsübliche Galvanometer bedürfen häufig einer sorgfältigen Orientierung der Spule gegenüber dem Magneten, um eine einwandfreie Integration zu erreichen.

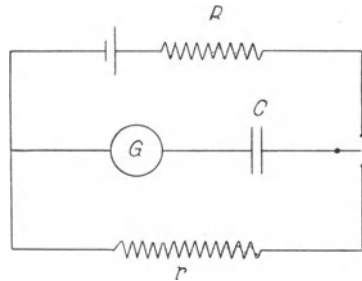


Abb. 31

Ist der Rahmen, auf den die Spule gewickelt ist, nicht völlig frei von ferromagnetischen Bestandteilen, so zeigt das Galvanometer in der Brücke beim Umpolen der angelegten Spannung eine Änderung seiner Nullage. Solche Galvanometer sind ungeeignet.

Ferner muß der Kondensator während der Kontaktdauer  $t$  vollständig geladen bzw. entladen werden, d. h. der bei der Ladung vor  $C$  vorgeschaltete Widerstand muß klein bzw.  $t/R \cdot C \ll 1$  sein. Bei der Messung kleiner Kapazitäten ist darauf zu achten, daß der Isolationswiderstand des Kondensators groß ist, zudem ist zur Vermeidung von Meßfehlern eine gute Isolation des Unterbrechers erforderlich.

Als Meßwiderstände werden Widerstandsbüchsen verwendet, deren Temperaturkoeffizienten klein und bekannt sind, in Zweig 2 wird mit ihnen in Reihe ein Präzisionskurbelwiderstand geschaltet, um die Feinabgleichung durchführen zu können, wobei der in dem Kurbelrheostaten eingeschaltete Widerstandswert nur einen kleinen Teil des Gesamtwiderstands betragen soll.

Einer der wichtigsten Teile der Anordnung ist der Unterbrecher, von seinem präzisen Arbeiten hängt die Genauigkeit der ganzen Messung ab. Man hat verschiedene Möglichkeiten für seine Konstruktion, so kann er als rotierender oder auch als Pendelunterbrecher ausgebildet werden. Beide Methoden haben zum Erfolg geführt. Das Wichtigste ist ein vollkommen gleichmäßiges Arbeiten eines solchen Unterbrechers,

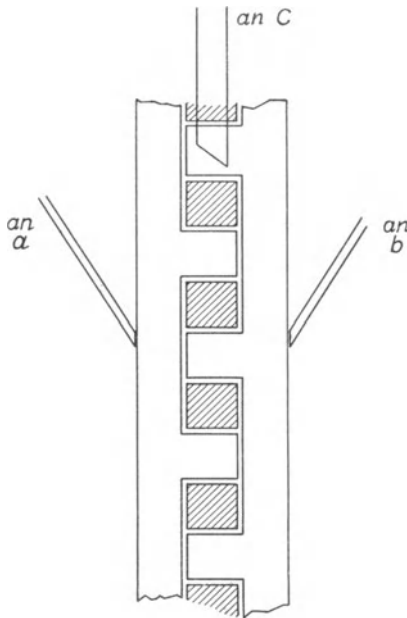


Abb. 32

es ist eine Frequenzkonstanz von weniger als  $1 \cdot 10^{-6}$  des Frequenzwertes anzustreben. Ein rotierender Unterbrecher ist von Jäger und Kurlbaum konstruiert und später von Giebe verbessert worden. Der Apparat (Abb. 32) besteht aus zwei durch eine Isolierplatte getrennten Messingscheiben, die isoliert auf einer gemeinsamen Achse sitzen. Auf dem Umfang jeder der Scheiben sind in gleichem Abstand voneinander und senkrecht zur Scheibenfläche gleichstark rechteckige Zähne angebracht, die nicht ganz bis zur anderen Scheibe reichen. Die Zähne beider Messingplatten sind so gegeneinander versetzt, daß ein Zahn der einen Scheibe stets in die Mitte zwischen zwei Zähne der

anderen Scheibe zu stehen kommt. Dabei frei bleibende Zwischenräume sind bis auf einen 1 mm breiten Luftspalt gegen den nächsten Zahn durch Messingplättchen ausgefüllt, die auf der mittleren Hartgummi-scheibe befestigt sind; sie bilden sogenannte Blindkontakte. Auf jeder der beiden Messingscheiben schleift eine Feder, ebenso auf der Stirnfläche. Dreht sich die Anordnung, so gleitet diese letzte Feder von einem Zahn der einen Scheibe über einen „Blindkontakt“ zu einem Zahn der anderen Scheibe usf. Verbindet man die beiden Seitenfedern mit den Punkten *a* und *b* der Brücke, die Mittelfeder mit dem isolierten System des Kondensators, so wird letzterer in der gewünschten Weise abwechselnd geladen und wieder entladen. Zur Erzielung einwandfreien

Arbeitens müssen Unterbrecherrad und Federn aus dem gleichen Material hergestellt werden, Federstellung und Federdruck sind sorgfältig einzustellen, eine ständige „Schmierung“ der Kontaktstellen mit Petroleum ist angezeigt. Die Spalte zwischen den Kontakten dürfen nicht mit Hartgummi oder ähnlichem Isoliermaterial ausgefüllt sein (Reibungselektrizität!), zur Verlängerung der Kriechwege soll zwischen der Hartgummischeibe und den Messingscheiben ein so nahe als möglich bis zur Achse reichender Luftspalt vorhanden sein, soweit eben die notwendige mechanische Festigkeit der Anordnung das zuläßt. Das fertige Unterbrecherrad ist vor Benutzung überzudrehen, um Unebenheiten und dadurch bedingtes gelegentliches Abheben der Federn zu vermeiden. Dieser Unterbrecher sitzt auf einer gemeinsamen Achse mit einem Nebenschlußmotor als Antriebsmotor und einem Synchronmotor zur Konstanthaltung der Umlaufzahl. Der Synchronmotor wird von einem frequenzstabilisierten Röhrensender gesteuert. Für höchste Ansprüche ist eine Quarzsteuerung des Senders angebracht. Allerdings läßt sich eine direkte Steuerung so niedriger Frequenzen, wie sie bei der absoluten Kapazitätsmessung benötigt werden (bis zu einigen hundert Unterbrechungen pro Sekunde), nicht durchführen. Die Senderfrequenz muß zu diesem Zwecke mit Hilfe von Untersetzungsstufen herabtransformiert werden. (Näheres über derartige Anordnungen siehe z. B. A. Scheibe u. U. Adelsberger, Hochfrequenztechn. u. Elektroak. 43, 37, 1934). Für solche Messungen geeignete Frequenzen höchster Konstanz (Schwankungen  $\ll 1 \cdot 10^{-7}$  des Frequenzwertes) werden seit einiger Zeit von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt durch Vermittlung der Reichspost an Dauerabnehmer ständig geliefert, seit dem Frühjahr 1939 werden außerdem die Frequenzen 1000 und 440 Hertz auch auf drahtlosem Wege über den Deutschlandsender werktätlich von 11 bis 11,12 Uhr ausgestrahlt. Es ist dadurch die Möglichkeit gegeben, die Frequenz des eigenen Meßsenders durch Vergleich mit diesen Frequenzen sehr genau zu bestimmen. Die Einregulierung der Tourenzahl des Unterbrechers auf die durch Synchronmotor und Steuersender gegebene Steuerfrequenz erfolgt durch Änderung der Umlaufzahl des Antriebsmotors so lange, bis Synchronismus eintritt. Man beobachtet das am besten stroboskopisch, oder man schaltet in die die Steuerfrequenz führende Zuleitung zum Synchronmotor ein Milliampere-meter, das beim Eintreten des Synchronismus einen Amplitudensprung zeigt und auch kleine Unregelmäßigkeiten des Umlaufs in der Form von kleinen Ausschlagsschwankungen erkennen läßt.



In früherer Zeit wurde zur Erzielung der Umlaufkonstanz ein von Giebe angegebener sehr empfindlicher Zentrifugaltourenregler benutzt, der eine für viele Zwecke ausreichende Konstanz gewährleistet, jedoch die Genauigkeit der oben beschriebenen Anordnung nicht erreicht, die ihm auch bezüglich einwandfreien Arbeitens und leichter Bedienbarkeit überlegen ist.

Ein Pendelunterbrecher ist von Curtis und Moon beschrieben worden. Eine Stimmgabel wird von einem stabilisierten Röhrensender zu erzwungenen Schwingungen angeregt. An dieser Stimmgabel ist ein Unterbrecher montiert, dessen Feder im Rhythmus der Stimmgabelschwingungen bald den einen, bald den anderen Kontakt berührt, und so den Kondensator lädt und wieder entlädt.

Die mit der Maxwell-Thomson-Brücke erzielbare Meßgenauigkeit beträgt bei sorgfältigstem Aufbau für größere Kapazitäten einige Milliontel ihres Wertes, jedoch nicht über einige Hundertstel  $\mu\mu\text{F}$  hinaus. Kleine Kapazitätsdifferenzen, z. B. zwischen zwei Einstellungen eines Drehkondensators lassen sich u. U. bis auf etwa 0,001  $\mu\mu\text{F}$  genau messen. Die kleinen Kapazitäten und Selbstinduktionen der Widerstände und sonstigen Brückenteile gehen in das Meßresultat nicht ein.

Die mit dieser Methode ermittelten Kapazitätswerte gelten nur für die benutzte Unterbrecherfrequenz, für andere Frequenzen nur bei verlustfreien Kondensatoren. Einzelne Teilkapazitäten lassen sich nicht ohne weiteres messen, wohl kann man sie aber durch Messung der Kombinationen  $k_{12} + k_{10}$ ,  $k_{12} + k_{20}$  und  $k_{12} + \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}}$  (siehe auch S. 82) rechnerisch ermitteln. Direkte Messungen sind u. U. möglich, wenn ein zweiter mit dem ersten synchron laufender Unterbrecher benutzt wird.

### 3. Mittelbare Meßmethoden

a) Vergleich zweier Kapazitäten mit dem ballistischen Galvanometer.  $\alpha$ ) Die unter Abschnitt 2a beschriebenen Methoden zur Absolutmessung einer Kapazität mit dem ballistischen Galvanometer lassen sich auch zum Vergleich zweier Kondensatoren benutzen. Aus dem Verhältnis der Ausschläge  $\alpha$  bei Entladung des bekannten Normalkondensators  $C_1$  und eines zu messenden Kondensators  $C_x$  ergibt sich die Kapazität des letzteren zu

$$(72) \quad C_x = \frac{C_1 \alpha_x}{\alpha_1}.$$

Wegen des Rückstandes verlustbehafteter Kondensatoren erzielt man auch beim Vergleich zweier Kondensatoren nur für verlustfreie Kapazitäten einwandfreie Ergebnisse. Man hat versucht, die entstehenden Fehler durch die Benutzung von besonderen Stromschlüsseln herabzusetzen, die sowohl beim Anschluß des zu messenden wie des Normkondensators den Entladestrom nur eine sehr kurze und in beiden Fällen gleiche Zeitdauer fließen lassen.

β) Eine auf ähnlicher Grundlage aufgebaute Methode stammt von Thomson. Die Schaltung ist in Abb. 33 wiedergegeben. Die Messung geht folgendermaßen vor sich. Zunächst wird der Schalter *a* geschlossen, so daß durch  $R_1$  und  $R_2$  ein Strom fließt und an diesen Widerständen Spannungen  $V_1$  und  $V_2$  nach der Beziehung  $V_1/V_2 = R_1/R_2$  entstehen. Dann werden durch kurzzeitiges Schließen der Schalter *b* und *c*  $C_x$  und  $C_n$  auf die Spannungen  $V_1$  und  $V_2$  aufgeladen. Darauf läßt man  $C_x$  und  $C_n$  ihre Ladungen über *d* ausgleichen und schließlich wird der Schalter *c* geschlossen. Solange  $R_1/R_2$  nicht gleich  $C_n/C_x$  ist, gibt das Galvanometer einen Ausschlag. Das Verhältnis von  $R_1$  zu  $R_2$  wird nun so lange geändert, bis das Galvanometer bei Wiederholung der Schaltungen stromlos bleibt. Dann gilt

$$(73) \quad C_x = \frac{C_n \cdot R_2}{R_1}.$$

Anstelle von  $R_1$  und  $R_2$  kann man natürlich auch  $C_n$  ändern, sofern das möglich ist. Ähnliche Schaltungen sind von Gott und de Sauty angegeben.

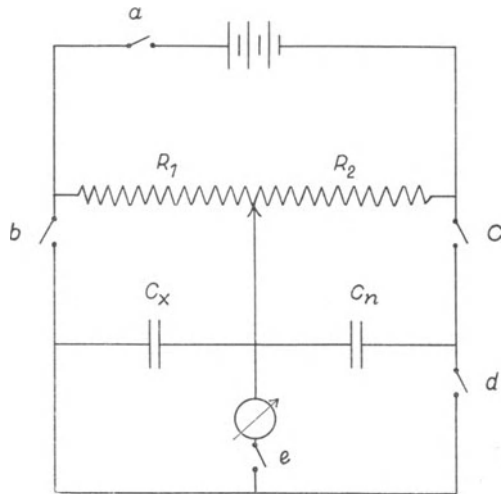


Abb. 33

b) Brückenmethoden. *a) Messungen mit Wechselstrombrücken.* Von allen Vergleichsverfahren zur Bestimmung von Kapazitäten ergeben Messungen in Wechselstrombrücken zweifellos die besten und genauesten Resultate. Die Wechselstrombrücke ist in ihrem äußeren Aufbau mit der Wheatstoneschen Gleichstrombrücke identisch (vgl.

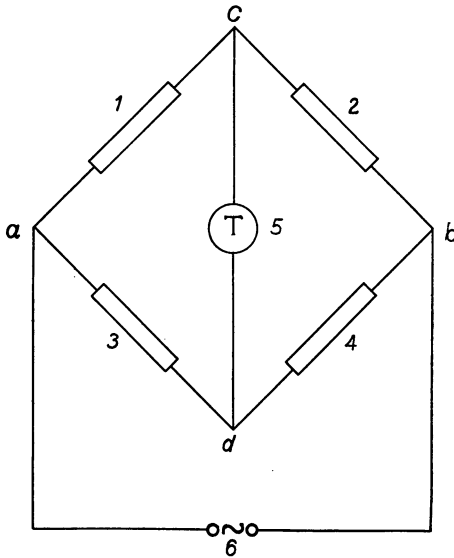


Abb. 34

Abb. 34), mit dem Unterschied, daß jeder der vier Brückenarme außer rein Ohmschen Widerständen auch kapazitive und induktive Widerstände enthalten kann. Zwischen den Punkten *c* und *d* der Brücke besteht keine Spannungsdifferenz, das Indikatorinstrument bleibt also stromlos, wenn die Spannung zwischen *a* und *c* sowohl der Amplitude wie der Phase nach gleich der Spannung zwischen *a* und *d* ist. An die Stelle der Ohmschen Widerstände in der für Gleichstrom gültigen Brückengleichung  $R_1 \cdot R_4$

$= R_2 \cdot R_3$  treten bei Wechselstrom die Widerstandsoperatoren, die Brückengleichung lautet

$$(74) \quad \mathfrak{Z}_1 \cdot \mathfrak{Z}_4 = \mathfrak{Z}_2 \cdot \mathfrak{Z}_3,$$

und da  $\mathfrak{Z} = R' + jB$  ( $R'$  Wirkwiderstand,  $B$  Blindwiderstand), erhält man (durch Trennung von reellen und imaginären Größen) stets zwei Brückenbedingungen, die gleichzeitig erfüllt sein müssen. Dies geschieht durch abwechselnde Abgleichung der beiden Komponenten, indem man also zunächst z. B. die Kapazitäten, danach die Widerstände ändert, dann wieder die Kapazität nachstellt usf., bis ein sauberes Minimum erreicht ist.

*β) Indikatorinstrumente, Wechselstromquellen.* Als Anzeigeeinstrumente kommen in Betracht: das Vibrationsgalvanometer für niedrige Frequenzen bis zu mehreren hundert Hertz, das Telefon für Frequenzen bis zu etwa 6000 Hertz. Das Vibrationsgalvanometer muß auf die

Meßfrequenz abgestimmt werden, es gibt eine Anzahl verschiedener Systeme solcher Galvanometer, auf deren Eigenschaften im Rahmen dieser Abhandlung nicht näher eingegangen werden kann. An Telephonen empfiehlt es sich, solche zu benutzen, die in der Nähe der Meßfrequenz eine Eigenschwingung besitzen, hierdurch kann die Empfindlichkeit außerordentlich gesteigert werden. Weiterhin kommen in Frage Thermokreuze, Detektoren und Oxydgleichrichter in Verbindung mit Gleichstromgalvanometern, sie sind bis zu den höchsten Frequenzen verwendbar. Seit einiger Zeit werden für solche Zwecke auch kleine Braunsche Röhren in Verbindung mit Vorverstärkern hergestellt. Ebenso eignen sich als Nullinstrumente die ursprünglich für optimale Abstimmung von Rundfunkempfängern entwickelten Abstimmanzeigeröhren (auch unter dem Namen „Magisches Auge“ bekannt), bei denen sich mit der Abgleichung der Brücke ein elektronisch gesteuerter Leuchtsektor auf einem Leuchtschirm innerhalb der Röhre ändert. Der Anschluß dieser Abstimmröhren an die Brücke erfolgt über einen angepaßten Verstärker mit symmetrischem Eingang. Die Meßempfindlichkeit ist bei niedrigen Frequenzen etwas geringer als die eines in der gleichen Weise angeschlossenen Telephons, ist aber schon bei Frequenzen von einigen 1000 Hertz der des Telephons überlegen.

Für einwandfreie Messungen ist im allgemeinen eine sinusförmige Stromquelle erforderlich. Hierzu dient am besten ein Röhrensender, der über einen auf die Meßfrequenz abgestimmten Kreis, bestehend aus Selbstinduktion und Kapazität, an die Brücke angekoppelt ist. Durch die Abstimmung werden vorhandene Oberwellen gegenüber der Meßfrequenz weitgehend ausgesiebt. Außerdem ist es zweckmäßig, Primär- und Sekundärseite des Übertragers durch einen geerdeten Schirm voneinander zu trennen.

*γ) Empfindlichkeit der Brücke.* Um die größtmögliche Empfindlichkeit der Brücke zu erreichen, müssen die Impedanzen der vier Brückenzweige  $\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \mathfrak{Z}_3$  und  $\mathfrak{Z}_4$  in bestimmten Verhältnissen zueinander stehen, außerdem müssen die Impedanzen des Indikatorzweiges  $\mathfrak{Z}_5$  und der Wechselstromquelle  $\mathfrak{Z}_6$  „angepaßt“ sein. Bei gegebenem  $\mathfrak{Z}_5, \mathfrak{Z}_6$  und einem zu messenden  $\mathfrak{Z}_1$  erhält man die größte Empfindlichkeit, wenn

$$(75) \quad \mathfrak{Z}_3 = \sqrt{\mathfrak{Z}_5 \mathfrak{Z}_6}, \quad \mathfrak{Z}_2 = \sqrt{\frac{\mathfrak{Z}_1 \mathfrak{Z}_5}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{Z}_5} (\mathfrak{Z}_5 + \mathfrak{Z}_6)},$$

$$\mathfrak{Z}_4 = \sqrt{\frac{\mathfrak{Z}_1 \mathfrak{Z}_6}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{Z}_6} (\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{Z}_5)}.$$

Im allgemeinen wird man in der Lage sein, die Größen  $\mathfrak{Z}_5$  und  $\mathfrak{Z}_6$  von Indikatorkreis und Wechselstromquelle entweder durch Zuschalten von Kapazitäten, Induktivitäten und Widerständen oder durch Anschluß über geeignete Übertrager (Transformatoren) den Brückenbedingungen anzupassen. Man erhält unter allen Umständen die größte Brückenempfindlichkeit, wenn  $\mathfrak{Z}_1 = \mathfrak{Z}_2 = \mathfrak{Z}_3 = \mathfrak{Z}_4 = \mathfrak{Z}_5 = \mathfrak{Z}_6$  ist, d. h. bei einer gleicharmigen Brücke. Bei der Messung kleiner Impedanzen, wie z. B. bei kleinen Spulen, sollen, abgesehen von der geeigneten Wahl der übrigen Zweige, Indikatorzweig und Stromquelle eine geringe Impedanz besitzen („niederohmig“ sein), bei der Messung von kleinen Kapazitäten bei Niederfrequenz, d. h. von hohen Impedanzen, hohe Impedanz besitzen. Eine sehr strenge Erfüllung all dieser Bedingungen ist jedoch zumeist nicht erforderlich.

δ) *Streifelder*. Eine erhebliche Fehlerquelle bei Messungen in Wechselstrombrücken bilden die elektrischen und magnetischen Streifelder der einzelnen Brückenarme gegeneinander und gegen Erde. Sie können u. U. zu völlig falschen Messungen führen oder eine Abgleichung der Brücke überhaupt unmöglich machen. Auf ihre Beseitigung ist daher die größte Sorgfalt zu verwenden, zum mindesten muß man solche Streuungen ihrer Größe nach ermitteln und berücksichtigen können. Magnetische Koppelungen innerhalb der Brücke selbst lassen sich durch Vermeidung unerwünschter Selbstinduktionen weitgehend eliminieren. Solche Selbstinduktionen würden außerdem unmittelbar in die Brückenbedingungen eingehen. Man führt alle Leitungen bifilar, alle Ohmschen Widerstände müssen unbedingt induktionsfrei gewickelt sein. Sind in einer Anordnung mehrere unabgeschirmte Selbstinduktionen als Schaltelemente vorhanden, so sind ihre Windungsflächen so zueinander zu stellen, daß Koppelungen nicht eintreten, d. h. im allgemeinen senkrecht zueinander und in hinreichendem Abstand voneinander, gegebenenfalls sind astatiche Spulen oder Toroidspulen zu benutzen. Die Hauptgefahr besteht in direkten Streuungen des Wechselstromgenerators gegen Selbstinduktionen der Brücke oder gegen den Indikatorkreis. Der Sender muß in größerer Entfernung von der Brücke aufgestellt sein, die Koppelungstransformatoren sind magnetisch abzuschirmen. Man kann dabei das Störfeld entweder durch Anbringung von Schirmen aus Materialien hoher Permeabilität kurzschließen oder man benutzt ein Schirmmaterial guter Leitfähigkeit (Kupfer). Letzteres ist besonders bei höheren Frequenzen wirksam. Bei einiger Achtsamkeit lassen

sich magnetische Streufelder immer beseitigen. Dabei ist auch auf Fremdfelder von anderen nicht zur Anordnung gehörenden Geräten zu achten.

Eine wesentlich größere Sorgfalt erfordern die elektrischen Streufelder. Alle vier Zweige einer un abgeschirmten Brücke, sowie der Wechselstromgenerator und der Indikatorzweig besitzen verteilte Streukapazitäten gegen Erde. Will man mit einer Brücke zu einwandfreien Messungen gelangen, so muß man diese Kapazitäten bezüglich ihrer Lage und Größe definieren, das geschieht am besten durch elektrostatische Abschirmung aller Zweige. Diese Abschirmung allein genügt jedoch keineswegs, man muß vielmehr auch die Potentiale der Schirme gegeneinander und gegen Erde so festlegen, daß die Brückeneinstellungen durch die Schirme nicht unkontrollierbar beeinflusst werden.

Eine in vielen Schaltungen durchführbare Schirmung ist in Abb. 35 wiedergegeben. Werden die Schirme in der dargestellten Weise angeschlossen, so können sich die vier Brückenzweige gegenseitig nicht beeinflussen, zwei der Schirme liegen direkt an Erde, die Streufelder der beiden anderen gegen Erde liegen der ganzen Brücke parallel und

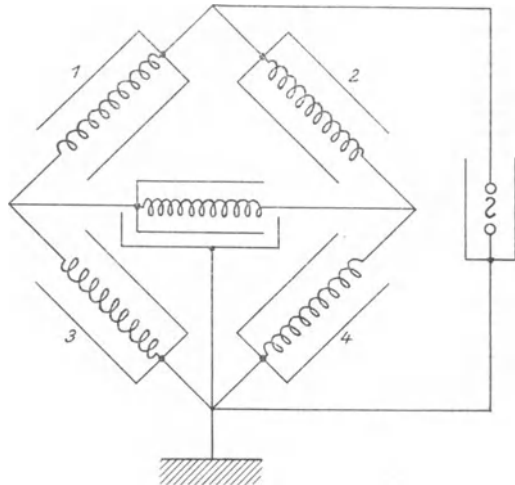


Abb. 35

stören somit das Brückengleichgewicht nicht. Selbstverständlich müssen die Schaltelemente der Brücke einschließlich des durch die Schirme bedingten Einflusses bekannt sein. Ohne Einfluß auf das Brückengleichgewicht ist auch die in Abb. 35 angegebene Schirmung der Stromquelle. Wird der Indikator nur einfach durch den äußeren Schirm abgeschützt, so treten, allerdings definierte, Streukapazitäten auf, die sich parallel zu den Zweigen 3 und 4 legen und die Brückeneinstellung beeinflussen können. Bei gleichzeitiger Benutzung des inneren mit dem Eckpunkt 1/3 verbundenen Schirmes liegt eine solche Kapazität zu 3 parallel und beeinflusst ebenfalls das Brückengleichgewicht. Diese Kapazitäten des

Indikatorzweiges müssen also bei einer direkten Brückenmessung bekannt sein und in Rechnung gesetzt werden. Nähere Angaben über auftretende Teilkapazitäten und ihre Berücksichtigung oder Eliminierung sind bei der speziellen Beschreibung einiger Brückenanordnungen gemacht.

*ε) Der Wagnersche Hilfszweig.* Bei der in Abb. 35 wiedergegebenen Brückenschaltung ist die eine Spannungszuführung geerdet. Dadurch sind zwar alle Streukapazitäten definiert, es besteht aber der Nachteil, daß sich das Telephone auf einem mehr oder weniger hohen Potential

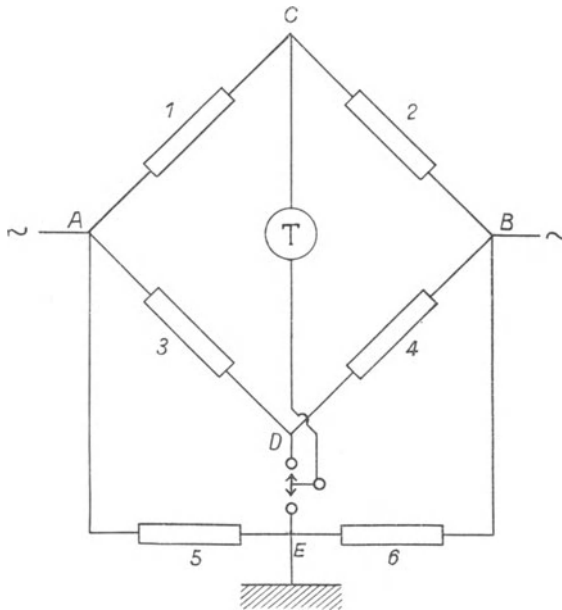


Abb. 36

gegen Erde befindet und dann durch den Körper des Beobachters auch bei einwandfrei abgeglicherer Brücke Erdströme fließen. Das ließe sich vermeiden, wenn man statt einer Spannungszuführung einen Telephoneckpunkt erden würde. Bei einer direkten Erdung würden aber ebenfalls störende Ausgleichströme infolge der in den übrigen Brückenzweigen vorhandenen Erdkapazitäten auftreten. Um dies zu vermeiden, schaltet man nach K. W. Wagner (vgl. Abb. 36) zu den Zweigen 3 und 4 „Hilfszweige“ 5 und 6 parallel, deren Verbindungsstelle geerdet wird. Das

Indikatorinstrument läßt sich abwechselnd an den Eckpunkt 3—4 und 5—6 legen. Die Zweige 5 und 6 müssen so gewählt sein, daß sich die Brücke bei Anschluß des Indikatorzweiges an ihren gemeinsamen Verbindungspunkt  $E$  vollständig abgleichen läßt. Bei der Ausführung einer Messung geht man wie folgt vor: Das Indikatorinstrument liegt zunächst zwischen  $C$  und  $D$ . In dieser Lage wird die Brücke abgeglichen, danach wird der Indikator von  $D$  nach  $E$  umgelegt und die Brücke mit Hilfe von 5 und 6 erneut abgeglichen, darauf erfolgt die Rückschaltung des Indikators auf die Hauptbrücke und diese wird nun noch nachreguliert. Dieser Vorgang ist u. U. mehrmals zu wiederholen. Nach vollständig sauberer Abgleichung der Brücke befinden sich die Punkte  $C$ ,  $D$  und  $E$  auf dem gleichen Potential,  $C$  und  $D$  haben, ohne selbst geerdet zu sein, kein Potential gegen Erde und die Erdkapazitäten der Brückeneckpunkte  $A$  und  $B$  liegen zum Hilfszweig 5, 6 parallel.

ζ) *Substitutionsverfahren*. Eine gewöhnliche Brückenmessung erfolgt etwa in der Weise, daß das unbekannte Element in Zweig 1 geschaltet wird, während die Zweige 2, 3 und 4 bekannte Normale enthalten. Zu sehr genauen Messungen gelangt man bei diesem Verfahren aber nur mit ziemlicher Mühe. Jeder der Zweige besteht aus Kapazität, Selbstinduktion und Widerstand, selbst wenn man in den einen Zweig nur einen Kondensator, in den anderen nur Ohmsche Widerstände einschaltet, denn bereits die Zuleitungen besitzen kleine Widerstände und Selbstinduktionen und haben Kapazitäten gegeneinander oder gegen die Abschirmungen, die Widerstände lassen sich nicht völlig kapazitäts- und selbstinduktionsfrei herstellen. Alle diese zusätzlichen Größen müßten dann als Korrekturen in Rechnung gesetzt werden. Diese Unbequemlichkeiten lassen sich umgehen, wenn man das Substitutionsverfahren anwendet. Dabei wird in Zweig 1 zunächst das unbekannte und zu messende Element eingeschaltet und mit ihm die Brücke abgeglichen. Darauf wird unter Vermeidung irgendwelcher Änderungen in der Leitungsführung oder anderem das Element  $X$  durch das Normal  $N$  im Zweig 1 ersetzt und nun mit diesem, während alle anderen Zweige ungeändert bleiben, die Brücke erneut abgeglichen. Dann ergibt sich  $X$  unmittelbar gleich  $N$ , in Zweig 2 braucht sich obendrein kein Normal höchster Genauigkeit zu befinden, es darf sich nur während der Meßdauer nicht verändern. Kleine Unsymmetrien der Brücke gehen auf diese Weise in das Meßergebnis nicht ein und brauchen also auch nicht bekannt zu sein.



c) Schaltungen.  $\alpha$ ) *Übersicht.* Zur Bestimmung von Kapazitäten und Verlusten von Kondensatoren sind im Laufe der Zeit eine große Anzahl von Brückenmethoden entwickelt worden. Sie alle in ihren meßtechnischen Einzelheiten hier darzustellen, ist wenig zweckvoll, da viele dieser Verfahren Stufen einer fortschreitenden Entwicklung auf dem Gebiete der Brückenmeßtechnik bilden. Einige dieser Anordnungen sollen im folgenden wegen ihrer historischen Bedeutung erwähnt werden, die ausführliche Beschreibung wird jedoch auf wenige heute hauptsächlich benutzte Meßbrücken beschränkt.

Bei der einfachsten Brückenanordnung zum Vergleich zweier Kondensatoren enthalten zwei Brückenarme Kapazitäten und die beiden anderen Ohmsche Widerstände. Der wesentliche Unterschied der Ausführungsformen besteht darin, wie die Kondensatorverluste kompensiert werden. Die ersten Messungen dieser Art sind von Max Wien veröffentlicht worden. Bei der Wienschen Reihenwiderstandsmethode wird der Verlust des unbekanntes Kondensators durch einen mit dem Normalkondensator in Reihe geschalteten Ohmschen Widerstand ausgeglichen. Man kann aber auch zu den beiden Kondensatoren Widerstände parallel schalten und die Brücke durch Ändern dieser Widerstände und des Normalkondensators abgleichen. Eine weitere Möglichkeit, von der Schering, Giebe und Zickner Gebrauch gemacht haben, besteht darin, zu  $R_3$  und  $R_4$  veränderliche Kapazitäten  $C_3$  und  $C_4$  parallel zu schalten. Außerdem ist eine Anzahl von Brückenschaltungen entwickelt worden, bei denen die Kapazität durch Vergleich mit Selbst- oder Gegeninduktionen ermittelt wird.

$\beta$ ) *Messung von Kondensatoren in der Giebe-Zickner-Brücke. Schaltung. Brückenbedingungen.* Von den verschiedenen Kapazitätsmeßbrücken ist die von Giebe und Zickner beschriebene Anordnung, die den Scheringschen Phasenabgleich mittels von Drehkondensatoren benutzt, zur verhältnismäßig schnellen und dabei sehr genauen Messung von Kondensatoren besonders geeignet. Diese Brücke wird seit einiger Zeit von verschiedenen Firmen listenmäßig geliefert, in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt wird sie fast ausschließlich bei der Prüfung von Kondensatoren durch Vergleich mit absolut geeichten Normalkondensatoren benutzt, auch sonst ist sie in den Meßlaboratorien für genauere Messungen allgemein eingebürgert und soll darum eingehender besprochen werden. Das Messen mit dieser Brücke ist insofern besonders einfach, als sie bei Beachtung gewisser Vorsichtsmaßnahmen

auch ohne doppelte Schirmungen und ohne Wagnerschen Hilfszweig zuverlässig arbeitet, sofern das Substitutionsverfahren benutzt wird. Ihre Empfindlichkeit kann durch Vorschalten eines geeigneten Verstärkers vor das Indikatorinstrument erheblich gesteigert werden. Der Meßbereich ist bezüglich der Größe der Kapazitäten praktisch unbegrenzt, als Frequenzbereich kommen etwa 50 bis 100 000 Hertz in Frage.

In Abb. 37 ist das allgemeine Schaltbild der Brücke gegeben. Bei einer direkten Messung von Kapazität und Verlustwinkel befindet sich die unbekannte Kapazität  $C_x$  in Zweig 1, das Normal  $C_n$  in Zweig 2 der Brücke.  $R_3$  und  $R_4$  sind zwei, am besten gleich große, kapazitäts- und induktionsfreie Widerstände. Die durch Verluste in  $C_x$  bedingte Phasenabweichung wird durch einen parallel zu  $R_4$  geschalteten Drehkondensator ausgeglichen. Ist das Normal  $C_n$  nicht verlustfrei, so schaltet man auch zu  $R_3$  einen Drehkondensator parallel. Falls  $C_n$  verlustfrei ist, erhält man als Gleichgewichtsbedingungen der Brücke:

$$(76) \quad \begin{cases} 1. C_n/C_x = R_3/R_4, \\ 2. \tan \delta_x = \omega \cdot C_4 R_4. \end{cases}$$

Dieses direkte Verfahren zur Kapazitäts- und Verlustwinkelmessung eignet sich jedoch für sehr genaue Messungen nicht, da es meist, wie bereits auf S. 55 auseinandergesetzt wurde, nicht gelingen wird, die Widerstände völlig phasenfehlerfrei oder wenigstens vollkommen gleich zu machen und kleine Unsymmetrien im Aufbau der Brücke zu vermeiden. Man verwendet daher das Substitutionsverfahren. In Zweig 1 wird zunächst der zu messende Kondensator  $C_x$  eingeschaltet und die Brücke mit Hilfe eines Kondensators  $C_2$ , der nicht verlustfrei zu sein braucht und dessen

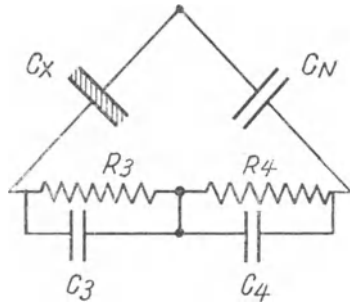


Abb. 37

Kapazität und Verluste auch nicht bekannt sein müssen, sowie mittels  $C_3$  und  $C_4$  abgeglichen. Dann wird  $C_x$  durch einen veränderlichen, am besten verlustfreien Normalkondensator  $C_n$  ersetzt und bei konstant gehaltenem  $C_2$  und  $C_3$  mittels  $C_n$  und  $C_4$  die Brücke erneut abgeglichen. Dann gilt:

$$(77) \quad C_x = C_n \text{ und } \tan \delta_x = \omega R_4 (C_{4x} - C_{4n}) = \omega R_4 \Delta C_4.$$

Zumeist läßt es sich nicht vermeiden, daß während der Messung sowohl zu  $C_x$  wie zu  $C_n$  eine weitere Kapazität  $C_z$  mit dem Verlustwinkel  $\delta_z$

parallel liegt, ein Fall, der schon durch die notwendigen Zuleitungen gegeben ist. Dann ergibt sich

$$(78) \quad C_x = C_n \quad \text{und} \quad \text{tang } \delta_x = \omega R_4 \Delta C_4 \left(1 + \frac{C_z}{C_n}\right).$$

Hat der Normalkondensator  $C_n$  bekannte Verluste  $\delta_n$ , so erhält man

$$(79) \quad \text{tang } \delta_x = \omega \cdot R_4 \cdot \Delta C_4 \left(1 + \frac{C_z}{C_n}\right) + \text{tang } \delta_n.$$

Wurden mehrere Normalkondensatoren  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$ ,  $C_{n3}$ , ... mit den Verlustfaktoren  $\text{tang } \delta_1$ ,  $\text{tang } \delta_2$ ,  $\text{tang } \delta_3$ , ... in Parallelschaltung benutzt, so ist  $\text{tang } \delta_n$  in obiger Formel zu ersetzen durch

$$(80) \quad \text{tang } \delta_n = \frac{C_{n1} \text{tang } \delta_1 + C_{n2} \text{tang } \delta_2 + C_{n3} \text{tang } \delta_3 + \dots}{C_{n1} + C_{n2} + C_{n3} + \dots}.$$

Die bisher abgeleiteten Gleichungen gelten unter der Voraussetzung nicht allzu großer Verluste, bei 800 Hertz bis zu Verlusten von etwa  $\text{tang } \delta_x = 0,1$ . Bei größeren Verlusten, die zumeist als Leitungsverluste zu deuten sein werden, bei denen also ein Ersatz der verlustbehafteten Kapazität durch einen verlustfreien Kondensator mit Parallelwiderstand den Verhältnissen am ehesten gerecht wird, gilt:

$$(81) \quad \begin{cases} \text{tang } \delta_x^* = \text{tang } \delta_x / \gamma \\ C_x^* = C_n \cdot \frac{\gamma}{1 + \omega^2 \cdot R_4^2 \cdot C_4^2}, \end{cases}$$

wo  $\gamma = 1 - \omega R_4 C_4 (\text{tang } \delta_x - \omega R_4 C_4)$  ist. Für  $C_4$  ist der Wert bei der X-Messung einzusetzen. Bestehen Zweifel, ob die genauere Formel bereits anzuwenden ist, so hat man abzuschätzen, ob die Korrektionsglieder dieser Formeln gegen 1 zu vernachlässigen sind oder nicht.

Das Schema des Aufbaues der Brücke einschließlich aller Abschirmungen ist aus Abb. 38 zu ersehen. Die ausgezogenen Linien sind die Leitungen bzw. Schaltelemente, gestrichelt sind die Abschirmungen eingezeichnet. Außerdem sind die mit  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  usw. bezeichneten Teilkapazitäten der Leitungen bzw. Schaltelemente gegen die Abschirmung angegeben. Abweichend von der Skizze sind die vier Brückeneckpunkte nahe beieinander angeordnet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit konnte das in dem Schaltschema nicht zum Ausdruck gebracht werden.

Man sieht nun folgendes: Die Teilkapazitäten  $\alpha$  und  $\beta$  liegen der ganzen Brücke parallel, gehen also überhaupt nicht ein,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  und  $\eta$

liegen zu  $R_3$  und  $C_3$ ,  $\delta$ ,  $\zeta$  und  $\vartheta$  zu  $R_4$  und  $C_4$  parallel, vergrößern also  $C_3$  bzw.  $C_4$ . In Anbetracht des symmetrischen Aufbaus der Brücke werden die jeweils gleichartigen Teilkapazitäten nahezu gleich groß sein und bei Anwendung des Substitutionsverfahrens keinen Anlaß zu Meßfehlern geben,  $\beta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\delta$  und  $\zeta$  sind zudem während der Messung unveränderlich. Eine gewisse Sorgfalt muß allerdings bei der Herstellung der Abschätzung des Indikatorzweiges walten. So müssen die Leitungen zum Hörer in einem Metallschlauch sehr fest liegen, da sich sonst während der Messung die Kapazitäten  $\eta$  und  $\vartheta$  ändern können, und da diese zu  $C_3$  und  $C_4$  parallel liegen, würden die Verlustmessungen fehlerhaft werden.

Bei Verlustmessungen hat man außerdem ganz allgemein noch folgendes zu beachten: Der Verlustfaktor  $\tan \delta_x$  ist im wesentlichen durch  $\omega R_4 \Delta C_4$  gegeben. Man wird einen Verlust um so genauer bekommen, je größer  $\Delta C_4$  ist. Bei gegebenem  $\omega$  wird  $\Delta C_4$  um so größer, je kleiner man  $R_4$  (und damit natürlich bei gleicharmiger Brücke auch  $R_3$ ) wählt. Allerdings wird das Minimum im Indikatorzweig mit abnehmendem  $R$  breiter, so daß schließlich

ein Kompromiß getroffen werden muß. Auch aus anderen Gründen, auf die noch bei der Beschreibung gewisser Messungen zurückzukommen ist, wählt man möglichst niedrige Widerstände in  $R_3$  und  $R_4$ . Mit zunehmender Frequenz und bei konstantem  $R_4$  wird der Betrag von  $\Delta C_4$  für den gleichen Verlust ständig kleiner, auch dann wird man zu immer kleinerem  $R_4$  übergehen müssen, um nicht an Meßgenauigkeit einzubüßen. Bei höheren Frequenzen sind u. U. auch schon bei mittleren Verlustwinkeln die genaueren Formeln (81) anzuwenden, da die in ihnen auftretenden Korrektionsglieder wegen  $\omega^2$  oft nicht mehr gegen 1 zu vernachlässigen sind.

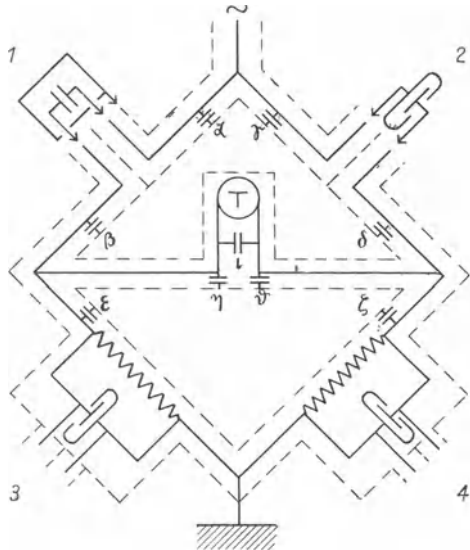


Abb. 38. Giebe-Zickner-Brücke: Teilkapazitäten

Bei der Ausführung der Messungen geht man am besten so vor, daß man den zu untersuchenden Kondensator mit einem Klemmenpaar in Zweig 1 verbindet, während an ein zweites Klemmenpaar ein Teller zum Aufsetzen der Normalkondensatoren angeschlossen wird. Die Kapazität des Tellers ist bei der Berechnung des Verlustfaktors von  $C_x$  in  $C_z$  zu berücksichtigen. Bei kleinen Verlustfaktoren ist es zweckmäßig, zu  $C_4$  noch einen Normaldrehkondensator parallel zu schalten, da der in die Brücke eingebaute Kondensator oft zu grob ist. Es ist auch auf richtigen Anschluß des Gehäuses der Kondensatoren zu achten, da sonst durch Streukapazitäten Meßfehler entstehen.

Im folgenden sollen die verschiedenen Meßmöglichkeiten näher besprochen werden (Das Telephon ist in den Figuren weggelassen):

1. Messung eines Kondensators, dessen eines System mit dem Gehäuse verbunden ist (Abb. 39). *X*-Messung: Die mit dem Gehäuse verbundene Klemme wird an den Spannungseckpunkt (kurz an Spannung), die andere Klemme an den Telephoneckpunkt gelegt, die Teilkapazität des Kondensatorgehäuses gegen Erde liegt der ganzen Brücke parallel, geht also in das Ergebnis nicht ein.

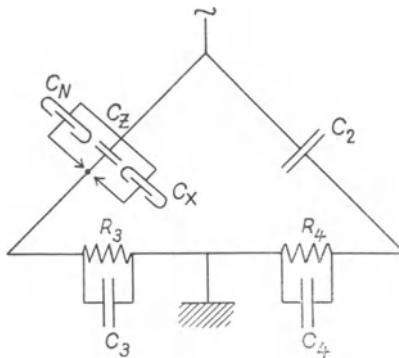


Abb. 39

*N*-Messung: Die zum Telephoneckpunkt führende Zuleitung von *X* wird von der Klemme des Kondensators so abgenommen, daß sich ihre Lage sonst nicht ändert. Der Normalkondensator wird auf einen bereits bei der *X*-Messung angeschlossenen

Teller aufgesetzt und abwechselnd mit  $C_4$  solange verändert, bis die Brücke wieder abgeglichen ist. *X* und *N* müssen mit ihren Gehäusen am gleichen Brückeneckpunkt, in diesem Falle also an Spannung liegen.

2. Abgeschützter Kondensator, beide Systeme sind vom Gehäuse isoliert (Abb. 40). Der Kondensator hat drei Teilkapazitäten  $k_{12}$ ,  $k_{10}$ ,  $k_{20}$ .

Messung von  $k_{12}$ . *X*-Messung: Klemme 1 an Spannung, 2 an Telephon, Gehäuse (0) an Erde. Es liegt  $k_{10}$  zur Brücke parallel,  $k_{20}$  parallel zu  $C_3$ . *N*-Messung: Die Zuleitung zu Klemme 2 wird wie unter 1

behandelt. *X*-Messung: Klemme 1 an Spannung, 2 an Telephon, Gehäuse (0) an Erde. Es liegt  $k_{10}$  zur Brücke parallel,  $k_{20}$  parallel zu  $C_3$ . *N*-Messung: Die Zuleitung zu Klemme 2 wird wie unter 1

abgenommen, der Normalkondensator auf den Teller, mit Gehäuse an Spannung, aufgesetzt und die Brücke abgeglichen. Nach der Abschaltung von  $X$  liegt  $k_{20}$  nicht mehr parallel zu  $C_3$ , sondern in Reihe mit  $k_{12}$  zur ganzen Brücke parallel.  $\Delta C_4$  ist somit um den Betrag von  $k_{20}$  zu groß eingestellt, d. h., um den Verlustfaktor von  $k_{12}$  zu bekommen, muß  $\Delta C_4$  um  $k_{20}$  verkleinert werden.  $k_{20}$  muß zu diesem Zwecke gesondert bestimmt werden.

Messung von  $k_{20}$  bei kleinem  $k_{12}$  (Abb. 41).  $X$ -Messung: Gehäuse (0) an Spannung, 1 an Erde, 2 an Telephon. Dann liegt  $k_{10}$

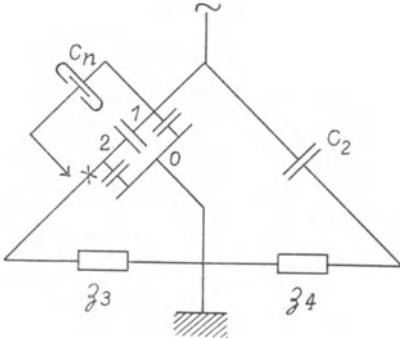


Abb. 40

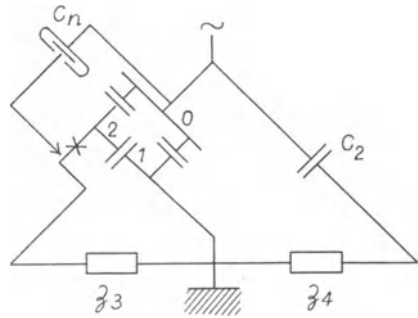


Abb. 41

zur Brücke parallel, geht also in die Messung nicht ein, während  $k_{12}$  zu  $C_3$  parallel liegt.  $N$ -Messung: Abnahme von  $X$  an Klemme 2,  $N$  wird mit dem Gehäuse an Spannung auf den Teller aufgesetzt. Dann verschwindet  $k_{12}$  aus  $C_3$ , d. h. bei der Verlustbestimmung ist  $\Delta C_4$  um  $k_{12}$  zu verkleinern.

Messung von  $k_{20}$  bei großem  $k_{12}$  (Abb. 42). Wenn man genau so wie oben verfährt, wird die Verlustmessung ungenau, da  $\Delta C_4$  um  $k_{12}$  zu verkleinern ist, in diesem Falle also die Differenz zweier großer Zahlen auftreten würde.

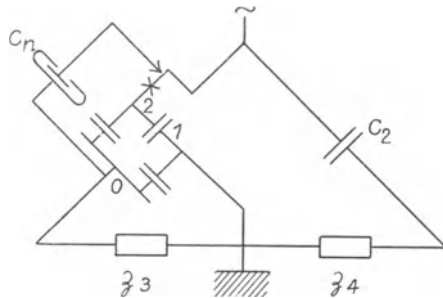


Abb. 42

$X$ -Messung: Man schaltet 0 an Telephon, 2 an Spannung und 1 an Erde.  $N$ -Messung: Abgenommen wird  $X$  wieder an seiner Klemme 2, d. h. aber dieses Mal an der Zuleitung

vom Spannungseckpunkt. Würde man am Telephoneckpunkt abnehmen, so würde man außer dem bekannten  $k_{10}$  auch die unbekannte und nicht zu vernachlässigende Streukapazität des Gehäuses gegen Erde, die beide bei der  $X$ -Messung zu  $C_3$  parallel liegen, abschalten, und  $\Delta C_4$  wäre um diesen Betrag gefälscht. Das Gehäuse des Normalkondensators muß sowohl bei der  $X$ -Messung wie bei der  $N$ -Messung angeschlossen bleiben, und zwar wird es am besten an den Telephoneckpunkt gelegt, wie das Gehäuse von  $X$ . Dann sind Streukapazitäten zwischen den beiden

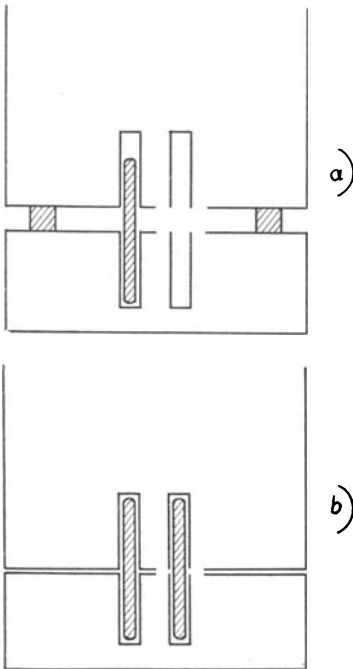


Abb. 43

Hüllen nicht möglich. Schließt man das Gehäuse von  $N$  nicht schon bei der  $X$ -Messung an, so ändern sich zwischen  $X$ - und  $N$ -Messung die Streukapazitäten zwischen der Hülle von  $N$  und Erde bzw. auch gegen  $C_2$  und sowohl die Kapazitätsmessung wie auch die Verlustmessung werden gefälscht. Den Anschluß des Gehäuses kann man leicht dadurch ermöglichen, daß man zwischen Teller und  $N$  drei kleine Distanzstücke bringt (vgl. Abb. 43) und den Verbindungsstecker zwischen den beiden mit den Hüllen verbundenen Systemen einsteckt, während der Stecker, der die isolierten Systeme miteinander verbindet, zunächst entfernt ist und erst bei der  $N$ -Messung nach Entfernung der Distanzstücke eingesteckt wird. Bei dieser Methode liegt während der  $X$ -Messung  $k_{12}$  zur Brücke und  $k_{10}$  zu  $C_3$  parallel. Bei der  $N$ -Messung bleibt  $k_{10}$  parallel zu  $C_3$ , wozu aber nun noch

eine Reihenschaltung von  $k_{12}$  und  $k_{20}$  kommt. In diesem Falle ist  $\Delta C_4$  somit zu klein gemessen, es muß um  $\frac{k_{20} \cdot k_{12}}{k_{12} + k_{20}}$  vergrößert werden.

Die Messung von  $k_{10}$  erfolgt in der gleichen Weise wie von  $k_{20}$ , es sind lediglich die Anschlüsse von 1 und 2 zu vertauschen. Im ersten Falle, bei kleinem  $k_{12}$ , ist  $\Delta C_4$  wieder um  $k_{12}$  zu verkleinern, während

bei der Messung nach dem zweiten Verfahren  $\Delta C_4$  um  $\frac{k_{10} \cdot k_{12}}{k_{12} + k_{10}}$  zu vergrößern ist.

Beträgt die Kapazität von  $k_{12}$  etwa 1  $\mu\text{F}$  und mehr, so kann diese Methode bei Messungen ohne Verstärker manchmal zu Schwierigkeiten führen, weil die an die Brücke angelegte Spannung durch  $k_{12}$  stark geschuntet ist und die Meßempfindlichkeit dadurch zu gering wird. Man kann daher auch so vorgehen, daß man das Gehäuse an Spannung und die Klemmen 1 und 2 an Telephone und Erde bzw. umgekehrt anlegt. Beim Übergang von der  $X$ - zur  $N$ -Messung wird das Gehäuse an Spannung abgenommen.  $\Delta C_4$  ist dann um  $\frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}}$  zu vergrößern.

Diese Methode hat wieder den Nachteil, daß man zum Ausgleich von  $k_{12}$  in  $C_4$  sehr große Kapazitäten benötigt, und daß dadurch das Minimum ziemlich breit wird.

3. Messung der Betriebskapazität eines abgeschützten Kondensators. Die Betriebskapazität  $k_{12} + \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}}$  läßt sich in der Brücke nicht unmittelbar messen. Man könnte vielleicht so vorgehen wollen, daß man das Gehäuse des Kondensators nirgends anschließt und nun z. B. am Telephoneckpunkt beim Übergang von der  $X$ - zur  $N$ -Messung abnimmt. Da das Gehäuse dann nicht auf Erdpotential ist, so hat es noch eine Kapazität gegen Erde, die zuweilen als  $k_{00}$  bezeichnet wird. Unter Benutzung der Formeln (34) für die Stern-Dreieckstransformation sieht man, daß man an Stelle der gewünschten Betriebskapazität die Kapazität

$$(82) \quad k_{12} + \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20} + k_{00}}$$

erhält, während  $\Delta C_4$  um den Betrag  $\frac{k_{20} \cdot k_{00}}{k_{10} + k_{20} + k_{00}}$  zu groß gemessen wird. Man geht in diesem Falle so vor, daß man die drei Teilkapazitäten für sich nach dem oben angegebenen Verfahren bestimmt und die Betriebskapazität und ihren Verlustwinkel aus diesen Einzelwerten berechnet.

4. Messung eines nicht abgeschützten Kondensators. Ist ein Kondensator nicht abgeschützt, so hat nur die Kapazität  $k_{12}$  einen



einigermaßen definierten Wert, während  $k_{10}$ ,  $k_{20}$  und seine Betriebskapazität von der Lage zur Umgebung abhängig sind. Zur Messung von  $k_{12}$  legt man bei der  $X$ -Messung den Kondensator in Zweig 1, bei der  $N$ -Messung wird an Telephone abgenommen, das Gehäuse von  $N$  muß schon bei der  $X$ -Messung angeschlossen sein wie unter 2 (Abb. 43). Die eine Teilkapazität liegt zur Brücke parallel, die andere aber bei der  $X$ -Messung zu  $C_3$ , man bekommt also ein zu großes  $\Delta C_4$ . Der hierdurch bei der Bestimmung von  $\tan \delta$  gemachte Fehler wird um so kleiner, je kleiner man  $R_3$  und  $R_4$  wählt, da dann  $\Delta C_4$  sehr groß wird und der von  $\Delta C_4$  abzuziehende (von den Widerständen  $R_3$  und  $R_4$  unabhängige) Betrag nur noch eine verhältnismäßig kleine Korrektur bedeutet. Selbstverständlich kann man auch  $k_{12}$  und  $\tan \delta_{12}$  exakt messen, wenn man den Kondensator in ein Blechgehäuse stellt und nun die Teilkapazität  $k_{20}$  gesondert bestimmt.

5. Messung sehr kleiner Kapazitäten. Bei den bisher beschriebenen Messungen wurde beim Übergang von der  $X$ - zur  $N$ -Messung einfach die eine Zuleitung zu  $X$  von  $X$  gelöst. Bei der Messung sehr kleiner Kapazitäten führt dieses Verfahren zu Fehlern, da an der Unterbrechungsstelle eine, wenn

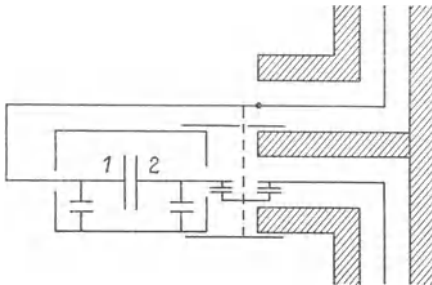


Abb. 44

auch sehr kleine Kapazität in Erscheinung tritt, die sich dann bei der  $N$ -Messung in Reihe mit der zu messenden Kapazität  $C_x$  parallel zu  $C_n$  legt. Außerdem kann auch die bei der Abnahme der Zuleitung notwendigerweise auftretende kleine Lageänderung dieser Zuleitung zu kleinen Änderungen der Zuleitungs-

kapazität führen. Man geht bei sehr kleinen Kapazitäten wie folgt vor (Abb. 44): Die Zuleitung des unbedingt sehr sauber abgeschützten Kondensators zum Telephoneckpunkt der Brücke wird durch ein metallisches Rohr, das einen parallel zum Rohrquerschnitt bis zur Rohrhälfte reichenden schmalen Schlitz hat, so abgeschirmt, daß es zugleich die Schirmung des Brückenanschlusses mit der Hülle des Kondensators verbindet und letztere somit erdet. Durch den Schlitz läßt sich ein in das Rohr gut passender Schieber einsetzen. Die Zu-

leitung von der Brücke zum Apparat wird am besten als zugespitzter fester Stift ausgebildet, der durch Andrücken an den Kondensatoranschluß Kontakt macht. Bei der  $X$ -Messung ist der Schieber entfernt, mit dem Stift wird Kontakt gemacht und die Brücke abgeglichen. Danach wird  $C_x$  ein wenig zurückgezogen, so daß der Kontakt unterbrochen ist und der Schieber wird eingeschoben, er darf jedoch keine der unterbrochenen Zuführungen berühren. Die Abschirmung bleibt natürlich unverändert bestehen. Die Brücke wird erneut abgeglichen.  $k_{10}$  liegt der ganzen Brücke,  $k_{20}$  bei der  $X$ -Messung zu  $C_3$  parallel, bedingt also eine Korrektur von  $\Delta C_4$  um diesen Betrag. Die kleine bei der  $N$ -Messung zu  $C_3$  parallel auftretende Kapazität zwischen Brückenanschluß und Schieber wird für die Verlustmessung bei Benutzung von kleinen Brückenwiderständen belanglos sein. Bei der Messung kleiner Kapazitäten muß man ganz besonders darauf achten, daß sich vorhandene Streukapazitäten zwischen  $N$ - und  $X$ -Messung nicht ändern. Der Ersatz von  $X$  durch  $N$  kann hier nicht mehr durch Zusatz von Normalkondensatoren erfolgen, sondern man hat einen bei der  $X$ - und  $N$ -Messung zugeschalteten

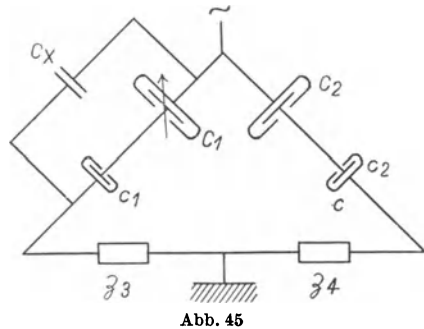


Abb. 45

Drehkondensator zu benutzen, dessen Steigungsverhältnis hinreichend klein ist. Man kann sich mit Erfolg auch der Drehkondensatoren ohne Anfangskapazität in  $k_{12}$  bedienen (siehe II, 3 b  $\beta$ ), die natürlich auf einen für sie geeigneten Teller gesetzt werden müssen, dessen Teilkapazität  $k_{12}$  ebenfalls Null ist.

Die oben angegebene Methode zur Messung kleiner Kapazitäten setzt voraus, daß hinreichend genau bekannte Kapazitätsnormale von solch kleiner Größe zur Verfügung stehen. Die absolute Messung von Kapazitäten unter  $0,01 \mu\text{F}$  bereitet aber bereits einige Schwierigkeiten, oft ist man darauf angewiesen, Kapazitätsvarioren zu benutzen und anzunehmen, daß die Kapazitätsdifferenz zwischen zwei wenig voneinander verschiedenen Einstellungen mit ausreichender Genauigkeit berechenbar ist. Diese Schwierigkeiten hat Hartshorn vermieden durch Anwendung von Reihenschaltungen von Kondensatoren in der Schering-Brücke, vgl. Abb. 45. In Zweig 1 wird der zu

messende kleine Kondensator  $C_x$  eingeschaltet, parallel zu ihm liegt eine Reihenschaltung aus einem Festkondensator von z. B.  $1000 \mu\mu\text{F}$ , einem solchen von  $10000 \mu\mu\text{F}$  und zu letzterem parallel ein Drehkondensator. Einer Änderung des Drehkondensators um  $1 \mu\mu\text{F}$  entspricht eine Änderung der Gesamtkapazität des Zweiges 1 um etwa  $0,01 \mu\mu\text{F}$ . Zweig 2 enthält eine gleichartige Reihenschaltung wie Zweig 1. Durch Wahl anderer Abmessungen der Kondensatoren läßt sich der Meßbereich beliebig ändern, so daß man stets Drehkondensatoren verwenden kann, die in ihren Werten hinreichend bekannt sind. Die Abgleichung der Brücke erfolgt zunächst mit eingeschaltetem und danach bei abgenommenem  $C_x$ . Hierbei sind die gleichen Vorsichtsmaßregeln zu beachten, wie sie oben bei der Messung kleiner Kapazitäten beschrieben sind.  $C_x$  ergibt sich zu

$$(83) \quad C_x = \frac{c_1 \cdot C_{12}}{c_1 + C_{12}} - \frac{c_1 C_{11}}{c_1 + C_{11}},$$

wenn  $C_{11}$  die Kapazität der variablen Komponente der Reihenschaltung bei eingeschaltetem  $C_x$  und  $C_{12}$  bei abgeschaltetem  $C_x$  bedeutet. Die Messung kleinster Kapazitäten erfordert sorgfältige Abschätzung der Anordnung, da Körperkapazitäten u. U. sehr störend werden können.

6. Messung sehr großer Kapazitäten (Abb. 46). Die Messung großer Kapazitäten läßt sich auf eine normale Kapazitätsmessung zurückführen, wenn man die zu messende Kapazität mit einem bekannten Festkondensator in Reihe

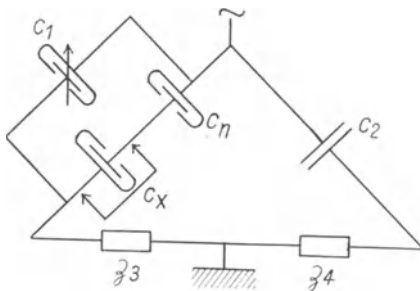


Abb. 46

und parallel zu dieser Reihenschaltung einen geeigneten Drehkondensator in Zweig 1 legt. Das Gehäuse von  $N$  und das des Drehkondensators kommen an Spannung, das Gehäuse von  $X$  an Telephone; bei sehr großen Kapazitäten wird man zumeist bei der Messung eine Belegung mit dem Gehäuse verbinden können. Der Kondensator  $C_2$  muß etwa die

gleiche Größe wie  $C_n$  haben, braucht aber wiederum nicht bekannt zu sein. Bei der  $X$ -Messung wird die Brücke mit Hilfe von  $C_1$  und  $C_4$  abgeglichen. Dann wird  $C_x$  kurzgeschlossen und die Brücke mittels  $C_1$

und  $C_4$  erneut abgeglichen, wobei  $C_1$  und  $C_4$  gegenüber ihrer Einstellung bei der  $X$ -Messung zu verkleinern sind. Betragen ihre Änderungen  $\Delta C_1$  und  $\Delta C_4$ , so gilt:

$$(84) \quad C_x = C_n \left( \frac{C_n}{\Delta C_1} - 1 \right) \quad \text{und} \quad \tan \delta_x = \omega \cdot R_4 \Delta C_4 \frac{C_n}{\Delta C_1} + \tan \delta_n.$$

Die Meßgenauigkeit hängt, wie man sieht, von dem Verhältnis von  $C_n$  zu  $\Delta C_1$  ab, das um so größer wird, je größer das Verhältnis von  $C_x$  zu  $C_n$  ist. Für  $C_x = 100 C_n$  läßt sich eine Meßgenauigkeit von etwa 1 % für  $C_x$  erreichen.

Ein anderes Verfahren zur Messung großer Kapazitäten ist auf S. 70 beschrieben.

7. Messung eines Schutzringkondensators (Abb. 47). Zur Bestimmung von Dielektrizitätskonstanten wird vielfach der Schutzringkondensator benutzt, d. h. das zu untersuchende Material, in der Regel eine ebene Platte, trägt auf der einen Seite eine volle Belegung (1), auf der anderen Seite befindet sich

eine kreisförmige Belegung (2), die von einem durch einen schmalen Schlitz von ihr getrennten leitenden Ring, der Belegung (0), umgeben ist. Sind Ring und innere Belegung nahezu auf dem gleichen Potential, so ist der Feldverlauf von der Belegung (1) durch die Platte hindurch zur Belegung (2) praktisch homogen. Der Plattenteil mit inhomogenem Feldverlauf (Teilkapazität  $k_{10}$ ) kann der

ganzen Brücke parallel geschaltet werden, so daß er die Messung nicht stört. Ein eventueller Kraftlinienfluß durch Luft von (2) nach (1), also um die Platte außen herum, kann dadurch verhindert werden, daß über (2) ein auf (0) aufsitzender Metalltopf mit einer kleinen Öffnung zur Durchführung der Zuleitung zu (2) angeordnet wird, der somit auf dem gleichen Potential wie 0 ist. Bei der  $X$ -Messung kommt Belegung (1) an Spannung, Belegung (2) an Telefon und Belegung (0) an Erde. Da es sich praktisch nicht erreichen läßt, daß 2 und 0 auf genau dem gleichen Potential sind, so tritt zwischen 2 und 0 eine Kapa-

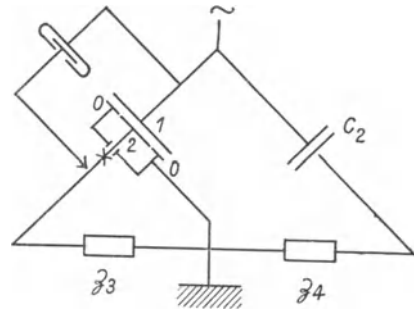


Abb. 47

zität  $k_{20}$  auf, die sich in der Brücke zu  $\mathfrak{Z}_3$  parallel legt. Beim Übergang zur  $N$ -Messung schaltet man  $C_x$  am Telephoneckpunkt ab. Dabei verschwindet die Kapazität  $k_{20}$  aus  $\mathfrak{Z}_3$ , sie ist daher bei der Ermittlung des Verlustfaktors von dem eingestellten  $\Delta C_4$  zu subtrahieren. Die Streukapazität der Hülle des Normalkondensators gegen die Abschirmung der Belegung 2 des Schutzringkondensators liegt der ganzen Brücke parallel und geht somit in die Messung nicht ein.

8. Genaue Eichung eines Kondensatorsatzes. Für Messungen von Kapazitäten nach den zuvor beschriebenen Verfahren benötigt man einen ganzen Satz von verlustfreien und frequenzunabhängigen Normalluftkondensatoren; gebräuchlich sind die folgenden Größen: 10, 20, 30, 40, 100, 200, 300, 400, 1000, 2000, 3000, 4000, 10000, 20000, 30000, 40000 und 100000  $\mu\mu\text{F}$ . Daneben werden veränderliche Kondensatoren benutzt. Da die absolute Eichung aller dieser Kondensatoren in der Maxwell-Brücke (III, 2c) sehr zeitraubend ist, pflegt man nicht alle diese Einheiten absolut zu messen, sondern man beschränkt sich auf die Absolutmessung eines Festkondensators von 100000  $\mu\mu\text{F}$  und eines Drehkondensators von etwa 0,5  $\mu\mu\text{F}$  Steigung pro Grad. Der Anschluß der anderen Kondensatoren erfolgt durch einen sukzessiven Vergleich mit diesem Festkondensator in der Giebe-Zickner-Brücke. Man geht dabei so vor, daß man mit dem Kondensator  $N = 100 \mu\mu\text{F}$  die Summe  $10 + 20 + 30 + 40 \mu\mu\text{F} = N_1$  vergleicht. Es ergibt sich dann  $N_1 = N + \Delta_1$ , wobei  $\Delta_1$  die Änderung des Drehkondensators beim Übergang von der  $N$ - zur  $N_1$ -Messung in der Brücke bedeutet. Mit der Summe von  $N$  und  $N_1$  wird  $N_2 = 200 \mu\mu\text{F}$  verglichen usw. Man bekommt dann folgendes Schema:

$$\begin{aligned}
 \text{Nennwert } 100 \mu\mu\text{F: } N_1 &= N + \Delta_1, \\
 200 \mu\mu\text{F: } N_2 &= N_1 + N + \Delta_2 = 2N + \Delta_1 + \Delta_2 \\
 300 \mu\mu\text{F: } N_3 &= N_2 + N + \Delta_3 = 3N + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \\
 400 \mu\mu\text{F: } N_4 &= N_3 + N + \Delta_4 = 4N + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \\
 1000 \mu\mu\text{F: } N_{10} &= N + N_2 + N_3 + N_4 + \Delta_{10} = 10N + 3\Delta_1 \\
 &\quad + 3\Delta_2 + 2\Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_{10} = 10N + \Sigma\Delta + \Delta_{10} \\
 2000 \mu\mu\text{F: } N_{20} &= N_{10} + N + N_2 + N_3 + N_4 + \Delta_{20} \\
 3000 \mu\mu\text{F: } N_{30} &= N_{20} + N_{10} + \Delta_{30} \\
 4000 \mu\mu\text{F: } N_{40} &= N_{30} + N_{10} + \Delta_{40} \\
 10000 \mu\mu\text{F: } N_{100} &= N_{10} + N_{20} + N_{30} + N_{40} + \Delta_{100} \\
 &= 100N + 10\Sigma\Delta + \Sigma\Delta' + \Delta_{100} \\
 20000 \mu\mu\text{F: } N_{200} &= N_{100} + N_{10} + N_{20} + N_{30} + N_{40} + \Delta_{200} \\
 30000 \mu\mu\text{F: } N_{300} &= N_{200} + N_{100} + \Delta_{300} \\
 40000 \mu\mu\text{F: } N_{400} &= N_{300} + N_{100} + \Delta_{400} \\
 100000 \mu\mu\text{F: } N_{1000} &= 1000N + 100\Sigma\Delta + 10\Sigma\Delta' + \Sigma\Delta'' + \Delta_{1000},
 \end{aligned}$$

wenn

$$\begin{aligned}\Sigma \Delta &= 3 \Delta_1 + 3 \Delta_2 + 2 \Delta_3 + \Delta_4 \\ \Sigma \Delta' &= 7 \Delta_{10} + 3 \Delta_{20} + 2 \Delta_{30} + \Delta_{40} \\ \Sigma \Delta'' &= 7 \Delta_{100} + 3 \Delta_{200} + 2 \Delta_{300} + \Delta_{400}\end{aligned}$$

bedeuten.

Aus der Beziehung für 100 000  $\mu\mu\text{F}$  läßt sich  $N$  mittels dieses absolut gemessenen Kondensators und den aus der Eich-tabelle des Drehkondensators zu entnehmenden  $\Delta$ -Beträgen bestimmen und danach die Kapazität jedes Elementes berechnen. Will man sicher sein, daß kein Fehler unterlaufen ist, so kann man auch noch  $N$  unmittelbar absolut messen. Die kleinen Einheiten unter 100  $\mu\mu\text{F}$  lassen sich in ähnlicher Weise auf  $N$  zurückführen, während die großen Kapazitäten unmittelbar mit dem 100 000  $\mu\mu\text{F}$ -Kondensator verglichen werden. Die bei Benutzung eines solchen Aufbaues erzielbare Meßgenauigkeit beträgt nach Angaben von Giebe und Zickner für 100 000  $\mu\mu\text{F}$  0,01<sup>0</sup>/<sub>00</sub>, für 10 000  $\mu\mu\text{F}$  0,05<sup>0</sup>/<sub>00</sub>, für 1000  $\mu\mu\text{F}$  0,1<sup>0</sup>/<sub>00</sub> und für 100  $\mu\mu\text{F}$  0,5<sup>0</sup>/<sub>00</sub>. Solche Genauigkeiten sind jedoch nur bei Verwendung von Normal-kondensatoren zu erreichen, die ähnlich wie die Modelle der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt gebaut sind und mit Hilfe besonderer Unter-sätze an die Meßanordnung angeschlossen werden, d. h. die Kondensatoren müssen sich ohne zusätzliche Schaltkapazitäten zusammensetzen lassen. Bei kleinen Kapazitäten hat man auf die Streuungen an den Anschlußbuchsen Rücksicht zu nehmen. Mißt man z. B. bei dem hier beschriebenen Kapazitätsaufbau so, daß der Kondensator auf einem Teller sitzt, seine oberen Buchsen aber frei sind, so treten an letzteren Kraftlinienstreuungen auf, ein Teil der Kraftlinien vom Gehäuse zu der mit dem isolierten System in Verbindung stehenden Buchse verläuft mehr oder weniger gekrümmt durch die umgebende Luft. Setzt man einen anderen Festkondensator gleicher Bauart auf, so verschwinden die Streuungen an der bisherigen Stelle und treten nun in der gleichen Weise an dem freien Ende des zugesetzten Kondensators auf. Ist jeder der Kondensatoren einzeln mit nach oben freier Streuung gemessen, so ergibt die Kombination beider durch Auf-einandersetzen einen von der berechneten Summe etwas abweichenden Betrag. Der Wert des einzelnen Kondensators wird auch etwas anders, wenn man auf ihn einen Drehkondensator setzt, der so-mit die Streuung aus den oberen Buchsen des Festkondensators verhindert. Diese Änderungen betragen allerdings meist nur einige 0,01  $\mu\mu\text{F}$ .

*γ) Die Hochspannungsbrücke nach Schering.* Die in Abschnitt 3, c, *β* beschriebene Kapazitätsmeßbrücke bedarf einer Abänderung, wenn die Ladeströme der Kondensatoren sehr groß werden, d. h. bei Anlegung hoher Spannung an die zu messenden Kondensatoren oder bei Einschaltung sehr großer Kondensatoren. In der normalen Schaltung würden dann Überlastungen der Brückenwiderstände auftreten. Das Schaltbild zeigt Abb. 48. In dieser abgeänderten Anordnung ist  $R_3$

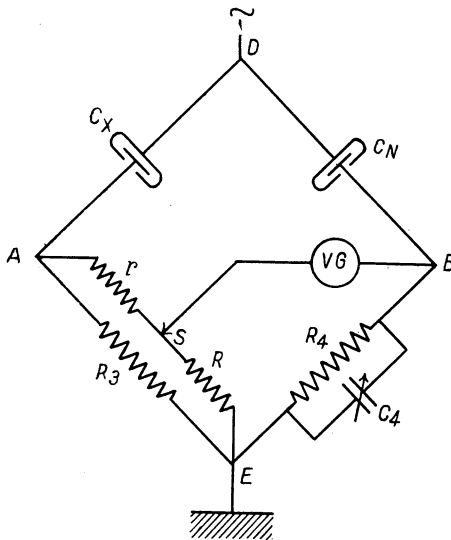


Abb. 48

ein kleiner, aber hochbelastbarer Widerstand, in normalen Brückenausführungen in Stufen von 30 bis herab zu 0,3 Ohm veränderbar, in Spezialanordnungen bis zu noch kleineren Werten.  $r$  ist ein fester Widerstand, der in Reihe mit einem Schleifdraht  $S$  und einem winkelfreien Kurbelwiderstand liegt. Die Summe  $R_3 + r + S$  wird häufig gleich 100 Ohm gewählt. Die Brückenabgleichung erfolgt durch Änderung von  $C_4$ ,  $R$  und  $S$ . Zur Erzielung ausreichender Meßgenauigkeit darf  $R$  nicht zu klein sein (nicht unter 10 Ohm), während die obere Grenze

wegen der geforderten Winkelfreiheit der Widerstände 10 000 Ohm möglichst nicht überschreiten soll. Bei abgeglichener Brücke gilt die Beziehung:

$$(85) \quad C_x = C_n \cdot R_4 \cdot \frac{R_3 + r + S + R}{R_3(R + \sigma)},$$

wo  $\sigma$  das an  $S$  abgegriffene Stück Schleifdraht bedeutet.

$$(86) \quad \tan \delta_x = \omega C_4 R_4 - \omega C_n R_4 \frac{r + S - \sigma}{R + \sigma}.$$

Eine Brückeneinstellung ist nur möglich, wenn  $\frac{C_x}{C_n} > \frac{R_4}{R_3}$  ist. Diese Brücke kann bis zu einigen hundert kV benutzt werden. Da die Wider-

stände der Zweige  $EB$  und  $EA$  stets sehr klein gegenüber denen der Zweige  $AD$  und  $BD$  sind, so liegen die Punkte  $A$  und  $B$ , solange kein Überschlag an den Kondensatoren stattfindet, stets nur um wenige Volt über Erdpotential, so daß die Brücke gefahrlos bedient werden kann. Bezüglich der Abschirmung der Kondensatoren  $C_x$  und  $C_n$  gilt das entsprechende wie bei der Giebe-Zickner-Brücke.

Bei der Messung sehr großer Kapazitäten (bis zu  $10000 \mu\text{F}$ ), wo man also zu sehr kleinem  $R_3$  übergehen muß, können leicht Fehler durch Widerstände und Selbstinduktionen in den Zuleitungen entstehen.

δ) *Messung von Elektrolytkondensatoren.* Bei Elektrolytkondensatoren besteht häufig die Notwendigkeit, sie während der Messung mit Gleichspannung polarisiert zu halten. Die Meßanordnungen bedürfen daher einer Abänderung, die vielfach in der Einfügung eines Blockkondensators in den Galvanometerzweig besteht. Die Batterie wird in Reihe mit der Sekundärspule eines Transformators gelegt, dessen Primärspule mit dem Wechselstromgenerator verbunden ist.

ε) *Sonderanordnungen zur Bestimmung der Betriebskapazität von verlegten Kabeln.* Wie bereits gezeigt wurde, läßt sich mit den üblichen Brücken die Betriebskapazität von Kondensatoren in einem Meßgang nicht bestimmen, man ist vielmehr auf die Messung der drei Teilkapazitäten und die nachfolgende Berechnung der Betriebskapazität aus ihnen angewiesen. Voraussetzung ist dabei außerdem, daß sich die Hülle des Kondensators nicht zwangsläufig auf Erdpotential befindet. Bei verlegten Kabeln ist das aber stets der Fall. Für derartige Messungen sind eine Reihe von Spezialschaltungen entwickelt worden, von denen einige im folgenden kurz diskutiert werden sollen. Bei der Mehrzahl dieser Schaltungen wird Symmetrie der Leitungen vorausgesetzt, d. h. die Teilkapazitäten der Einzelleiter gegen die Hülle werden als gleich groß angenommen bzw. der Fehler der durch diese Annahme bedingt ist, wird vernachlässigt. Derartige Schaltungen sind also in ihrer Präzision nicht mit den vorher beschriebenen Anordnungen zur Messung der einzelnen Teilkapazitäten zu vergleichen. Von Fischer wurde eine Schaltung angegeben, die aus zwei Brücken besteht, an deren gemeinsamen geerdeten Eckpunkt der Kabelmantel angeschlossen wird. Die Weiterentwicklung führte zu der in Abb. 49 dargestellten Brücke von Thomas und Küpfmüller. Die Messung



der Betriebskapazität und Betriebsableitung erfolgt durch Einstellung an dem Normalkondensator  $C_0$  und dem zu ihm in Serie liegenden Widerstand  $r_0$ : Es sind zwei Einstellungen auszuführen, wobei die Kabeladern zu vertauschen sind. Die Betriebskapazität  $C$  und die Ableitung  $G$  ergeben sich als Mittelwerte aus diesen beiden Einstellungen nach den Beziehungen

$$(87) \quad C = \frac{C_{01} + C_{02}}{2}, \quad G = \omega^2 C^2 \frac{r_{01} + r_{02}}{2}.$$

Bei der Messung sind folgende Bedingungen zu erfüllen: 1.  $\varrho$  muß gleich  $R/2$  sein. Es befindet sich in einem an  $b$  angeschlossenen Ab-

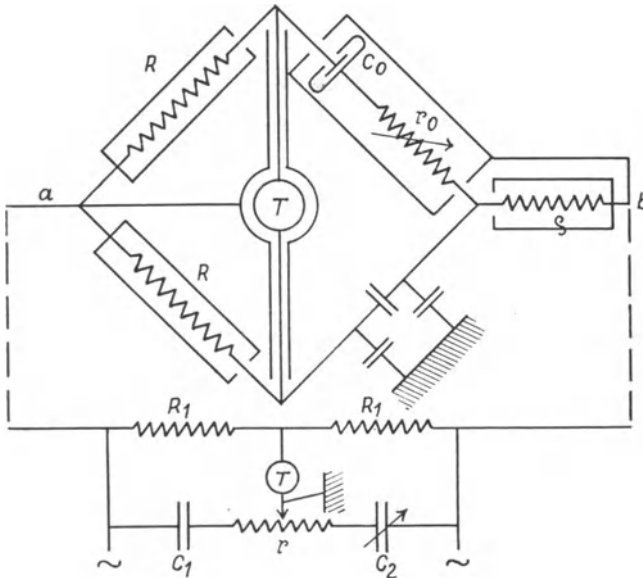


Abb. 49

schirmkasten. 2. Die beiden Widerstände  $R$  müssen gleich groß und symmetrisch angeordnet sein. Sie und das Telephon sind abgeschirmt, die Hüllen sind an den Eckpunkt  $a$  angeschlossen. 3.  $C_0$  und  $r_0$  sind gemeinsam in einem an  $b$  angeschlossenen Abschirmkasten untergebracht, die Hülle von  $C_0$  befindet sich zwischen  $C_0$  und  $r_0$ . Die Erdkapazität des Kondensators legt sich so parallel zu  $r_0 + \varrho$  und bleibt ohne Einfluß. 4. Die Punkte  $a$  und  $b$  müssen gleiches und entgegen-

gesetztes Potential gegen Erde haben. Zu diesem Zwecke ist vor die Brücke eine Symmetriervorrichtung vorgeschaltet. Die Widerstände  $R_1$  sind gleich groß,  $C_1 = C_2 \approx 0,2 \mu\text{F}$ .  $C_2$  und  $r$  werden solange verändert, bis das Telephon stromlos ist. Unsymmetrien im Kabel von 10 % bedingen einen maximalen Fehler von 0,23 %, solche von 4 % einen Fehler von 0,04 %.

Die Kühle-Schaltung (Abb. 50). Die Schaltung von Kühle stellt gewissermaßen eine Abwandlung der Fischerschen Doppelbrücke dar. Die Widerstände sind hier durch eine symmetrische Selbstinduktion ersetzt, die Indikation erfolgt durch ein induktiv mit diesen Spulen

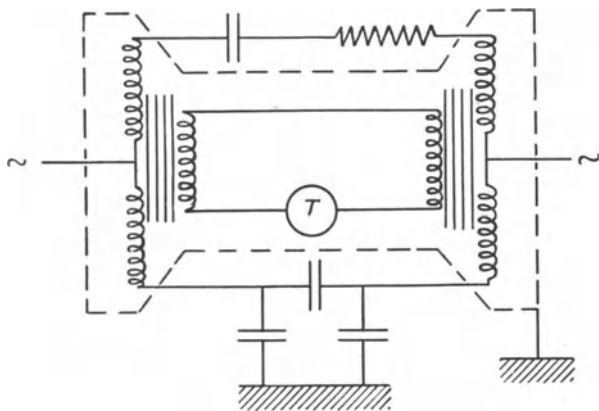


Abb. 50 Kühle-Schaltung

gekoppeltes Telephon, die Anordnung arbeitet nach Art der Differentialtransformatoren. Gegen elektrische Unsymmetrien der Stromquelle soll die Schaltung wenig empfindlich sein. Nach Angaben Kühles sind unter besonders ungünstigen Verhältnissen hierdurch Fehler bis zu 0,4 % möglich. Im übrigen gelten die gleichen Betrachtungen wie bei der zuvor beschriebenen Schaltung, d. h. zur Gewinnung sicherer Resultate sind die Mittelwerte aus zwei Einstellungen mit vertauschten Adern zu bilden. Seit einiger Zeit fabrikmäßig hergestellte Kühle-Brücken enthalten Schalter, die nicht nur die Kabeladern, sondern auch die Stromzuführungen und  $N$  mit  $X$  vertauschen lassen. Werden abgeschirmte Normalkondensatoren im Meßzweig benutzt, so ist deren Betriebskapazität maßgebend, unabhängig davon, ob ihre Hülle geerdet ist oder nicht.

Weitere Schaltungen sind von Wellmann und U. Meyer angegeben, sie beruhen auf ähnlichen Überlegungen wie sie den oben beschriebenen Anordnungen zugrunde liegen.

ζ) *Vergleichung der Kapazität mit einer Gegeninduktion.* Die Carey-Foster-Brücke. Ein vielfach, besonders in England gebräuchliches Verfahren zur Messung von Kapazitäten besteht im Vergleich der Kapazität mit einem aus den Abmessungen sehr genau berechenbaren Normal der Gegeninduktion. Diese Meßanordnungen sind ebenfalls Nullmethoden, unterscheiden sich jedoch von den Brückenschaltungen dadurch, daß am Nullinstrument zwei in ihrer Phase um  $180^\circ$  verschobene Wechselspannungen auftreten und sich so kompensieren. Zur Kapazitäts- und Verlustmessung besonders geeignet sind die Verfahren, die auf eine Schaltung von Carey-Foster zurückgehen. Bei

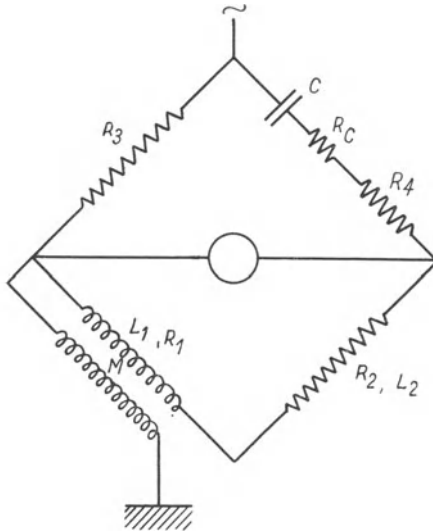


Abb. 51. Carey-Foster-Brücke

dieser Anordnung fällt die eine Spannungszuführung mit der Zuführung zum Nullinstrument zusammen. Die Gleichgewichtsbedingungen dieser Brücke (siehe Abb. 51) ergeben sich zu

$$(88) \quad C = \frac{M}{(R_1 + R_2) R_3}$$

und

$$L_1 = \frac{M(R_3 + R_4 + R_c)}{R_3} \quad \text{bzw.} \quad R_c = \frac{R_3(L - M)}{M} - R_4$$

und daraus

$$(89) \quad \tan \delta = \omega C R_c,$$

falls die Widerstände  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$  induktionsfrei sind. In den Gleichungen bedeutet  $M$  die Gegeninduktion, deren eine im Brücken-

zweig liegende Selbstinduktionskomponente  $L_1$  ist, und  $R_c$  der dem Kondensator vorgeschaltet gedachte Verlustwiderstand dieses Kondensators. Am besten wird der Widerstand  $R_3$  konstant gehalten. Die Abgleichung erfolgt entweder durch  $R_4$  und  $M$  oder durch Änderung von  $R_2$  und  $R_4$ . Die Brücke läßt sich nur abgleichen, wenn  $L$  größer als  $M$  ist. Ist  $M$  sehr klein gegen  $L$ , so muß  $R_4$  sehr groß sein. Der Widerstand von  $L$  geht in die Messungen mit ein. Für höchste Genauigkeitsansprüche müssen  $R_1 + R_2$  und  $R_3$  nach jeder Messung bestimmt werden. Die Werte der Produkte dieser Zweigwiderstände wählt man am besten so, daß sie ganzzahlige Vielfache von 10 sind. Die Einstellungen von  $R_4$  und  $M$  sind nicht unabhängig voneinander, die Abgleichung muß also abwechselnd erfolgen. Die Ablesungen ergeben einen Wert  $C$ , der sich aus der zu messenden Kapazität  $C_x$  und der Schaltungskapazität  $c_s$  zusammensetzt. Letztere wird durch Abschalten von  $C_x$  besonders bestimmt. Es ist also  $C_x = C - c_s$ . Bei der Messung sehr kleiner Verluste muß  $L$  sehr genau bekannt sein, außerdem darf eine Restselbstinduktion des Widerstandes  $R_2$  nicht mehr vernachlässigt werden. Für  $R_c$  ist dann anzusetzen:

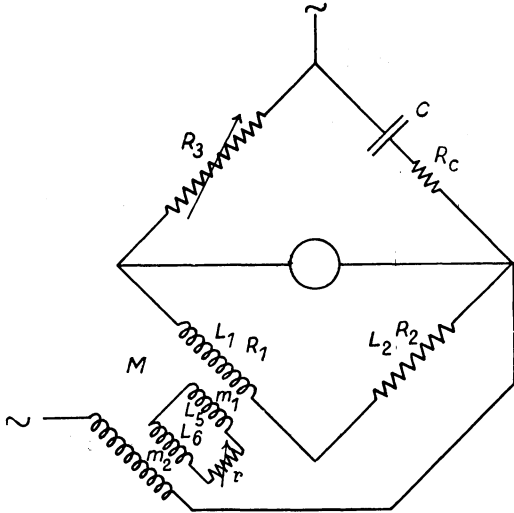


Abb. 52

$$(90) \quad R_c = \frac{R_3(L_1 - M) + (R_1 + R_2)L_2}{M} - R_4.$$

Mit der beschriebenen Brücke lassen sich Kapazitäten von Bruchteilen von  $\mu\mu\text{F}$  bis zu mehreren  $\mu\text{F}$  ohne Wechsel der Induktion oder der Widerstände messen, ebenso lassen sich die Kondensatorverluste in weiten Grenzen bestimmen.

Die Campbellschen Kapazitätsmeßbrücken. a) Das oben beschriebene Verfahren wurde von Campbell zu einer Brücke aus-

gebaut, bei der sich Kapazität und Verlustfaktor unmittelbar ablesen lassen. Das Schaltschema ist aus Abb. 52 zu ersehen. In dem  $C$  enthaltenden Brückenweig ist der in der ursprünglichen Schaltung vorgesehene Widerstand  $R_4$  weggelassen. Hinzugefügt ist dagegen ein Zweig, der aus zwei Selbstinduktionen  $L_5$  und  $L_6$  sowie einem variablen Widerstand  $r$  besteht. Die beiden Selbstinduktionen sind mit den beiden Teilspulen der Gegeninduktivität des Hauptkreises gekoppelt; es treten somit noch zwei weitere Gegeninduktivitäten  $m_1$  und  $m_2$  auf. Die Gleichgewichtsbedingungen der Brücke lauten unter diesen Umständen:

$$(91) \left\{ \begin{array}{l} \frac{(M(L_5 + L_6) - m_1 \cdot m_2)}{C R_3} = (R_1 + R_2)(L_5 + L_6) + (L_1 - M) \cdot r - \frac{M r R_c}{R_3} \\ \text{und} \\ \frac{M}{C R_3 (R_1 + R_2)} = 1 - \frac{\omega^2}{R_3 (R_1 + R_2)} \left[ \left( L_1 - M - \frac{M R_c}{R_3} \right) (L_5 + L_6) \right. \\ \left. - m_1 (m_1 - m_2) + \frac{m_1 \cdot m_2 \cdot R_c}{R_3} \right]. \end{array} \right.$$

Wird  $L_1 = M$  und  $r$  sehr viel größer als  $(L_5 + L_6) \omega$  gemacht, so erhält man die einfachen Gleichungen für Kapazität und Verlustfaktor:

$$(92) \left\{ \begin{array}{l} C = \frac{M}{\left[ (R_1 + R_2) + m_1 (m_1 - m_2) \frac{\omega^2}{r} \right] R_3} \quad \text{und} \\ \tan \delta = C \cdot R_c \cdot \omega = \frac{m_1 m_2 \omega}{M r}. \end{array} \right.$$

Bei dem fertigen Instrument werden  $m_1$  und  $m_2$  gleichzeitig geändert, so daß sie immer nahezu gleich groß sind. Dann wird der Ausdruck  $m_1 (m_1 - m_2) \omega^2 / r$  vernachlässigbar und man erhält

$$(93) \quad C = \frac{M}{(R_1 + R_2) R_3}.$$

Benutzt man für  $R_3$  feste Widerstände, so kann man die Kapazität direkt an  $R_2$  ablesen. Mit  $\omega = r \cdot \text{const}$  erhält man  $\tan \delta = \text{const} \cdot m_1 m_2 / M = m_1 m_2 \cdot \text{const}$  und somit läßt sich auch der Verlustfaktor unmittelbar ablesen. Bei einer praktisch ausgeführten Brücke ließen sich Kapazitäten von  $100 \mu\mu\text{F}$  bis zu  $10 \mu\text{F}$  und Verlustfaktoren  $\tan \delta$  zwischen 1 und  $100 \cdot 10^{-4}$  messen. Die Meßgenauigkeit für die Kapazität beträgt  $0,01\%$ . Frequenzbereich 50 bis 2000 Hertz.

b) Ein weiteres Verfahren zur schnellen Kapazitätsmessung, das auch bei der Herstellung käuflicher Meßbrücken Verwendung findet, stammt ebenfalls von Campbell. Die Schaltung ist aus Abb. 53 zu ersehen. Sie enthält ein aus zwei gleichen Hälften bestehendes Variometer der Gegeninduktivität; die in die eigentliche Brücke eingeschalteten Teilspulensind durch einen Schleifdraht verbunden. In Zweig 1 der Brücke liegen außerdem ein Kondensator  $C_1$  mit dem Verlustwiderstand  $R_0$ , überbrückt von einem veränderlichen Widerstand  $R_1$ , ein gleich großer und mit  $R_1$  gemeinschaftlich veränderlicher Widerstand  $R_2$  befindet sich in Zweig 2. Die Zweige 3 und 4 bestehen aus gleich großen festen Widerständen  $R_3$  und  $R_4$ . Der Meßbereich der Brücke wird mit Hilfe der Schalter für  $R_1$  und  $R_2$  eingestellt, der Abgleich erfolgt durch Ändern des Variometers und des Schleifdrahtes. Es ergibt sich:

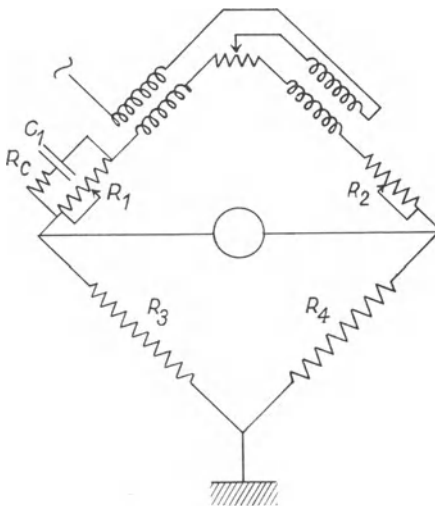


Abb. 53

$$(94) \quad C = \frac{L}{R_1^2} \left( 1 + \frac{R_3^2}{L^2 \omega^2} \right), \text{ wo } L = -2M \quad \text{und}$$

$$(95) \quad \text{tang } \delta = \frac{R_3}{L \omega} \left( 1 - \frac{R_3}{R_1} \right) - \frac{L \omega}{R_1}.$$

Der Ausdruck  $R_3^2/L^2 \omega^2$  ist zumeist vernachlässigbar, so daß dann einfach gilt:

$$(96) \quad C = \frac{L}{R_1^2}.$$

Die Skale des Variometers läßt sich somit von einem Multiplikator abgesehen, direkt in  $C$  eichen. Man kann mit dieser Brücke auch Kapazitäten vergleichen, wenn man einen zweiten Kondensator zu  $R_2$  parallel schaltet. Mit der Anordnung lassen sich Kapazitäten von  $1 \mu\text{F}$  bis zu  $30 \mu\text{F}$  messen.

d) Messung von Kapazitäten bei Hochfrequenz. *Resonanzbrücke*. Allgemeines. Für Messungen von Kapazitäten und dielektrischen Verlusten bei Hochfrequenz eignet sich die ursprünglich für Niederfrequenz von Grüneisen und Giebe angegebene Resonanzbrücke (Abb. 54). Sie enthält in Zweig 1 eine Kapazität  $C_1$  in Reihe mit einer Selbstinduktion  $L_1$ .  $L_1$  besitzt stets einen Verlustwiderstand  $R_1$ , den man zu  $L_1$  in Reihe liegend annehmen kann. Verluste in  $C_1$  sind durch eine Reihenschaltung von einem verlustfreien Kondensator  $C_1$  und einem Vorwiderstand  $\varrho_1$  ersetzbar. Durch Verändern von  $C_1$  oder  $L_1$  kann der Zweig 1 auf Resonanz mit der Meßfrequenz abgestimmt werden. Der Operator des Zweiges 1 lautet:

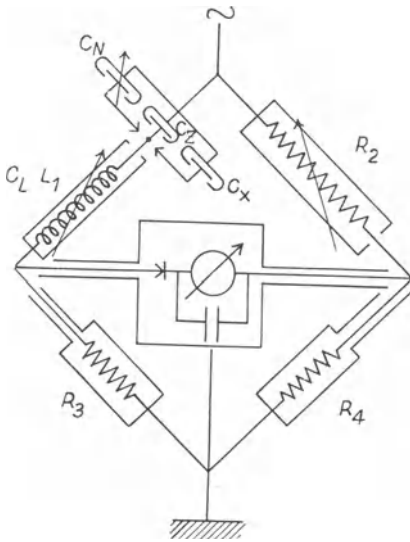


Abb. 54. Resonanzbrücke

$$\mathfrak{Z}_1 = j \left( \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + R_1 + \varrho_1,$$

im Falle der Resonanz wird  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  und somit  $\mathfrak{Z}_1 = R_1 + \varrho_1$ ,

d. h. Zweig 1 verhält sich so, als ob er nur einen reinen Widerstand enthielte. Schaltet man in die anderen drei Zweige der Brücke reine Widerstände, so bekommt man als Nullbedingungen der Brücke:

$$(97) \quad R_1 + \varrho_1 : R_2 = R_3 : R_4 \quad \text{und} \quad \omega^2 L_1 C_1 = 1.$$

Eine Korrektur können diese Gleichungen durch Eigenkapazität der Spule  $C_L$  und durch Selbstinduktion  $L_c$  des Kondensators, sowie durch Selbstinduktion  $L_2$  des Widerstandes in Zweig 2 erfahren, wenn  $R_3$  und  $R_4$  ihrer Größe und Zeitkonstanten nach gleich gemacht sind. Dann gilt bei verlustfreier Kapazität

$$(98) \quad R_1 = R_2 (1 - \omega^2 L_1 C_L)^2 \quad \text{und} \quad \omega^2 (C + C_L) (L_1 + L_c - L_2) = 1.$$

Hat  $C_1$  einen Verlustfaktor  $\tan \delta$ , so bleibt die letzte Gleichung unverändert, die erste erhält die Form:

$$(99) \quad \frac{R_1}{(1 - \omega^2 L_1 C_L)^2} + \frac{\tan \delta_1}{\omega C_1} = R_2.$$

Wie auch sonst bei Brückenmessungen mit Wechselstrom erreicht man durch direkte Messung der verschiedenen Größen nicht die höchste Genauigkeit, da die kleinen Zuleitungsselbstinduktionen, Selbstinduktionen der Widerstände und kleine Streukapazitäten nicht hinreichend genau bekannt sind. Man wird also bei Kapazitätsmessungen in der Resonanzbrücke so vorgehen, daß man zunächst den unbekanntem Kondensator  $C_x$  in Zweig 1 einschaltet, die Brücke mit Hilfe von  $L$  und  $R_2$  abgleicht, darauf  $X$  durch  $N$  ersetzt und die Brücke nun bei unverändertem  $L$  und somit auch unverändertem  $R_1$  mit Hilfe von  $C_n$  und  $R_2$  erneut abgleicht. Dann gilt:

$$(100) \quad C_x = C_n$$

und

$$(101) \quad \tan \delta_x = \omega C_n \Delta R_2 \left( 1 + \frac{C_z}{C_n} \right)^2 + \tan \delta_n,$$

wobei  $C_z$  diejenige Zusatzkapazität bedeutet, die während der  $X$ -Messung zu  $C_x$  parallel gelegen hat. Sind die Verluste sehr groß, so sind an Stelle der Formeln (100) und (101) die folgenden Beziehungen zu benutzen:

$$(102) \quad C_x^* = C_n \frac{1 - \frac{C_z}{C_n} \tan^2 \delta'}{1 + \tan^2 \delta'}, \quad \tan \delta_x^* = \tan \delta' \frac{1 + \frac{C_z}{C_n}}{1 - \frac{C_z}{C_n} \tan^2 \delta'},$$

wo

$$\tan \delta' = \omega C_n \Delta R_2 \left( 1 + \frac{C_z}{C_n} \right).$$

Diese Gleichungen sind abgeleitet unter der Voraussetzung eines Ersatzes des Verlustkondensators durch einen verlustfreien, dem ein Widerstand parallel geschaltet ist, ein Ersatz, der bei Leitfähigkeit in Frage kommt, die wohl meist als Hauptursache sehr großer Verluste anzusehen ist. Die untere Grenze, bei der man in dieser Brücke noch sicher messen kann, liegt bei etwa 100 m Wellenlänge. Die Meßgenauigkeit beträgt etwa  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  für den  $\tan \delta$  und etwa  $\pm 0,5\%$ , höchstens  $\pm 0,01 \mu\mu\text{F}$  für die Kapazität. Sehr kleine Kapazitätsdifferenzen, z. B. zwischen zwei Einstellungen eines Drehkondensators, lassen sich unter Umständen noch etwas genauer bestimmen.



**Aufbau der Brücke.** Bei Hochfrequenzmessungen ist in noch höherem Maße als sonst auf die Vermeidung von zusätzlichen Selbst- und Gegeninduktivitäten, sowie auf die Vermeidung von Streukapazitäten Wert zu legen. Alle Brückenleitungen müssen daher unbedingt bifilar geführt werden; die Brückeneckpunkte sind so nahe als möglich aneinander zu legen, für die Anschlüsse der Brückenarme wird am besten ein sogenanntes Brückenkreuz verwendet, wobei man den Aufbau etwa nach Abb. 55 durchführt. Als Widerstände dienen bifilar aus-

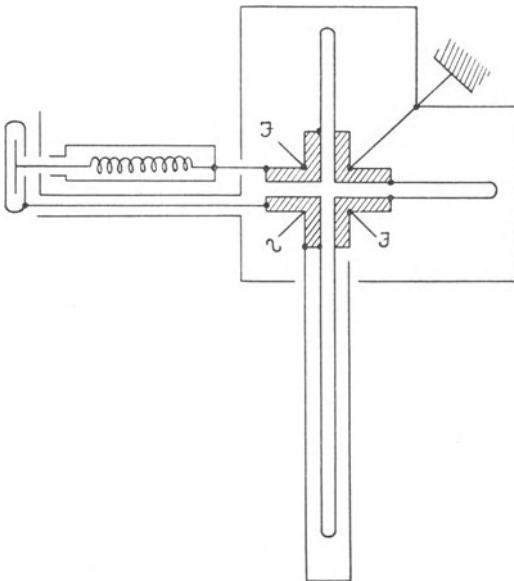


Abb. 55

gespannte Drähte, von denen der Widerstandsdraht  $R_2$  durch einen Kurzschlußschieber in seiner wirksamen Länge veränderlich sein muß.  $R_3$  und  $R_4$  sind Widerstände von etwa 20 Ohm. Eine gegenseitige Beeinflussung der Zweige ist außer durch ihre Anordnung noch durch Abschirmung zu verhindern. Die Widerstandsdrähte sind so zu bemessen, daß sie innerhalb des gewünschten Frequenzbereichs keine Widerstandserhöhung durch Skin-Effekt zeigen, da hierdurch eben-

falls Meßfehler auftreten würden. Besondere Aufmerksamkeit hat man dem Aufbau des Zweiges 1 zu widmen. Das Variometer muß ebenfalls abgeschirmt und frei von Handeffekten sein, die u. U. eine saubere Einstellung unmöglich machen können. Bei einem Variometer gewöhnlicher Art ist das nicht zu erreichen, auch würde durch die Hülle eine viel zu starke Dämpfung eintreten. Man kann für diese Zwecke ein sogenanntes astatisches Variometer verwenden. Es besteht aus einer Aichterspule, die zwischen zwei anderen gleichartigen Aichterspulen drehbar ist. Alle drei Spulen sind hintereinandergeschaltet, wobei sich wieder die drehbare Spule in der Mitte zwischen den beiden

anderen befindet. Eine solche Anordnung hat praktisch keine Streuung nach außen. Die Selbstinduktion eines derartigen Variometers war z. B. zwischen etwa 4 und  $28 \cdot 10^{-5}$  Henry veränderlich. Mit ihm sind Messungen bis zu etwa 150 m Wellenlänge möglich. Durch Zuschalten von festen Spulen kann der Frequenzbereich nach oben zu beliebig ausgedehnt werden. Die Hülle des Variometers ist mit dem einen Spulenende verbunden und liegt am Indikatoreckpunkt. Die Hüllen des zu messenden Kondensators und des Normals liegen am Spannungseckpunkt, sie müssen bei der  $X$ - und  $N$ -Messung angeschlossen bleiben. Wie man das praktisch machen kann, ist schon bei der Beschreibung der Giebe-Zickner-Brücke (vgl. S. 62) gesagt. Die Kapazitäten der Abschirmungen liegen entweder der ganzen Brücke oder zu  $R_3$  und  $R_4$  parallel. Solange diese letzteren Kapazitäten keine zu großen Werte annehmen, bleiben sie ohne Einfluß auf die Brückeneinstellung, da ihr äquivalenter Widerstand dann sehr groß gegen  $R_3$  und  $R_4$  sein wird. Unangenehm kann lediglich die Streukapazität zwischen den Gehäusen von  $C$  und  $L$  in Zweig 1 werden. Nötigenfalls ist zwischen diese Hüllen ein geerdetes Schutzblech zu bringen, das diese Streuung weitgehend unterbindet. Der günstigste Anschluß von Spannung, Erde und Telephon ist aus der Schaltskizze zu ersehen. Bei Hochfrequenzmessungen ist auf eine gute Erdung besonders zu achten. Die Erdleitung muß so dimensioniert sein, daß zwischen dem Brückenerdungspunkt und der wahren Erde ein Spannungsgefälle nicht vorhanden ist. Lange Erdleitungen wirken oft als Antennen und bedingen dann hochfrequente Störungen in der Brücke. Als Indikator dient für genaue Messungen ein kapazitiv überbrücktes Spiegelgalvanometer mit Detektor in Reihe. Statt dessen kann auch der Indikatorstrom über einen Lufttransformator mit einem nahezu frequenzgleichen Hilfsstrom zur Interferenz gebracht werden und nun mit Hilfe eines angekoppelten Telephons auf das Verschwinden des Überlagerungstones beim Brückenabgleichen eingestellt werden. Der Aufbau einer solchen Anordnung erfordert aber sehr große Sorgfalt, da direkte Koppelungen peinlichst zu vermeiden sind und der Anschluß an die Brücke völlig symmetrisch sein muß. Eine Rückwirkung auf die Brücke darf unter keinen Umständen stattfinden. Zur Erzielung größerer Empfindlichkeit wird der Indikatorzweig abgestimmt. Symmetrie läßt sich dadurch erreichen, daß die Koppelspule zwischen zwei gleiche, gemeinsam bewegliche, aber elektrisch voneinander isolierte Drehkondensatoren geschaltet wird. Als Indikator geeignet ist auch das auf S. 51 erwähnte magische Auge.

Die Zuleitungen vom Sender zur Brücke sind ebenfalls abzuschirmen. Auch der Sender bedarf einer Abschätzung und ist so aufzustellen, daß eine direkte Einwirkung auf die Brücke und den Indikatorzweig nicht möglich ist, da sonst leicht Nullausschläge am Galvanometer auftreten. Von besonderer Wichtigkeit für die Meßgenauigkeit ist die Frequenzkonstanz des Meßsenders, da die Frequenz unmittelbar in die Messung eingeht, und zwar mit dem Quadrate ihres Wertes. Besitzt der Sender keine besonderen Stabilisierungsvorrichtungen, so muß die Frequenz z. B. durch Kontrolle mittels eines sehr genauen Wellenmessers oder noch besser mittels Leuchtresonatoren oder dergleichen vor jeder Messung neu eingestellt werden.

**Meßverfahren.** In der Hochfrequenzresonanzbrücke können einzelne Teilkapazitäten nicht unmittelbar gemessen werden. Man kann jedoch diese Werte aus der Messung mehrerer Kombinationen ermitteln. Man bestimmt zu diesem Zwecke zunächst  $k_{12} + k_{10} = C_1$  und den zugehörigen Verlustfaktor  $\tan \Delta_1$ , indem man das Gehäuse mit System 2 verbindet, dann  $k_{12} + k_{20} = C_2$  und  $\tan \Delta_2$  bei Verbindung des Gehäuses mit System 1, und schließlich  $k_{10} + k_{20} = C_3$  und  $\tan \Delta_3$ , indem man System 1 mit System 2 verbindet und die Kapazität zwischen Gehäuse und 1 mit 2 verbunden feststellt. Dann ergibt sich (wobei  $\Delta$  statt  $\tan \Delta$  geschrieben ist):

$$(103) \quad \left\{ \begin{array}{l} k_{12} = \frac{C_1 + C_2 - C_3}{2}, \quad \tan \delta_{12} = \frac{C_1 \Delta_1 + C_2 \Delta_2 - C_3 \Delta_3}{2 k_{12}}, \\ k_{10} = \frac{C_1 - C_2 + C_3}{2}, \quad \tan \delta_{10} = \frac{C_1 \Delta_1 - C_2 \Delta_2 + C_3 \Delta_3}{2 k_{10}}, \\ k_{20} = \frac{C_2 - C_1 + C_3}{2}, \quad \tan \delta_{20} = \frac{C_2 \Delta_2 - C_1 \Delta_1 + C_3 \Delta_3}{2 k_{20}}. \end{array} \right.$$

Bestimmungen der Dielektrizitätskonstanten von Werkstoffen lassen sich in dieser Brücke in einwandfreier Weise nur mit Hilfe des Dreiplattenkondensators durchführen, der Schutzringkondensator kann nicht verwendet werden.

**Fehlerquellen.** Bei höheren Frequenzen sind sehr leicht grobe Meßfehler infolge von Selbstinduktion der zu messenden Kapazität möglich, die z. B. in den Zuleitungen zwischen den Anschlußklemmen und dem eigentlichen System bzw. auch in Selbstinduktion des Systems selbst liegen kann. Ist  $C_0$  die Kapazität bei Niederfrequenz,  $C_\omega$  die-

jenige bei der Meßfrequenz  $\omega = 2 \pi f$  und  $L$  die Selbstinduktion des Kondensators, so gilt

$$(104) \quad C_{\omega} = C_0 (1 + \omega^2 L C_0).$$

Eine Selbstinduktion von 100 cm, ein Betrag, der sehr leicht auftreten kann, bewirkt bei einer Frequenz von  $10^6$  Hertz eine scheinbare Vergrößerung einer Kapazität von  $1000 \mu\mu\text{F}$  um  $4^0/_{00}$ , von  $2000 \mu\mu\text{F}$  um  $8^0/_{00}$ , von  $5000 \mu\mu\text{F}$  um  $2\%$  und von  $10000 \mu\mu\text{F}$  um  $4\%$ . Da man häufig  $C$  und  $L$  nicht trennen kann, weil man z. B.  $L$  nicht kennt, so erhält man bei der Messung solcher Kondensatoren nur die „wirksame“ Kapazität. Dieser Fehler nimmt, wie Gleichung (104) zeigt, mit dem Quadrate der Frequenz zu, bei  $10^7$  Hertz erscheint unter sonst gleichen Verhältnissen bereits die Kapazität eines Kondensators von  $100 \mu\mu\text{F}$  um  $4\%$  vergrößert. Mit weiter zunehmender Frequenz steigen die Meßschwierigkeiten weiter an, zumal dann auch häufig keine quasistationären Verhältnisse mehr vorliegen, d. h. die linearen Abmessungen der Leitersysteme sind nicht mehr vernachlässigbar klein gegen die Wellenlänge der Erregerschwingung.

*$\beta$ ) Messungen im Schwingungskreis.* Aufbau. Wie schon früher erwähnt, führen Brückenmethoden immer zu den genauesten und sichersten Ergebnissen. Ihr Meßbereich ist aber nach höheren Frequenzen zu noch begrenzt, oberhalb von einigen  $10^6$  Hertz arbeiten sie aus verschiedenen Gründen nicht mehr fehlerfrei. Man verwendet daher in diesem Gebiet für Kapazitätsmessungen verschiedene Methoden der Hochfrequenztechnik. In erster Linie gehören hierher Messungen im Schwingungskreis. Sie verlangen ebenso wie die Resonanzbrücke sehr gute Frequenzkonstanz der Stromquelle und saubersten Aufbau und gute Abschätzung der Anordnungen. Der Schwingungskreis besteht aus einer Selbstinduktionsspule, deren Daten nicht immer bekannt zu sein brauchen, und einem Kondensator in Parallelschaltung zu ihr. Die Selbstinduktion wird zumeist sehr lose induktiv und rückwirkungsfrei mit dem Meßsender gekoppelt. Mit Hilfe von  $L$  oder  $C$  wird dieser Kreis auf Resonanz abgestimmt. Die Resonanzanzeige erfolgt am besten durch einen aperiodischen Kreis, bestehend aus einer Koppelspule mit Detektor, und einem kapazitiv überbrückten Spiegel- oder Zeigergalvanometer. Zur Vermeidung von Nullauschlägen muß die Koppelspule aus zwei gleichen Hälften bestehen, deren mittlere Enden durch den Detektor verbunden werden, während

die äußeren Enden zum Galvanometer führen. Sie sind möglichst kurz und verdrillt auszulegen. Sender- und Detektorspule müssen so zueinander stehen, daß eine direkte Beeinflussung des Detektorkreises unmöglich ist, d. h. gewöhnlich senkrecht zueinander. Bei sehr kurzen Wellen spielen oft Reflexionen im Raum eine große Rolle, so daß die geeignete Lage meist ausprobiert werden muß. Jedenfalls darf ein Nullausschlag am Indikatorinstrument bei stark verstimmtem Schwingungskreis nicht auftreten. Nullausschläge führen fast stets zu Unsymmetrien in der Resonanzkurve, und damit zu Meßfehlern. Solange Verlustmessungen nicht erforderlich sind, braucht die Eichkurve des Detektors nicht bekannt zu sein. Kristalldetektoren pflegen zumeist eine quadratische Empfindlichkeit zu besitzen. An Stelle eines Kristalldetektors läßt sich auch der Baretter, entweder unmittelbar oder in einer Brückenschaltung benutzen, ferner das Thermokreuz; in neuerer Zeit wird vielfach auch das Röhrenvoltmeter verwendet, das bei Beachtung gewisser Vorsichtsmaßregeln auch direkt an den Schwingungskreis angeschlossen werden kann, besonders seitdem es gelungen ist, Spezialanordnungen für höhere und höchste Frequenzen zu schaffen. Der Kristalldetektor hat gegenüber all diesen Geräten den großen Vorzug der Einfachheit, der Unabhängigkeit von Spannungen und den beim Röhrenvoltmeter nötigen Kompensationen. Dabei besitzt er in guten Ausführungen hohe Empfindlichkeit und gute Konstanz.

Die Einstellung auf das Resonanzmaximum bringt meist eine gewisse Einstellunsicherheit mit sich, da die Resonanzkurven in ihrem Maximum oft ziemlich breit sind. Man stellt daher besser auf den Durchgang des Instrumentenzeigers durch einen bestimmten Skalenteil oder eine bestimmte Marke zu beiden Seiten des Maximums ein, d. h. man benutzt Stellen größter Steilheit der Resonanzkurve. Das Maximum liegt dann in der Mitte zwischen beiden Einstellungen. Diese Methode läßt sich allerdings nur dann anwenden, wenn die Resonanzkurve vollkommen symmetrisch ist.

Kapazitätsmessungen. Die beim Schwingungskreis auftretenden Teilkapazitäten sind aus Abb. 56 zu ersehen. Es sind wieder drei Teilkapazitäten  $k_{12}$ ,  $k_{10}$  und  $k_{20}$  vorhanden.  $k_{10}$  und  $k_{20}$  setzen sich aus den Teilkapazitäten der Kondensatorbelegungen gegen Erde bzw. gegen das Kondensatorgehäuse und aus den Streukapazitäten der Spule einschließlich derjenigen der Verbindungsleitungen gegen Erde zusammen. Zu  $k_{12}$  legt sich die Spulenkapazität  $C_L$  parallel. Will

man definierte Verhältnisse haben, so ist es notwendig, auch die Spule einschließlich der Zuleitungen abzuschützen. Man bringt sie zu diesem Zweck in einen mit geschlitzten Stanniolbelegungen versehenen Kasten. Durch die Schlitzte hindurch ist eine ausreichende magnetische Koppelung möglich. Damit keine Wirbelstromverluste auftreten, sind die Schlitzte so angeordnet, daß keine geschlossene Stromschleife entsteht. Die zu messende abgeschirmte Kapazität wird außerhalb des Kastens mittels eines geeigneten Untersatzes angeschlossen. Die Schutzhülle des Kondensators sowie der Abschirmkasten sind zu erden. Sind  $L$ ,  $C_L$  und die Teilkapazitäten der Spule gegen den Kasten bekannt, so läßt sich mit Hilfe der Frequenz  $f$  die jeweilige Betriebskapazität bestimmen. Für genauere Messungen kommt jedoch wiederum nur das Substitutionsverfahren in Frage,  $C_x$  wird durch ein Normal  $C_n$  ersetzt, wobei allerdings bei höheren Frequenzen sehr darauf zu achten ist, daß beim Austausch nicht etwa Selbstinduktionsänderungen infolge von Änderungen in den Zuleitungen auftreten. Auch ist gegebenenfalls die innere Selbstinduktion des Normals nach Gleichung (104) in Rechnung zu setzen. Zwischen  $X$ - und  $N$ -Messung darf auch die Lage des Indikatorkreises nicht geändert werden, da er einen kapazitiven Nebenschluß bildet, der die Messung sonst fälschen kann. Die Teilkapazitäten lassen sich auch

im Resonanzkreis nicht unmittelbar messen, man ist auf das gleiche Verfahren angewiesen, wie es im voraufgehenden Abschnitt geschildert ist. Wohl kann aber die Betriebskapazität  $k_{12} + \frac{k_{10} \cdot k_{20}}{k_{10} + k_{20}}$  unmittelbar gewonnen werden.

Bestimmung des Verlustfaktors. a) Aus der Resonanzkurve. Der Verlustfaktor der zu messenden Kapazität läßt sich im Schwingungskreis mit Hilfe von Dämpfungsmessungen bestimmen. Zwischen  $\tan \delta$  und dem logarithmischen Dekrement  $\vartheta$  besteht die Beziehung:  $\tan \delta = \frac{\vartheta}{\pi}$ . Die Resonanzkurve eines Schwingungskreises ist

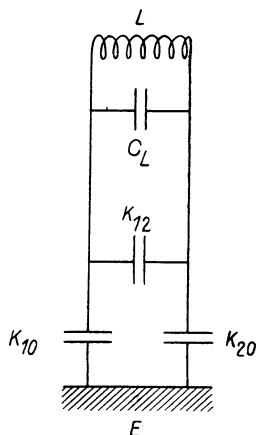


Abb. 56

um so breiter, je größer seine Dämpfung ist, ihre Breite ist also ein Maß für die Dämpfung. Zu ihrer Ermittlung ist nicht die ganze Resonanzkurve erforderlich, man stellt vielmehr außer auf das nicht mit höchster Genauigkeit benötigte Resonanzmaximum auf den Durchgang des Indikatorzeigers durch eine bestimmte Marke beiderseits von diesem Maximum ein, indem man entweder  $C$  bei konstanter Frequenz oder die Frequenz bei konstantem  $C$  ändert. Letzteres erfordert allerdings Frequenzunabhängigkeit der Amplitude des Meßsenders, läßt sich aber bei fest vorgegebenen Verhältnissen des Schwingungskreises oft nicht anders ausführen. Erfolgt die Erregung des Kreises mit ungedämpften Schwingungen, so gilt:

$$(105) \quad \vartheta = \frac{\pi}{2} \frac{C'' - C'}{C_r} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{i_r}{i}\right)^2 - 1}} \quad \text{oder} \quad \vartheta = \frac{\pi}{2} \frac{\lambda''^2 - \lambda'^2}{\lambda_r^2} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{i_r}{i}\right)^2 - 1}}.$$

Wählt man außerdem  $i_r = 2i$ , so vereinfachen sich die Formeln zu

$$(106) \quad \vartheta = \frac{\pi}{2} \frac{C'' - C'}{C_r} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda''^2 - \lambda'^2}{\lambda_r^2}.$$

In einer solchen  $\vartheta$ -Bestimmung ist auch die Dämpfung durch die Selbstinduktion des Kreises usw. enthalten. Der Verlustfaktor eines unbekanntem Kondensators kann aber durch Substitution durch ein verlustfreies Normal gewonnen werden. Es gilt dann:

$$(107) \quad \vartheta_x = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta C_x - \Delta C_n}{C_r} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta \lambda_x^2 - \Delta \lambda_n^2}{\lambda_r^2}$$

bzw.

$$(108) \quad \text{tang } \delta_x = \frac{\Delta C_x - \Delta C_n}{2C_r} = \frac{\Delta \lambda_x^2 - \Delta \lambda_n^2}{2\lambda_r^2}.$$

Will man mit diesem Verfahren genaue Messungen ausführen, so muß der Kreis selbst so verlustarm wie möglich aufgebaut werden. Zudem muß  $\lambda$  entweder sehr konstant, oder sehr genau bekannt sein, je nachdem, welche der beiden Meßmöglichkeiten man wählt. Sind die Verluste von  $X$  sehr klein, so ergibt sich  $\text{tang } \delta$  stets als Differenz zweier großer Zahlen, d. h. die erzielbare Genauigkeit ist nicht sehr groß. Die Genauigkeit der Messungen sinkt zudem mit der Frequenz, da Normale,

die bei Niederfrequenz verlustfrei sind, bei sehr hohen Frequenzen, wenn auch nicht dielektrische, so doch Verluste durch Skinneffekt, Wirbelströme usw. bekommen können. Will man nur Verluste von Werkstoffen messen, so benutzt man am besten einen abgeschirmten Schraubkondensator (vgl. S. 31), dessen Platten durch eine Öffnung im Gehäuse zugänglich sind. Zwischen beide Elektroden wird der mit Belegungen versehene plattenförmige Werkstoff gebracht. Nun wird zunächst mit dem Werkstoff als Dielektrikum  $\vartheta$  bestimmt, danach wird der Werkstoff entfernt, die bewegliche Metallplatte so weit an den festen Teller herangedreht, bis wieder Resonanz eintritt, und  $\vartheta$  erneut ermittelt. Diese Methode kann bis zu sehr hohen Frequenzen benutzt werden, da sich bei diesem Verfahren auch die Dämpfung des Meßkondensators praktisch heraushebt und nur ganz geringfügige Selbstinduktionsänderungen auftreten können. Die Methode hat den Nachteil, daß die Randstreuungen des Werkstoffs eingehen und die Messungen hierdurch gefälscht werden. Die fehlerfreie Dreiplattenmethode läßt sich normalerweise nicht verwenden, da die Abschaltung des Dreiplattenkondensators zu Selbstinduktionsänderungen führt. Ein Spezialdreiplattenkondensator, bei dem sich das vermeiden ließe, ist zur Zeit nicht im Handel.

b) Verfahren von Lindemann und Rohde. Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung des Verlustfaktors von Werkstoffen im Schwingungskreis beruht auf einem zuerst von Lindemann angegebenen Verfahren (Abb. 57). Hierbei wird nicht der Verlustfaktor

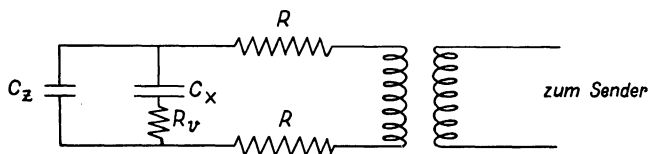


Abb. 57

$\tan \delta$  des Werkstoffs unmittelbar bestimmt, sondern sein Verlustwiderstand  $R_v$ . Als Meßkondensator ist wieder ein Schraubkondensator zu benutzen. Zwischen Kondensator und Spule lassen sich verschiedene Widerstände schalten. Es sind dann drei Amplitudenablesungen des Indikatorinstruments bei Resonanz erforderlich: 1. Wenn der Schraub-



kondensator die Werkstoffplatte enthält, 2. nach Entfernung der Werkstoffplatte, während die Platten des Kondensators bei unveränderter Frequenz so weit aneinandergedreht sind, bis wieder Resonanz auftritt, und 3. in der gleichen Stellung des Kondensators wie unter 2., jedoch unter Zusatz eines bekannten winkel- und skineffektfreien Widerstandes zwischen Spule und Kondensator. Die Zuschaltung des Widerstandes muß so erfolgen, daß eine Änderung der Selbstinduktion oder der Kapazität nicht eintritt. Die Größe des Widerstandes wird am besten so gewählt, daß sie den Ausschlag des Indikatorinstruments auf etwa den gleichen Betrag bringt wie bei der Messung mit Werkstoff. Es gilt:

$$(109) \quad R_v = R \frac{\frac{i_2}{i_1} - 1}{\frac{i_2}{i_3} - 1} \quad \text{und} \quad \tan \delta = R_v \cdot \omega \cdot C_x \left(1 + \frac{C_z}{C_x}\right)^2,$$

wobei wieder  $C_z$  die bei der  $X$ -Messung zu  $C_x$  parallel liegende verlustfreie Kapazität bedeutet, die sich bei der besprochenen Art der Messung im wesentlichen aus der Reihenschaltung der beiden Teilkapazitäten  $k_{10}$  und  $k_{20}$  der Kondensatorbelegungen gegen Erde bzw. gegen das geerdete Gehäuse der Anordnung zusammensetzt. Eventuell kommen noch die entsprechenden Kapazitäten der Zuleitungen sowie die Kapazität zwischen den Zuleitungen hinzu. Zur einwandfreien Messung erfordert diese Anordnung einen möglichst symmetrischen Aufbau. Man schaltet darum bei der Messung mit Widerstand am besten in jede Zuleitung einen gleich großen Widerstand. Geerdet wird die Hülle der ganzen Anordnung, gleichzeitige Erdung eines Plattensystems stört die Symmetrie. Die Messungen sind mit Fehlern infolge von Randstreuungen behaftet. Der Meßbereich dieser Anordnung reicht nach Angaben von Rohde bis zu Frequenzen von mehr als  $10^8$  Hertz. Während man bei Dämpfungsmessungen im Schwingungskreis große Verluste genauer als kleine messen kann, ist es bei dieser Anordnung umgekehrt. Kleine Verluste lassen sich bis auf die Fehler durch die Randstreuungen, die beiden Verfahren gemeinsam sind, wesentlich sicherer bestimmen als große. Beide Methoden ergänzen sich also gewissermaßen. Bei kleinen Verlusten beträgt die Meßgenauigkeit in der zuletzt beschriebenen Anordnung etwa  $1 \cdot 10^{-4}$  für den  $\tan \delta$ . Die Einstellgenauigkeit kann unter Umständen größer sein.

c) Weitere Methoden zur Verlustfaktormessung. Dielektrische Verluste lassen sich auch auf kalorimetrischem Wege ermitteln. Dabei wird die Erwärmung des Dielektrikums gemessen, die es bei Anlegung einer bestimmten Spannung in einer gegebenen Zeit erleidet. Das Verfahren gibt bei Vermeidung aller Fehlerquellen bis zu sehr hohen Frequenzen zuverlässige Resultate, erfordert aber einigen Zeit- und Meßaufwand. Der Hauptbestandteil der Anordnung ist das Kalorimeter. Ein allen Anforderungen gewachsenes Instrument ist von Pungs und Rieche angegeben worden, es ist besonders zur Ermittlung der dielektrischen Verluste von Flüssigkeiten geeignet. Mit dieser Anordnung konnten dielektrische Verluste zwischen 50 und  $3 \cdot 10^7$  Hertz und in einem Temperaturbereich von  $-60$  bis  $+100^\circ\text{C}$  gemessen werden.

Für Verlustmessungen bei Hochspannung werden auch wattmetrische Methoden angewendet.

Verlustmessungen und Bestimmungen der Dielektrizitätskonstanten bei sehr hohen Frequenzen (im Zentimeterwellengebiet) lassen sich mit den üblichen elektrischen Hilfsmitteln im allgemeinen nicht mehr durchführen, wohingegen aus der Optik bekannte Methoden unter Umständen noch zum Ziele führen. Es werden dabei aus der Reflexion der einfallenden Wellen an planparallelen Platten der Brechungsindex und aus der Durchlässigkeit der Absorptionskoeffizient bestimmt.

#### 4. Messung der Dielektrizitätskonstanten

a) Allgemeines Meßverfahren. Entsprechend ihrer Definition kann man die Dielektrizitätskonstante dadurch bestimmen, daß man die Kapazität zwischen zwei Kondensatorplatten einmal im Vakuum oder, für die meisten Fälle ausreichend, in Luft mißt ( $C_0$ ), und ein zweites Mal, wenn der Zwischenraum zwischen den Platten mit dem zu untersuchenden Werkstoff ausgefüllt ist ( $C_x$ ). Dann gilt

$$(110) \quad \varepsilon = \frac{C_x}{C_0}.$$

b) Messung an festen Körpern. Die Kapazitätsmessungen erfolgen, soweit feste Körper in Frage kommen, am besten nach einem der beschriebenen Brückenverfahren. Will man zuverlässige

Resultate erzielen, so hat man eine Reihe von Vorsichtsmaßregeln zu beachten. Das gilt zunächst für die Form der Versuchsstoffe und der Elektroden. Die Werkstoffe erhalten am besten die Gestalt von ebenen, flächenparallelen Platten. Die Elektroden (Kondensatorplatten) müssen an diese sehr gut anliegen. Luftzwischenräume ergeben zu niedrige Werte. Bewährt hat sich das Aufspritzen von Zinkelektroden. Allerdings muß dann die Kapazität  $C_0$  berechnet werden. Zu diesem Zwecke ist die Dicke des Werkstoffs vor der Bespritzung an mehreren Punkten zu messen. Die Bespritzung muß so erfolgen, daß sich scharfe Begrenzungen der Elektroden, am besten in Kreisform ergeben. Die einwandfreiesten Resultate erhält man, wenn die Belegungen nach Art des Schutzringkondensators ausgebildet werden (vgl. S. 9, 23 und 67). In Anordnungen, die Messungen mit dem Schutzringkondensator nicht zulassen, benutzt man den Dreiplattenkondensator mit kleinerer mittlerer Belegung. Aus dem zu untersuchenden Material werden zwei Platten von möglichst gleichen Abmessungen geschnitten. Die eine Seite jeder dieser Platten wird in ihrer ganzen Oberfläche bespritzt, die andere Seite mit einem zentralen Kreis, der wesentlich kleiner als die gesamte Platte ist. Die Platten werden, mit den kleinen Belegungen einander zugekehrt, so aufeinander gelegt, daß sich diese vollständig decken. Zwischen diese Belegungen wird als Stromzuführung ein dünner Draht gebracht. Belegungen und Draht müssen so dünn sein, daß der durch sie entstehende Luftspalt zwischen den Platten klein im Vergleich zur ganzen Plattendicke ist. Die äußeren großen Belegungen werden miteinander verbunden. Ihr Anschluß an eine Meßbrücke hat so zu erfolgen, daß ihre Kapazität gegen Erde in die Messungen nicht eingeht. Die Kapazität  $C_0$  ist nach Formel (15), S. 9, zu berechnen. Außer den in der Formel berücksichtigten beim Dreiplattenkondensator auftretenden Randstreuungen ist auch die Kapazität der Zuleitung zu den inneren Elektroden, soweit sie zwischen dem Dielektrikum verläuft, in Rechnung zu setzen. Gewisse kleine Fehler werden wegen der Randstreuungen trotzdem in Kauf genommen werden müssen. Am ungenauesten werden die Ergebnisse, wenn nur eine Platte mit zwei gleich großen Belegungen (Zweiplattenkondensator) zur Verfügung steht. — Eine weitere Methode (Mischungsverfahren) zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstante von festen Körpern siehe unter  $\delta$ .

c) Messungen an Flüssigkeiten.  $\alpha$ ) *Methode von Nernst für schwache Leitfähigkeiten.* Flüssige und gasförmige Dielektriken lassen sich, soweit sie keine oder nur sehr geringe Leitfähigkeit besitzen, in ganz analoger Weise messen. Man hat für diese Zwecke bestimmte Gefäße konstruiert, die mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt werden. In der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt wird z. B. ein Schutzringzylinderkondensator benutzt. Diese Messungen können jedoch durch Leitfähigkeit stark gefälscht werden. Ein Verfahren zur Kompensation der Leitfähigkeit schwach leitfähiger Flüssigkeiten stammt von Nernst. Die Untersuchungen erfolgen in einem Metallgefäß, das als eine Elektrode dient, und in dessen Innerem sich eine zweite feststehende Elektrode befindet. Die Schaltung geht aus Abb. 58 hervor.  $R_1, R_2, R_3$  und  $R_4$  sind Flüssigkeitswiderstände,  $R_1$  und  $R_2$  sind gleich groß.  $C_3$  und  $C_4$  sind veränderliche Kondensatoren.  $C_x$  wird zunächst zu  $C_3$  und dann zu  $C_4$  parallel geschaltet, dabei wird jedesmal mit  $C_4$  und bei vorhandener Leitfähigkeit auch mittels der Widerstände  $R_3$  bzw.  $R_4$  die Brücke angeglichen. Es ist dann  $\Delta C_4 = 2 C_x$ . Der Meßkondensator wird der Reihe nach mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, einer Eichflüssigkeit, und mit Luft gefüllt. Aus den jedesmal durch  $\Delta C_4$  bestimmten Kapazitäten  $C_x, C_n$  und  $C_0$  mit den Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_x, \epsilon_n$  und 1 ergibt sich

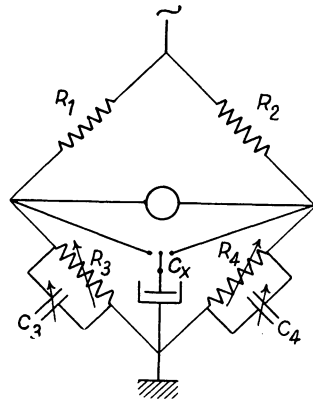


Abb. 58

$$(111) \quad \epsilon_x = (\epsilon_n - 1) \frac{C_x - C_0}{C_n - C_0} + 1.$$

Die Messung mit Luft als Dielektrikum erfolgt zum Zwecke der Eliminierung der Zuleitungen.

$\beta$ ) *Methode von Nernst für mittlere Leitfähigkeiten.* Bei größerer Leitfähigkeit erfolgt die Messung mit Hochfrequenz von etwa  $10^6$  Hertz. Eine geeignete Schaltung ist von Nernst angegeben worden. Sie enthält (vgl. Abb. 59) außer  $C_x$  und einem veränderlichen Vergleichskondensator  $C_2$  zwei feste und gleich große Kondensatoren  $C_3$  und  $C_4$ .

Als Generator dient ein Röhrensender, als Indikator ein Detektor mit Galvanometer, oder man benutzt ein Überlagerungsverfahren mit Röhrengenerator und Telefon. Flüssigkeiten mit einem Leitvermögen von  $2 \cdot 10^{-5}/\text{Ohm} \cdot \text{cm}$  lassen sich hiermit noch ohne Schwierigkeiten messen.

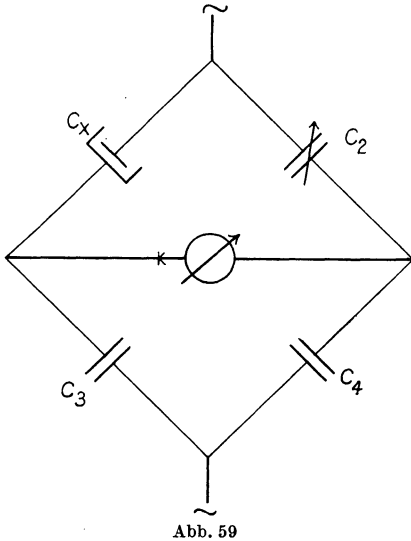


Abb. 59

*γ) Messungen mit Hochfrequenz am Lecherdrahtsystem.* Wenn elektrische Schwingungen einer gegebenen Frequenz in ein dielektrisches Medium mit der Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon$  eintreten, so ist ihre Wellenlänge  $\lambda$  gegeben durch

$$(112) \quad \lambda = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \text{const.}$$

Mißt man die Wellenlänge einer solchen Schwingung einmal in Luft ( $\lambda_0$ ), ein anderes Mal in dem

zu untersuchenden Dielektrikum ( $\lambda_x$ ), so erhält man die gesuchte Dielektrizitätskonstante aus der Beziehung:

$$(113) \quad \epsilon = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_x} \right)^2.$$

Messungen nach dieser Methode sind zuerst von Drude ausgeführt worden, der für seine Versuche sehr kurze gedämpfte (Hertz'sche) Wellen benutzte. Seitdem es gelungen ist, auch mit Röhrensendern solche kurzen, aber ungedämpften Wellen zu erzeugen, wird man diesen Anordnungen den Vorzug geben. Der Aufbau ist folgender: Mit dem Schwingungskreis der Röhren wird ein Lechersches Drahtsystem lose gekoppelt. Dieses besteht aus zwei parallelen Drähten von 1 bis 2 mm Drahtdurchmesser und einigen cm Drahtabstand, deren Länge groß gegen diesen Drahtabstand ist. Wird dieses Drahtsystem durch einen Sender zu Schwingungen erregt, so bilden sich, falls die Länge der Doppeldrähte  $l = k \frac{\lambda}{2}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) ist, stehende elektri-

sche Wellen aus. Die dann auftretenden Spannungs- und Strombäuche lassen sich durch Geißlersche Röhren, Bolometer, Thermoelemente, Detektoren u. a. Instrumente, zum Teil in Verbindung mit Galvanometern nachweisen. Statt ein offenes Drahtsystem zu benutzen, kann man auch die beiden Drähte an ihren Enden durch Drahtstücke leitend verbinden. Die Resonanzabstimmung wird mittels eines längs der Drähte verschiebbaren, sie überbrückenden Drahtbügels vorgenommen. Aus dem Abstand zweier Bäuche oder Knoten läßt sich die Wellenlänge  $\lambda$  bestimmen.

Zur Messung der Dielektrizitätskonstanten werden die Drähte innerhalb eines Glastroges geführt, der mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt werden kann. Es wird dann  $\lambda$  zunächst ohne Füllung und darauf mit der Flüssigkeit im Trog bestimmt. Die Wellenlänge läßt sich auf mehr als 0,1 % genau messen. Die Wände des Troges müssen möglichst weit von den Drähten entfernt sein, da sonst an den Werten noch kleine Korrekturen anzubringen sind.

Falls zu geringe Substanzmengen für solche Messungen zur Verfügung stehen, werden diese in kleine, zwei Elektroden enthaltende Kondensatorflaschen gefüllt. Die an den Enden offenen Lecher-Drähte werden zunächst mit der Kondensatorflasche, darauf durch einen Metallbügel überbrückt. Die Anordnung bedarf einer empirischen Eichung mit Flüssigkeiten bekannter Dielektrizitätskonstante.

*δ) Die Wiensche Barrettermethode.* Eine Methode, die die gleichzeitige Messung von Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit gestattet, ist von Max Wien und seinen Schülern entwickelt worden, sie ist sowohl bei niedrigen als auch bei sehr hohen Frequenzen brauchbar. Als Wechselstromgenerator dient ein Röhre sender, als Indikator eine Barretterbrücke. Die Schaltung ist aus Abb. 60 zu ersehen. Der an die Meßanordnung angelegte Wechselstrom teilt sich in zwei Zweige, einen Meßzweig 1 und einen Vergleichszweig 2. Beide Zweige werden bei der Messung einander gleich gemacht, so daß sie von zwei gleichen Strömen durchflossen werden. Diese wirken auf zwei Zweige einer Barretterbrücke so, daß die Widerstandserhöhung in den beiden Barretterzweigen infolge ihrer Erwärmung gleich groß ist und dadurch das Gleichgewicht der Gleichstrombrücke nicht gestört wird. Das Verfahren ist eine Nullmethode, bei der man jedoch nicht, wie sonst üblich, auf das Verschwinden eines Wechselstroms, sondern auf die Gleichheit der beiden Ströme  $I_1$  und  $I_2$  einstellt. Die Ankoppelung an die

Barretter erfolgt induktiv. Die in den beiden Zweigen vorhandenen Selbstinduktionen werden durch mit ihnen in Reihe geschaltete Kondensatoren kompensiert. Bei symmetrischem Aufbau ist die Anordnung im Gleichgewicht, wenn  $\omega^2 LC = 1$  und  $R_1 = R_2$  ist. Da jedoch völlige Gleichheit der Zweige, zumal bei hohen Frequenzen, nur schwer zu erreichen

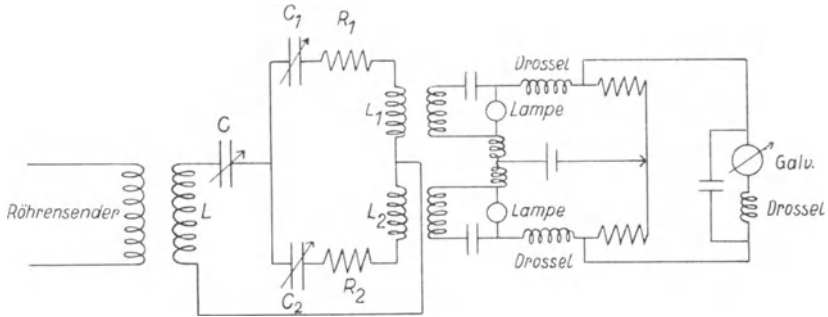


Abb. 60. M. wiensche Barrettermethode

ist, wendet man besser ein Substitutionsverfahren an, d. h. man ersetzt bei ungeändertem Vergleichszweig die zu messenden Größen durch bekannte, wobei sich Form und Potentialverteilung der Zweige nicht ändern dürfen. Eine praktische Ausführung solcher Messungen, bei

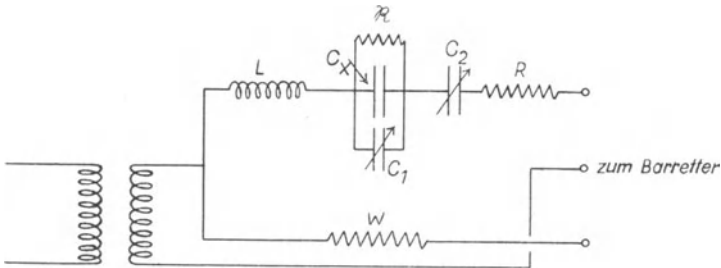


Abb. 61

mittleren Frequenzen ist von Schreck beschrieben (Abb. 61). In den Meßzweig wird außer dem Kompensationskondensator  $C_2$  ein veränderlicher Widerstand  $R$ , sowie ein weiterer Drehkondensator  $C_1$  in Reihe geschaltet. Zu letzterem parallel liegt das mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllte Meßgefäß. Zunächst wird nun der Kreis mit Hilfe von  $C_2$  und  $R$  auf Resonanz abgestimmt, darauf wird das

Meßgefäß abgeschaltet und der Zweig erneut, dieses Mal aber mit  $C_1$  und  $R$  abgestimmt. Außerdem ist noch eine dritte Messung notwendig mit angeschlossener, aber leerem Gefäß. Ist  $C$  die Kapazität des Kondensators  $C_1$  ohne Gefäß,  $C'$  diejenige mit gefülltem Gefäß und  $C_0$  die Kapazität des leeren Gefäßes, so ergibt sich

$$(114) \quad \varepsilon = \frac{C}{1 + \omega^2 C^2 \Delta R^2} - C'$$

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}$$

und der dem Gefäß parallel geschaltete Verlustwiderstand  $\Re$  zu

$$(115) \quad \Re = \frac{1 + \omega^2 C^2 \Delta R^2}{\omega^2 C^2 \Delta R}$$

Von Hackel wurde die Methode auch auf Messungen an festen Stoffen ausgedehnt. Seine Anordnung, die besonders auch für kurze Wellen

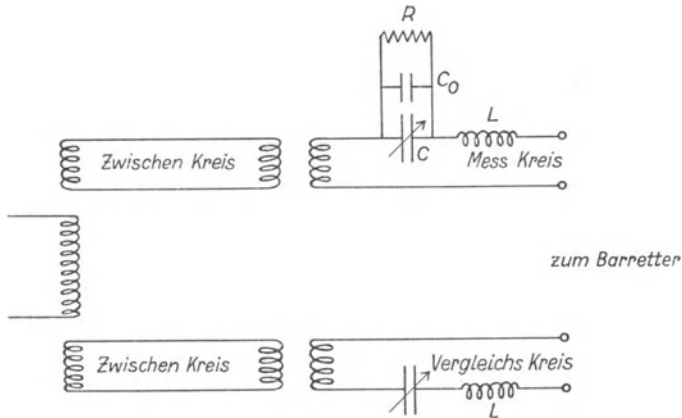


Abb. 62

zugeschnitten ist, ist in Abb. 62 wiedergegeben. Der zu untersuchende Stoff wird zwischen die Elektroden eines mit Flüssigkeit gefüllten Kondensators gebracht. Die Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit der Flüssigkeit werden so lange geändert, bis sie mit der Dielektrizitätskonstanten und der Leitfähigkeit des festen Stoffes übereinstimmen. Das ist dann der Fall, wenn beim Eintauchen und Herausnehmen des Körpers keine Änderung in der Resonanzkurve des Kreises mehr eintritt. Die Messungen sind unabhängig von den Dimensionen und der Form



des zu messenden Stoffes. Die Dielektrizitätskonstante und die Leitfähigkeit der Flüssigkeit sind dann gesondert zu bestimmen. Bei Messungen Hackels zwischen 12000 und 10 m Wellenlänge ergab sich für die Leitfähigkeit eine prozentuale Meßunsicherheit von 2 % und für die Dielektrizitätskonstante eine solche von 0,5 %.

d) Messungen an Gasen. Da sich die Dielektrizitätskonstanten von Gasen nur sehr wenig unterscheiden, so müssen die Kapazitäten des Meßkondensators sehr genau bestimmt werden. Zum Vergleich wird am besten der evakuierte und nicht mehr der mit Luft gefüllte Meßkondensator benutzt. Geeignet zur Messung kleiner Kapazitätsdifferenzen sind Schwebungsmethoden. Zwei Sender werden auf nahezu gleiche Frequenz eingestellt. Im Telephon eines mit beiden Sendern gekoppelten Röhrengleichrichters ist dann ein Schwebungston zu hören. Im Schwingungskreis des einen der beiden Sender befindet sich der Meßkondensator und ihm parallel ein fein verstellbarer Normaldrehkondensator. Der Meßkondensator ist zunächst evakuiert und seine Kapazität wird in diesem Zustand durch Substitution mit einem Normalkondensator bestimmt, darauf wird er mit dem zu messenden Gas gefüllt. Dadurch ändert sich seine Kapazität und damit der Schwebungston zwischen den beiden Sendern. Mit Hilfe des Drehkondensators läßt sich der alte Ton wieder herstellen. Besser ist es, in beiden Fällen auf Schwebungsnul zwischen den Sendern einzuregeln, wobei allerdings darauf zu achten ist, daß sich die Sender nicht gegenseitig „mitnehmen“. Die Frequenz des Vergleichssenders wird am besten durch Quarze stabilisiert.

## IV. Literaturverzeichnis

### Zu I

- Maxwell, A treatise on Electricity and Magnetism. 1, 1892.
- Orlich, Kapazität und Induktivität, Braunschweig 1909.
- Handbuch der Physik, Bd. 16.
- Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 10 und 11.
- Kirchhoff, Gesammelte Abhandlungen, Leipzig 1882.
- J. J. Thomson, Rec. Res. in El. and Magn. Art. 237, 1893.
- Coffin, Edges corrections in the calculation of the absolute capacity of condensers by the Schwarzian transformation. Proc. Amer. Acad. 39, 415, 1903.
- Rosa and Dorsey, A new determination of the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit of electricity. Bull. Bur. Stand. 3, 433, 1907.
- Kaufmann, Zur Theorie des Kondensators. Phys. Z. 8, 75, 1907.
- Grüneisen u. Giebe, Anwendung des Dreiplattenkondensators zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten fester Körper. Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 14, 921, 1912.
- Woodrow, Determination of capacities by means of conjugate functions. Phys. Rev. 35, 434, 1913.
- Jäger, Die Dielektrizitätskonstante fester Körper bei verschiedenen Wellenlängen. Ann. d. Phys. 53, 409, 1917.
- Jenss, Kapazitätsberechnung für einen Draht im quadratischen Zylinder. Arch. f. Elektrotechn. 24, 317, 1930.
- Ignatowsky, Kreisscheibenkondensator. Trav. Inst. Phys. Math. Stekloff 2, 1932.
- Yoganadam; The capacitance of a guard-ring sphere-gap. Journ. Inst. Electr. Eng. 71, 830, 1932.
- Keller u. Lehmann, Experimentelle Bestimmung der Randkorrektur für Plattenkondensatoren verhältnismäßig kleinen Durchmessers und großer Dicke. Z. f. Phys. 85, 253, 1933.
- Nitka, Kapazitätsberechnung eines Kreisplattenkondensators mit keilförmig zueinander liegenden Elektroden. Z. f. Phys. 85, 504; 86, 831, 1933.
- Dawes, Capacitance and potential gradients of eccentric cylindrical condensers. Physics 4, 81, 1933.

- Clay, Accurate determination of the absolute capacity of condensers. *Physica* **3**, 757, 1936.
- Palmer, The capacitance of a parallel plate capacitor by the Schwartz-Christoffel-transformation. *Electr. Eng.* **56**, 363, 1937.
- Fränkel, Theorie der Wechselströme. 1921.
- Russel, Alternating currents.
- Kennelly, The equivalence of triangles and three-pointed stars in conducting networks. *Electr. World* **34**, 413, 1899.
- K. W. Wagner, Dielektrische Nachwirkung. *Ann. d. Phys.* **40**, 817, 1913.
- P. Debye, Polare Molekeln. Leipzig 1929.
- Carpenter, The modern theory of dielectrics. *World Paper* **14**, 391, 1930.
- Hamburger, Polar molecules, their contribution to energy loss in dielectrics. *Phys. Rev.* **35**, 657, 1119, 1930.
- Schupp, Zur Physik der dielektrischen Verluste. *Wissensch. Veröff. a. d. Siemens-Werken* **17**, 1, 1938.

## Zu II

- Glazebrook, On the air condensers of the British Association. *Elecn.* **25**, 616, 637, 1890.
- Briggs, A new form of electrical condenser having a capacity capable of continuous adjustment. *Phys. Rev.* **11**, 14, 1900.
- Gerdien, Die Messung kleiner Kapazitäten mittels einer meßbar veränderlichen Normalkapazität. *Phys. Z.* **5**, 294, 1904.
- Coffin, The effect of frequency upon the capacity of absolute condensers. *Phys. Rev.* **25**, 123, 1907.
- Giebe, Normalluftkondensatoren und ihre absolute Messung. *Z. f. Instrkde.* **29**, 269, 301, 1909.
- M. Wien, Über die Dämpfung von Kondensatorschwingungen. III. Leidener Flaschen, Öl- und Preßgaskondensatoren. *Ann. d. Phys.* **29**, 679, 1909.
- Curtis, Mica condensers as standards of capacity. *Bull. Bur. Stand.* **6**, 431, 1910.
- Grover, The capacity and phase difference of paraffined paper condensers as functions of temperature and frequency. *Bull. Bur. Stand.* **7**, 495, 1911.
- Petersen, Hochspannungstechnik. 1911.
- Schering u. Schmidt, Ein Satz Normalluftkondensatoren mit definierter Schaltungskapazität. *Z. f. Instrkde.* **32**, 253, 1912.
- Semm, Verlustmessungen bei Hochspannung. *Arch. f. Elektrotechn.* **9**, 30, 1921.
- Giebe, u. Zickner Verlustmessungen an Kondensatoren. *Arch. f. Elektrotechn.* **11**, 109, 1922.

- Meyer, Verlustmessungen an Kondensatoren. *Telegr.- u. Fernspr.-Techn.* **4**, 1, 1923.
- Hartshorn, Note on the capacities of small air condensers. *Journ. scient. Instr.* **1**, 305, 1924.
- Oliver, The screening of small variable air condensers. *Exp. W. and W. Eng.* **2**, 970, 1925.
- Schering, Das Kabelphantom. *Z. f. Instrkde.* **45**, 192, 1925.
- Zickner, Ein Differentialkondensator für Feinstellzwecke. *Jahrb. drahtl. Tel.* **25**, 26, 1925.
- Oliver, Small standard air condensers of low minima. *Journ. scient. Instr.* **4**, 65, 1926.
- Palm, Über neuere Hochspannungsmeßgeräte und ihre Anwendung. *ETZ.* **47**, 905, 1926.
- Curtis, Standards for measuring the power factor of dielectrics at high voltage and low frequency. *Journ. Amer. Inst. Electr. Eng.* **45**, 1084, 1926.
- Rayner, The design and use of an air condenser for high voltages. *Journ. scient. Instr.* **3**, 33, 70, 104, 1926.
- Wulf, Ein Zylinderkondensator zur Messung kleiner Kapazitäten. *Phys. Z.* **26**, 353, 1925.
- Gerth u. Gönningen, Die neue Entwicklung des Glimmerkondensators. *ETZ.* **50**, 1156, 1926.
- Griffiths, The accuracy and calibration permanence of variable air condensers for precision wavemeters. *Exp. W. and W. Eng.* **5**, 17, 63, 1928.
- Schering u. Vieweg, Ein Meßkondensator für Hochspannungen. *Z. f. techn. Phys.* **9**, 442, 1928.
- Oliver, Quartz metal joints and their application to standard air condensers of low range. *Journ. scient. Instr.* **5**, 9, 1928.
- Griffiths, An new precision variable air condenser. *Journ. scient. Instr.* **6**, 297, 1929.
- Ogawa, Further researches on alternating current bridges with perfect earthing device. *Res. El. Lab. Tokyo* 1930.
- Kuhlmann, Meßkondensator mit einer von exakt Null linear ansteigenden Kapazität. *Arch. f. Elektrotechn.* **25**, 666, 1931.
- Maloff, Mica condensers in high frequency circuits. *Proc. Inst. Radio Eng.* **20**, 647, 1932.
- Curtis, Sparks, Hartshorn and Asbury, Capacitance and power factor of a mica capacitor at the Bureau of Standards and the National Physical Laboratory. *Bur. of Stand. Journ. of Res.* **8**, 507, 1932.
- Giebe u. Zickner, Über die Kapazitätsnormale der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. *Z. f. Instrkde.* **53**, 1, 49, 97, 1933.
- Holzer u. Hochhäusler, Ein Hochspannungsmeßkondensator einfacher Bauart. *ETZ.* **54**, 913, 1933.

- Balsbaugh, The inherent power factor of air condensers and the limits of power-factor-bridge-measurements. *Phys. Rev.* **45**, 286, 1934.
- Zickner, Normalkondensatoren für sehr kleine Kapazitäten. *Tätigkeitsber. d. PTR.* 1935.
- Zickner, Normalluftkondensatoren (unveränderbare Modelle). *ATM. Z.* **131/3**.
- Zickner, Normalluftkondensatoren (regelbare Modelle). *ATM. Z.* **135/1**.
- Zickner, Absolute Kapazitätsnormale. *ATM. Z.* **131/1**.
- Thomas, The electrical stability of condensers. *Journ. Inst. Electr. Eng.* **79**, 297, 1936.
- Zickner u. Blechschmidt, Kurzwellenmesser. *Phys. Z.* **38**, 242, 1937.
- Gohlke, Temperaturabhängigkeit von Drehkondensatoren mit Luftdielektriken. *ENT.* **14**, 258, 1937.
- Thomas, Coils and condensers of negligible temperature-coefficient. *Journ. scient. Instr.* **14**, 221, 1937.
- Horst, Über Zeitkonstanten von Kondensatoren. *Arch. f. Elektrotechnik.* **31**, 273, 1937.
- Holzner, Verhalten von veränderlichen Luftkondensatoren bei HF und Meßverfahren an ihnen. *Alta Frequ.* **7**, 582, 1938.
- Albers-Schönberg u. Gingold, Neues Steatit als Isolierstoff für Hochfrequenz. *ETZ.* **53**, 205, 1932.
- R. Vieweg u. Pfestorf, Stand der Isolierstoffforschung. *ETZ.* **54**, 569, 1933.
- Weicker, Porzellan und verwandte keramische Isolierstoffe. *ETZ.* **54**, 543, 1933.
- Albers-Schönberg, Die Isolierstoffe der Steatitgruppe. *ETZ.* **54**, 545, 1933.
- Rohde, Fortschritte auf dem Gebiete der Hochfrequenzisolerstoffe. *Z. f. techn. Phys.* **14**, 480, 1933.
- Handrek, Keramische Werkstoffe in der Hochfrequenztechnik. *Z. V. d. Ing.* **8**, 1441, 1934.
- Handrek, Neue Hochfrequenzisolerstoffe. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **43**, 73, 1934.
- R. Vieweg, Elektrische Isolierstoffe. *ETZ.* **55**, 573, 1934.
- Keller, Dielektrische Hochfrequenzverluste. *Bull. Schweiz. elektrot. Ver.* **25**, 718, 1934.
- Handrek, Hochfrequenzisolerstoffe geringer Verluste und hoher Dielektrizitätskonstante. *Z. f. techn. Phys.* **15**, 491, 1934.
- Albers-Schönberg, Soyck u. Ungewiß, Ein Fortschritt im Aufbau keramischer Dielektriken. *ETZ.* **56**, 226, 1935.
- Soyck, Keramische Dielektrika. *Schweiz. Arch. angew. Wissensch. u. Techn.* **2**, 159, 1936.

- Handrek, Keramische Werkstoffe in der Hochfrequenztechnik. ETZ. 58, 475, 1937.
- Lépingle, Les masses céramiques spéciales. Application technique aux hautes températures et à l'électricité. Electricité 21, 222, 1937.
- Albers-Schönberg, Poröse keramische Stoffe für die Zwecke der Hochfrequenzisolation. VDE.-Fachber. 9, 224, 1937.
- Albers-Schönberg, Hochfrequenzkeramik. Leipzig 1939.

## Zu III

- Maxwell, Elektrizität I. Berlin 1883.
- Orlich, Kapazität und Induktivität. Braunschweig 1909.
- Jäger, Elektrische Meßtechnik. Leipzig 1922.
- Rein-Wirtz, Radiotelegraphisches Praktikum. Berlin 1922.
- Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik. Leipzig 1938.
- Brion-Vieweg, Starkstrommeßtechnik. Berlin 1933.
- Krönert, Meßbrücken und Kompensatoren. München 1935.
- Campbell and Childs, The measurement of inductance, capacitance and frequency. London 1935.
- Hague, Alternating current bridge methods. London 1938.
- Thomson, On the determination of the number of the electrostatic units in the electromagnetic units of electricity. Phil. Mag. 174, 707, 1883.
- Rosa and Grover, The absolute measurement of capacity, Bull. Bur. Stand. 1, 175, 1905.
- Diesselhorst, Zu Maxwells Methode der absoluten Messung von Kapazitäten. Ann. d. Phys. 19, 383, 1906.
- Rosa and Dorsey, An new determination of the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit of electricity. Bull. Bur. Stand. 3, 557, 1907.
- Giebe, Ein empfindlicher Tourenregler für Elektromotoren. Z. f. Instrkde. 29, 205, 1909.
- Grüneisen u. Giebe, Eine neue Bestimmung der absoluten elektrischen Widerstandseinheit. Ann. d. Phys. 63, 179, 1928; Wiss. Abh. d. Phys.-Techn. Reichsanstalt 5, 1, 1921.
- Campbell, Maxwells commutator bridge method. Glazebrooks dictionary of applied physics 2, 125, 1922.
- Curtis and Moon, A absolute measurements of capacity by Maxwells method. Scient. Pap. of the Bur. Stand. 22, 487, 1927.
- Strancke, Zur Maxwell-Thomsonschen Methode der absoluten Kapazitätsmessung. Z. f. Instrkde. 48, 432, 1928.
- Giebe, Ein empfindlicher Drehzahlregler für Elektromotoren. Z. f. Instrkde. 52, 345, 1932.

- Yoneda and Yamaguchi, Absolute measurement of capacity by Maxwells bridge method. Res. Electrot. Lab. Tokyo 1933, S. 355.
- Telang, On the working of a rotating commutator. Indian Journ. Phys. 8, 365, 1934.
- Wright and Graham, A capacity-measuring-bridge. Journ. scient. Instr. 12, 220, 1935.
- Curtis, Moon and Sparks, An absolute determination of the ohm. Bur. Stand. Journ. Res. 16, 1936.
- Granier, Sur une importante cause d'erreur dans la mesure des capacités au ballistique. C. R. 202, 1916, 1936.
- Zickner, Göns, Blechschmidt, Vergleich des absoluten und des internationalen Ohm. Tätigkeitsber. d. PTR. 1938.
- Scheibe u. Adelsberger, Aussendung von Normalfrequenzen über den Deutschlandsender. Phys. Z. 40, 216, 1939.
- Thomson, Soc. Tel. Eng. J. 1, 397, 1873.
- Gott, Messung der elektrostatischen Kapazität von Kabeln und Kondensatoren. Soc. Tel. Eng. 10, 278, 1881.
- Schwendler, On the galvanometer resistance to the employed in testing with Wheatstones diagram. Phil. Mag. 31, 364, 1866.
- Lord Rayleigh, On the sensitiveness of the bridge method in its application to periodic electric currents. Proc. Roy. Soc. 49, 203, 1891.
- Heaviside, Electrical Papers 1, 1892.
- Campbell, The shieldes balance. Electr. World 43, 647, 1904.
- K. W. Wagner, Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke. ETZ. 32, 1001, 1911.
- Dye, The „Wagner“ earth connection. Elecn. 87, 55, 1921.
- Oliver, The elimination of magnetic induction in the telephone detector in refined alternating current measurements. Journ. Scient. Instr. 3, 122, 1926.
- Ogawa, General theory and earthing device of alternating current bridges. Res. Electrot. Lab. Tokyo 1929.
- A. C. Bridge measurements. Frequency. Variation. Amplifiers. Spurious currents. Shielding. Electrician 106, 488, 1931.
- Ferguson, Shielding in high frequency measurements. Journ. Am. Inst. Electr. Eng. 48, 517, 1929.
- Detmar, Störungen durch Oberwellen bei Brückenmessungen. Arch. f. Elektrot. 25, 537, 1931.
- Schering, Die Empfindlichkeit einer Wechselstrombrücke. ETZ. 52, 1133, 1931.
- Walcher, Über die Verwendung von Ein- und Ausgangstransformatoren bei genauen Brückenmessungen. Elektrot. und Maschinenb. 51, 397, 1933.

- Tamm, Genauigkeit von Wechselstrommeßbrücken. *Z. f. techn. Phys.* **14**, 472, 1933.
- Küpfmüller, Über die Konvergenz der Brückenmeßverfahren. *Elektrot. und Maschinenb.* **51**, 204, 1933.
- Curtis, Shielding and guarding electrical apparatus used in measurements. General principles. *Journ. Amer. Inst. Electr. Eng.* **48**, 453, 1929.
- Mie, Über die Funktion von Abstimmanzeigeröhren, insbesondere über die Telefunkenröhren AM 2 und C/EM 2. *Die Telefunkenröhre* **161**, 1937.
- Die Schaltung der Abstimmanzeigeröhren als Brückenindikator. *Philips Techn. Rundschau* **2**, 270, 1937.
- Garman, A bridge balance indicator. *Rev. Scient. Instr.* **8**, 327, 1937.
- Koehler, The 6 ES alternating current bridge detector. *Rev. Scient. Instr.* **8**, 450, 1937.
- Lamson, Electronic null detector for impedance bridges. *Rev. Scient. Instr.* **9**, 272, 1938.
- Graffunder, Nullspannungsindikatoren für Wechselstrom. *ATM. J.* 850/4.
- Lamson, A new detector for a.-c.-impedance-bridges. *Gen. Radio Experimenter* **13**, 11, 5, 1939.
- Glazebrook, On a method of comparing the electrical capacity of two condensers. *Proc. Phys. Soc.* **4**, 207, 1881.
- M. Wien, Messung der Inductionsconstanten mit dem optischen Telefon. *Wied. Ann.* **44**, 689, 1891.
- Grover, Simultaneous measurement of capacity and power factor of condensers. *Bull. Bur. of Stand.* **3**, 371, 1907.
- K. W. Wagner, Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke. *ETZ.* **32**, 1001, 1911.
- K. W. Wagner, Die Messung der dielektrischen Ableitung und Kapazitäten mehradriger Kabel mit Wechselstrom. *ETZ.* **33**, 635, 1912.
- Schering, Tätigkeitsbericht der PTR., *Z. f. Instrkde.* **40**, 124, 1920.
- Giebe u. Zickner, Verlustmessungen an Kondensatoren. *Arch. f. Elektrot.* **11**, 109, 1922.
- Bousman, A bridge for capacitance and low power-factor measurements. *Gen. Electr. Rev.* **35**, 295, 1932.
- Kouwnhoven and Banos, A high sensitivity power factor bridge. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* **51**, 202, 1932.
- Benedict, Measurement of dielectric power-factor. *Electr. Journ.* **31**, 239, 1934.
- Marketu, Über eine einfache Methode zur Messung von Kapazitäten mit großer Genauigkeit. *Phys. Z.* **35**, 629, 1934.
- Berberich, Measuring equipment for oil power factor. *Electr. Eng.* **55**, 264, 1936.



- Blechschmidt, Dielektrische Eigenschaften von Manganferriten. Phys. Z. **39**, 212, 1938.
- Hartshorn, A method of measuring very small capacities. Proc. Phys. Soc. **36**, 399, 1924.
- Harms, Über eine Vorrichtung zur exakten Eichung von Elektrometern und ihre Anwendung auf die absolute Messung äußerst geringer Stromstärken. Phys. Z. **5**, 47, 1904.
- Hoffmann, Die Verwendung des Thomsonschen Schutzringkondensators zu absoluten Kapazitätsbestimmungen nach der Influenzierungsmethode. Phys. Z. **15**, 360, 1914.
- Rosa u. Dorsay, A new determination of the ratio of the electromagnetic to the electrostatic unit of electricity. Bull. Bur. Stand. **3**, 442, 1907.
- Pungs u. Preuner, Verfahren zur Messung sehr kleiner Kapazitäten. Phys. Z. **20**, 543, 1919.
- Herweg, Die Messung sehr kleiner Kapazitätsänderungen mittels ungedämpfter Schwingungen. Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **21**, 572, 1919.
- Hammer, Messung kleiner Selbstinduktions- und Kapazitätsänderungen mittels ungedämpfter Schwingungen. Ber. Naturf. Ges. Freiburg **22**, 2, 1920.
- Falckenberg, Differentialschaltung zur Messung von Kapazitäten und Selbstinduktionen. Ann. d. Phys. **61**, 167, 1920.
- Glitsch, Messung kleiner Kapazitäten nach dem Resonanzschwebungsverfahren. Phys. Z. **23**, 544, 1922.
- Hartshorn, A method of measuring very small capacities. Proc. Phys. Soc. **36**, 399, 1924.
- Giebe u. Schering, Messung kleiner Kapazitäten mit Doppelunterbrecher. Z. f. Instrkde. **46**, 116, 1926.
- Weihe, Messung von Kapazitäten mit dem Überlagerungsverfahren. Jahrb. drahtl. Tel. **32**, 185, 1928.
- Wheeler, Measurement of vacuum-tube capacities by a transformer balance. Inst. Radio Eng. **16**, 476, 1928.
- Walsh, Direct capacity bridge for vacuum tube measurements. Proc. Radio Eng. **16**, 482, 1928.
- Klotz, Messung der Gitter-Anodenkapazität von Schirmgitterröhren. Telef. Ztg. **9**, 34, 1928.
- Niemeyer, Messung kleiner Kapazitätsänderungen mittels ungedämpfter elektrischer Schwingungen. Diss. Hannover 1929.
- Loughren and Parker, Measurement of direct interelectrode capacitance of vacuum tubes. Proc. Inst. Radio Eng. **17**, 957, 1929.
- Zickner, Eine Meßbrücke für sehr kleine Kapazitäten. ENT. **7**, 443, 1930.
- Bruun, Bestimmung der Röhrenkapazitäten  $C_{ga}$  und  $C_{gk}$  mit Hilfe von Scheinwiderstandsmessungen. Jahrb. drahtl. Tel. **35**, 105, 1930.

- Kolhörster, Bestimmung der Konstanten, insbesondere der Kapazität von Strahlungsapparaten. Phys. Z. **31**, 980, 1930.
- A. Schulze u. G. Zickner, Eine Methode zur Registrierung von Kapazitätsänderungen und ihre Anwendung zur laufenden Beobachtung physikalischer Vorgänge. Arch. f. Elektrot. **24**, 111, 1930.
- D. V. Gogate and D. S. Kothari, On the application of the ultrashort wave method to the measurement of small capacities and dielectric constants. Ind. Journ. Phys. **5**, 417, 1930.
- K. Schlesinger, Eine einfache Anordnung zum Messen kleiner Kapazitäten. Z. f. techn. Phys. **11**, 537, 1930.
- H. M. Barlow, A new method of measuring the capacity of small condensers. Phil. Mag. (7) **11**, 184, 1931.
- J. A. C. Teegan, A spark method of measuring high resistance. Nature **128**, 585, 1931.
- Clay, Genaue und absolute Messung kleiner Kapazitäten. Z. f. Phys. **78**, 250, 1936.
- Rinkel, Bestimmung von Elektrometerkapazitäten. Phys. Z. **33**, 544, 1932.
- G. Zickner, Die Messung sehr kleiner Kapazitäten in der Brückenschaltung. Funkbastler **9**, 161, 1932.
- Van den Akker, A method for measuring small capacities. Rev. Scient. Instr. (N. S.) **3**, 225, 1932.
- H. Lampe, Messung kleiner Kapazitäten. Z. f. Phys. **79**, 254, 1932.
- Giebe u. Zickner, Über die Kapazitätsnormale der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Z. f. Instrkde. **53**, 1, 1933.
- W. Bünger, Über die Messung sehr kleiner Kapazitätsänderungen. Z. f. Phys. **91**, 679, 1934.
- L. Kozma, Schaltungen zur Bestimmung kleiner Kapazitätsänderungen mit besonderer Berücksichtigung des Hochfrequenzkondensatormikrophons. Diss. Karlsruhe 1934.
- W. H. Watson, Measurement of small capacities in terms of mutual inductance and resistance. Canad. Journ. Res. (A), **13**, 5, 1935.
- Spencer-Smith, A routine instrument for the measuring small capacities. Journ. scient. instr. **12**, 316, 1935.
- Siemens u. Halske, Siemens-Verlustfaktor-Meßeinrichtung für kleine Kapazitäten und Spannungen bis 5000 Volt. Arch. techn. Messen **5**, 64, 1936.
- Astbury and Lorwerth, A capacitance attenuator and its application to the measurement of very small capacities. Journ. scient. instr. **13**, 407, 1936.
- Oliphant, A new method for recording minute changes of capacitance. Journ. scient. instr. **14**, 5, 1937.
- Schering u. Burmester, Tätigkeitsber. der PTR. Z. f. Instrkde. **44**, 98, 1924.

- Hauffe, Zur Theorie der Scheringschen Brücke. Arch. f. Elektrot. **17**, 422, 1926.
- Tschiassny, Die Meßgenauigkeit der Scheringbrücke. Arch. f. Elektrot. **18**, 248, 1927.
- Curcher and Dannatt, The use of the Schering bridge at 150 kilovolts. World Power **5**, 238, 1926.
- Beldi, Eine Hochspannungsbrücke für Verlustmessungen an Isolierstoffen. Bull. Schweiz. el. Ver. **21**, 197, 1930.
- Rayner, Standring, Davis and Balder, Low power factor measurements at high voltages. Journ. Inst. Electr. Eng. **68**, 1132, 1930.
- Potthoff, Messung dielektrischer Verluste bei Drehstrom. ETZ. **52**, 474, 1931.
- Zickner u. Pfestorf, Über die Verwendung der Hochspannungsbrücke nach Schering zur Untersuchung von großen Kapazitäten. Z. f. techn. Phys. **12**, 210, 1931.
- Bauder u. Janssen, Die Messung der Kapazität handelsüblicher Elektrolytkondensatoren und Untersuchung ihrer Abhängigkeit und Veränderlichkeit. E. u. M. **50**, 581, 1932.
- Zickner, Tätigkeitsbericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Z. f. Instrkde. **52**, 170, 1932.
- Hill, Watts and Burr, Portable Schering bridge for field tests. Electr. Eng. **53**, 176, 1934.
- Bradshaw, Note on the sensitivity of the Schering bridge network. Journ. Roy. techn. Coll. Glasgow **4**, 144, 1937.
- Ford and Astbury, A note on the calibration of decade condensers. Journ. Scient. Instr. **15**, 122, 1938.
- Fischer, Telegr.- u. Fernspr.-Technik **137**, 1921.
- Küpfmüller u. Thomas, Wechselstrombrücke zum Messen der Scheinwiderstände von Fernsprechkabeln. ETZ. **43**, 461, 1922.
- Jordan, Unmittelbare Messung der Betriebskapazität und Ableitung von Fernsprechdoppelleitungen. ETZ. **43**, 10, 1922.
- Kühle, Eine einfache Kompensationsschaltung zur Messung der Betriebswerte von Kapazität und Ableitung an Fernsprechkabeln. ETZ. **43**, 1205, 1922.
- Wellmann, Unmittelbare Messung der betriebsmäßigen Kapazität und Ableitung bei Kabeln. ETZ. **44**, 457, 1923.
- U. Meyer, Über Ableitungsmessungen. ETZ. **44**, 781, 1923.
- Bormann u. Seiler, Dielektrische Verlustmessungen an Drehstromkabeln bei betriebsmäßiger Beanspruchung. ETZ. **49**, 239, 1928.
- Geyger, Eine einfache Kompensationsschaltung zur Messung der Kapazität und des dielektrischen Verlustfaktors von Kondensatoren und Kabeln. Arch. f. Elektrot. **21**, 529, 1929.

- Bosone, Kapazitätsbestimmung bei Bleikabeln mit mehreren Leitern (ital.). *Elektrot. Mailand* **16**, 705, 1929.
- Walcher, Eine neue Kabelmeßbrücke. *E. u. M.* **50**, 163, 1932.
- Carey Foster, Note on a method of determining coefficients of mutual induction. *Proc. Phys. Soc.* **8**, 137, 1887.
- Heydweiller, Über die Bestimmung von Induktionskoeffizienten mit dem Telefon. *Ann. d. Phys.* **53**, 499, 1894.
- Campbell, A capacitance bridge of wide range and a new inductometer. *Proc. Phys. Soc.* **39**, 145, 1927.
- Campbell, Two precision condenser bridges. *Ebenda* **43**, 564, 1931.
- Behr and Williams, The Campbell-Shackelton shielded ratio box. *Proc. Inst. Radio Eng.* **20**, 969, 1932.
- Smith, The measurement of the power factor and capacitance of a condenser by comparison with a mutual inductance. *Rev. Scient. Instr.* **4**, 280, 1933.
- Astbury and Ford, The precision measurement of capacitance. *Proc. Phys. Soc.* **51**, 37, 1939.
- Wilmotte, A quick and sensitive method of measuring condenser losses at radio frequencies. *Journ. scient. Instr.* **5**, 369, 1928.
- Sutton, A method for the determination of the equivalent resistance of air-condensers at high frequencies. *Proc. Phys. Soc.* **41**, 126, 1929.
- Boner, The measurement of capacitance and inductance in terms of frequency and resistance at radio frequencies. *Rev. Scient. Instr.* **1**, 243, 1930.
- Darmstädter, Über Verluste von Kondensatoren bei sehr schnellen elektrischen Schwingungen. *Arch. f. Elektrot.* **24**, 701, 1930.
- Beldig, Einrichtung für dielektrische Verlustmessungen an Isolierstoffen. *BBC. Mitt.* **17**, 147, 1930.
- Rhode u. Schlegelmilch, Verlustwinkelmessung an Kondensatoren mit Hochfrequenz. *ETZ.* **54**, 580, 1933.
- Schmidt, Eine neue Methode zur Messung von Kapazitäten bei hohen Frequenzen. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **41**, 96, 1933.
- Dye and Jones, A radio frequency bridge for impedance and power factor measurements. *Journ. Inst. Electr. Eng.* **72**, 169, 1933.
- Sommermann, Dielectric power factor measurements at audio- and radio-frequencies. *Rev. Scient. Instr.* **5**, 341, 1934.
- Müller u. Zinke, Grundsätzliches über die Messung von Verlustwinkeln und die Berechnung der Temperaturabhängigkeit des  $\tan \delta$  in der Hochfrequenztechnik. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **43**, 145, 1934.
- Rohde u. Schwarz, Verlustwinkelmessung bei  $10^8$  Hertz. *Hochfrequenztechn. u. Elektroak.* **43**, 156, 1934.
- Wirk, Absolute Verlustfaktorbestimmung bei der dielektrischen Werkstoffprüfung. *Z. f. techn. Phys.* **15**, 487, 1934.

- Rohde, Verlustwinkelmessungen bei 5 bis  $1 \cdot 10^8$  Hertz. Z. f. techn. Phys. **16**, 137, 1935.
- Hartshorn and Ward, The measurement of the permittivity and power factor of the dielectrics at frequencies from  $10^4$  to  $10^8$  cycles per sec. Journ. Inst. Electr Eng. **79**, 597, 1936.
- Rohde u. Schwarz, Dämpfungsmessungen bei Meterwellen. Hochfrequenztechn. u. Elektroak. **50**, 98, 1937.
- Mau, Neue Wechselstrombrücke zur Feinmessung dielektrischer Verluste. Arch. f. Elektrot. **31**, 43, 1937.
- Akahira, Kamazawa and Nakajuma, Errors in the measurement of dielectric losses at h. f. by the substitution method and their elimination. Scient. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. Tokyo **34**, 750, 1938.
- Agricola, Ein Gerät zur Bestimmung von kleinen Verlustwinkeln bei Hochfrequenz. Hochfrequenztechn. u. Elektroak. **51**, 77, 1938.
- Herzog, Über ein Verfahren zur Messung des Verlustwinkels von Kapazitäten bei Ton- und Hochfrequenz. Telegr. Techn. **27**, 99, 1938.
- Boella, Direct measurement of the loss conductance of condensers at high frequencies. Proc. Inst. Radio Eng. **26**, 421, 1938.
- Schwindt, Beiträge zur Messung des dielektrischen Verlustes und der Hochfrequenzleitfähigkeit: Entwicklung und Prüfung des Meß- und Auswertungsverfahrens. Z. f. phys. Chem. **39**, 275, 1938.
- Nishi, Okazaki and Iti, Measuring equipment of dielectric loss-angles at high frequencies. Elektrot. Journ. Tokyo **2**, 219, 1938.
- Malov, Über die Messung großer Verlustwinkel bei ultrahohen Frequenzen. Techn. Phys. USSR., **5**, 767, 1938.
- Bray, An Instrument for the measurement of dielectric loss in insulations. Journ. Scient. Instr. **10**, 183, 1933.
- Pungs u. Rieche, Ein neues Hochfrequenzkalorimeter zur Untersuchung dielektrischer Verluste von Flüssigkeiten. Z. f. techn. Phys. **14**, 483, 1933.
- Divikowsky et Filipoff, Mesure des pertes dielectriques a haute frequence dans les liquides. Phys. Z. d. Sowjetunion **8**, 311, 1935.
- Gönningen, Thermostatische Verlustmessung, insbesondere an Starkstromkondensatoren. ETZ. **57**, 523, 1936.
- Race and Leonhard, Calorimetric measurement of dielectric losses in solids. Electr. Eng. **55**, 1347, 1936.
- Schmelzer, Absolutmessung dielektrischer Verluste bei hohen Frequenzen mit dem Kondensatorthermometer. Ann. d. Phys. **28**, 35, 1937.
- Zouckermann et Freymann, Mesure de l'absorption en haute frequence par une methode thermique. Journ. de phys. et le Radium **8**, 103, 1937.
- Malov, Die Theorie der Methode von Drude-Coolidge für den Fall der Messung großer Verlustwinkel. Phys. Z. d. Sowjetunion **12**, 111, 1937.

- Kebbel, Absorptions- und Reflexionsmessungen im Bereich der Zentimeterwellen. Hochfrequenztechn. u. Elektroak. **3**, 81, 1939.
- Opitz, Dämpfungsmessungen nach dem Quotientenverfahren. Hochfr. u. Elektroak. **53**, 27, 1939.
- Grüneisen u. Giebe, Anwendung des Dreiplattenkondensators zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten fester Körper. Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **14**, 921, 1912.
- Pfestorf, Über Elektroden für die Zwecke der Prüfung fester Isolierstoffe. ETZ. **51**, 275, 1930.
- Schlesinger, Hochfrequenzmeßeinrichtung zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten. ETZ. **52**, 533, 1931.
- Schupp, Messung der Dielektrizitätskonstanten von Salzen. Z. f. Phys. **75**, 84, 1932.
- Jones, Mercury electrodes for measurements on solid dielectrics at radio frequencies. Journ. Instr. Electr. Eng. **74**, 179, 1934.
- Kleinke, Über die Messung von Dielektrizitätskonstanten fester Körper mit Hilfe der Mischmethode. Phys. Z. **36**, 565, 1935.
- Romanov, Zur Theorie der Messung der Dielektrizitätskonstante und des Absorptionskoeffizienten im Gebiete kurzer Wellen. Phys. Z. d. Sowjetunion **2**, 404, 1937.
- Doborzynski, Messungen der Dielektrizitätskonstanten fester Körper mit Hilfe der Methode ponderomotorischer Kräfte. Bull. Acad. Pol. **320**, 335, 1937.
- King, An absolute method for measuring the dielectric constant of fluids and solids at ultra high frequencies. Rev. Scient. Instr. **8**, 201, 1937.
- Hackel, Messung verschiedener Glassorten. Phys. Z. **37**, 160, 1936. Die Dielektrizitätskonstante und Dipolverluste von Gläsern bei Hochfrequenz. Ann. d. Phys. **29**, 63, 1937.
- Nernst, Bestimmung von Leitfähigkeiten und Dielektrizitätskonstanten. Z. f. phys. Chem. **14**, 622, 1894.
- Smale, Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten einiger Salzlösungen nach der elektrometrischen Methode. Wied. Ann. **57**, 625, 1897.
- Nernst, Über die Verwendung schneller elektrischer Schwingungen in der Brückenkombination. Wied. Ann. **60**, 600, 1897.
- Drude, Zur Messung der Dielektrizitätskonstante vermittelst elektrischer Drahtwellen. Ann. d. Phys. **8**, 336, 1902.
- Drude, Rationelle Konstruktion von Tesla-Transformatoren. Ann. d. Phys. **16**, 116, 1905.
- Rubens, Über Reflexionsvermögen und Dielektrizitätskonstante isolierender fester Körper und einiger Flüssigkeiten. Berl. Ber. **4**, 1915.
- R. Jäger, Die Dielektrizitätskonstante fester Körper bei verschiedenen Wellenlängen. Ann. d. Phys. **53**, 409, 1917.

- Joachim, Über die Messung der Dielektrizitätskonstante in der Wheatstoneschen Brücke bei Anwendung hoher Frequenzen. *Ann. d. Phys.* **60**, 570, 1919.
- Fürth, Dielektrizitätskonstante guter Leiter. *Phys. Z.* **25**, 676, 1924.
- Carman, An electrometer method for measuring dielectric constants of liquids. *Phys. Rev.* **24**, 396, 1924.
- Scheremekinskaja, Messung von Dielektrizitätskonstanten mittels kurzer ungedämpfter Wellen. *Journ. Russ. Phys.-Chem. Ges.* **59**, 499, 1927.
- Malsch, Über die Messung der Dielektrizitätskonstanten von Flüssigkeiten bei hohen elektrischen Feldstärken. *Phys. Z.* **29**, 770, 1928. *Ann. d. Phys.* **84**, 841, 1927.
- Malsch, Widerstand- und Kapazitätsmessungen durch Kondensator-entladungen, mit einer Anwendung auf die Messung von Dielektrizitätskonstante und Leitfähigkeit sehr verdünnter Lösungen. *Ann. d. Phys.* **3**, 803, 1929.
- Astin, A new method for measuring the dielectric constants of conducting liquids. *Phys. Rev.* **34**, 300, 1929.
- Kniepkamp, Über die Verwendbarkeit der Resonanzmethode zur Messung von Dielektrizitätskonstanten leitender Flüssigkeiten. *Z. f. Phys.* **51**, 95, 1928.
- Dabord, Recherches d'électrostatiques. *Ann. de Phys.* **13**, 471, 1930.
- Graffunder u. Weber, Eine Schwebungsmethode zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstante leitender Flüssigkeiten. *Ann. d. Phys.* **9**, 887, 904, 1931. *Z. f. Phys.* **65**, 723, 1930.
- M. Wien, Über Hochfrequenzmessungen nach der Barretter-Methode. *Phys. Z.* **31**, 793, 1930.
- Schiele u. M. Wien, Über die Messung elektrolytischer Widerstände nach der Barretter-Methode. *Ann. d. Phys.* **7**, 624, 1930.
- Neese, Über eine Anwendung der Barretter-Methode auf elektrolytische Messungen. *Ann. d. Phys.* **8**, 929, 1931.
- Hadamard, Mise au point d'un pont de Nernst à grand précision. *C. R.* **194**, 1799, 1932.
- Devoto, Anwendung der Dielektrizitätskonstantenmessungen in wässrigen Lösungen auf dem Gebiet der organischen Chemie. *Z. f. Elektrochem.* **40**, 490, 1934.
- M. Wien, Messung sehr großer Flüssigkeitswiderstände. *Phys. Z.* **35**, 652, 1934.
- Romanow, Zur Theorie der Messung von Dielektrizitätskonstanten und Absorptionskoeffizienten im Gebiet kurzer elektrischer Wellen. *Phys. Z. d. Sowjetunion* **9**, 362, 1934.
- Büll u. Zwecker, Die neueste Bestimmungsmethode der Dielektrizitätskonstante und ihre Bedeutung für den Chemiker in Betrieb und Laboratorium. *Chem.-Ztg.* **58**, 801, 1934.

- Beauvillain, Mesure de constantes diélectriques des électrolytes. Journ. de phys. et le Radium **6**, 135, 1935.
- Kipp u. Zonen, Apparatus for the measurement of dielectric constants. Journ. scient. Instr. **12**, 236, 1935.
- Fischer, Messungen der Dielektrizitätskonstante wässriger Lösungen starker Elektrolyte mittels einer Hochfrequenzbrücke. Phys. Z. **36**, 585, 1935.
- Schreck, Messung von geringen Leitfähigkeiten und von Dipolverlusten bei langen Wellen. Ann. d. Phys. **27**, 261, 1936.
- Schmelzer, Messungen von Verlusten an verschiedenen Flüssigkeiten nach der Thermometermethode. Phys. Z. **37**, 162, 1936.
- Büll, Grundlagen und Anwendungen der Dielektrizitätskonstantenmessungen. Z. d. ges. Kälteind. **43**, 110, 1936.
- Kalinin, Zur Methodik der Bestimmung von Dielektrizitätskonstanten bei sehr hohen Frequenzen. Phys. Z. d. Sowjetunion **10**, 257, 1936.
- Kalinin, An experimental investigation of the second method of Drude. Journ. exp. theor. Phys. **8**, 478, 1938.
- Herweg, Die elektrischen Dipole in flüssigen Dielektriciis. Z. f. Phys. **3**, 36, 1920.
- Andrews, A new method of dielectric constant measurement at radio frequencies. Physics **1**, 366, 1931.
- Mönch, Bemerkung zur Methode, Dielektrizitätskonstanten im Schwingkreis zu bestimmen. Z. f. phys. Chem. **16**, 438, 1932.
- Ebert, Angew. Chem. **47**, 305, 1934.



## Namenverzeichnis

Adelsberger 47.

Campbell 75, 76, 77.

Carey Foster 74.

Curtis 45, 48.

Debye 18.

Drude 92.

Gerdien 30.

Giebe 46, 48, 56, 71, 78, 81.

Gott 49.

Grüneisen 78.

Hackel 95.

Hartshorn 65.

Jäger 46.

Kennelly 16.

Kirchhoff 15, 16.

Kohlrausch 31.

Kühle 73.

Küpfmüller 71.

Kurlbaum 46.

Lindemann 87.

Maxwell 18, 43.

Meyer, U. 74.

Moon 45, 48.

Nernst 91.

Ohm 15.

Petersen 39.

Pungs 89.

Rieche 89.

Rohde 87, 88.

Sauty, de 49.

Scheibe 47.

Schering 56, 70.

Schott, Gen. 40.

Schreck 94.

Thomas 71.

Thomson 33, 43, 44, 49.

Wagner, K. W. 18, 54, 57.

Wellmann 74.

Wheatstone 43.

Wien, M. 56, 93.

Wulf 30.

Zickner 56, 71, 81.

## Sachverzeichnis

- Abgleichung, Brücke 50.  
—, Kondensator 26.  
Ableitung 19, 20, 21, 22, 36, 37, 38.  
Abschirmung 2, 24, 52, 53, 58, 59,  
81, 85.  
—, Kapazitätsnormale 23ff.  
Absolutes Farad 22.  
Absorptionskoeffizient 89.  
Abstimmanzeigeröhre 51, 81.  
Abstimmung 51, 81.  
Alterung 24, 27.  
Amperesekunde 21.  
Anfangskapazität 30, 31, 32, 33.  
Anpassung 52.  
Anzeigeeinstrumente 51.  
Astatiche Spulen 52, 81.
- Ballistisches Galvanometer 42, 48,  
49.  
Barretter 84, 93, 94.  
Belastung 39, 40.  
Bernstein 39, 40.  
Bespritzung 90.  
Betriebskapazität 3, 26, 33, 36, 63,  
71, 72, 73, 85.  
— von Kabeln 71, 72, 73.  
Blindwiderstand 15, 18, 50.  
Bolometer 93.  
Braunsche Röhre 51.  
Brechungsindex 89.  
Brückenabgleichung 50, 55, 56, 57.  
Brückenbedingungen 50, 52, 57.  
Brückenkreuz 80.  
Brückenschaltungen 50, 56ff.
- Campbell-Brücken 75, 76, 77.  
Carey-Foster-Brücke 74, 75.
- CGS-System 21.  
Coulomb 21.
- Dämpfung 80, 85, 86, 88.  
Dämpfungsverhältnis 42.  
Dekrement, logarithmisches 42, 85.  
Detektor 51, 81, 83, 84.  
Dielektrikum 3, 17, 18, 19, 20, 40,  
89.  
Dielektrizitätskonstante 3, 4, 5, 6,  
19, 82, 89ff.  
Differentialkondensator 31.  
Doppelleitung 10, 11.  
Dreiplattenkondensator 9, 82, 87,  
90.  
Drehkondensator 28ff.  
— ohne Anfangskapazität 32, 65.  
Drehstromkabel 13.  
Durchschlagfestigkeit 40.
- Eichkurve 30, 31.  
Eigenkapazität 41.  
Einheit der Ableitung 22.  
— der Kapazität 1, 21, 22.  
Eindrahtleitung 11.  
Elektrolytkondensator 23, 40, 71.  
Empfindlichkeit, Brücke 51, 52.
- Farad 21, 22.  
Festkondensatoren 23, 25ff.  
Feuchtigkeit 27, 28.  
Frequenzteilung 47.  
Frequenzabhängigkeit, Kapazität  
19, 20, 39.  
—, Verluste 19, 20, 39.
- Galvanometer 42, 44, 45, 48, 51.  
Gebrauchsnormale 23, 24ff.

- Gegeninduktivität 56, 74, 75, 76, 77.  
 Geißlersche Röhren 93.  
 Geometrische Kapazität 20.  
 Giebe-Zickner-Brücke 56ff., 71, 81.  
 Glimmerkondensatoren 23, 25, 33ff.
- H**andkapazität 30, 66, 80.  
 Henry 22.  
 Hilfszweig, Wagner'scher 54, 55, 57.  
 Hochspannungsbrücke 70, 71.  
 Hochspannungskondensatoren 23, 39.
- I**mpedanz 15, 52.  
 Indikatorinstrumente 50, 51, 53, 55.  
 Inhomogenität 19.  
 Internationales Farad 22.  
 Isolationswiderstand 24, 27, 45.  
 Isoliermaterial 23, 24.
- K**abel 71, 72, 73.  
 Kalorimeter 89.  
 Kapazität 1, 14, 55.  
 Kapazitäten, große 66, 67.  
 —, kleine 64.  
 Kapazitätsnormale 23, 24ff.  
 Kapazität, wirksame 83.  
 Keramische Isolierstoffe 40.  
 Kirchhoffsche Gesetze 15, 16.  
 Kohlrausch-Kondensator 31.  
 Kondensator 2.  
 Kondensatoren, ohne Anfangskapazität 32, 33, 65.  
 —, technische 23, 40.  
 —, veränderliche 23, 28ff.  
 Kondensatorflasche 93.  
 Kondensatorsatz 26, 28, 33.  
 —, Eichung 68, 69.  
 Konstanz 27, 30.  
 Korrektionskurve 31.  
 Kreisfrequenz 14.  
 Kugelfunkenstrecke 7.  
 Kugelkondensator 3, 5, 6, 23, 24.  
 Kühle-Schaltung 73.  
 Kurbelkondensator 33, 37, 38.  
 Kurbelwiderstand 45.
- Ladedauer 42.  
 Ladestrom 18.  
 Lechersches Drahtsystem 92, 93.  
 Leistungsmessung 41.  
 Leitfähigkeit 18, 19, 20, 58, 79, 91.  
 Leuchtresonator 82.  
 Lichtgeschwindigkeit 22.  
 Luftkondensatoren 23, 25ff., 68.
- M**agisches Auge 51, 81.  
 Maxwell-Thomson-Brücke 23, 43ff., 68.  
 Meßempfindlichkeit 51, 52.  
 Meßgenauigkeit, Barretter-Methode 96.  
 —, Campbell-Brücke 76.  
 —, Giebe-Zickner-Brücke 57, 67, 69.  
 —, Kabelmessungen 71, 72, 73.  
 —, Maxwell-Thomson-Brücke 48.  
 —, Resonanzbrücke 78, 79, 80.  
 —, Resonanzkreis 88.  
 Messung kleiner Kapazitäten 64, 65, 66.  
 — großer Kapazitäten 66, 67, 70, 71.  
 Meßverfahren, mittelbare 40, 48ff.  
 —, unmittelbare 40, 41ff.  
 Mikrofarad 22.  
 Mikromikrofarad 22.  
 Mikrosiemens 22.  
 Minosflaschen 40.  
 Mischungsverfahren 90, 95.  
 Mitnahme 96.  
 Mittelbare Meßverfahren 40, 48ff.
- N**achladestrom 18.  
 Nanofarad 22.  
 Normalfrequenz 47.  
 Normalkondensatoren 23ff., 34.  
 Normaldrehkondensatoren 28ff.  
 Nullausschlag 82, 83.  
 Nullinstrumente 51.
- O**hm 18, 22.  
 Ohmsches Gesetz 15.  
 Ohmsche Widerstände 14, 18, 50, 52, 55, 56.  
 Operator 15.  
 Oxydgleichrichter 51.

- Papierkondensatoren 23, 40.  
 Parallelschaltung 16, 20, 26, 58.  
 Parallelwiderstand 19, 20, 56, 58, 79.  
 Parallelwiderstandsmethode 56.  
 Pendelunterbrecher 48.  
 Phasenabgleichung 56.  
 Phasenwinkel 15, 18, 50.  
 Physikalisch-Technische Reichsan-  
 stalt 25, 28, 32, 47, 56, 69, 91.  
 Pikrofarad 22.  
 Plattenkondensator 2, 3, 8, 9, 28.  
 Preßgaskondensator 40.  
  
 Quarzglas 24, 27, 28, 29, 31, 32.  
 Quarzsteuerung 47, 82, 96.  
 Quasistationär 83.  
  
 Bandstreuungen 3, 10, 87, 88, 90.  
 Reduktionsfaktor 42.  
 Reibungselektrizität 47.  
 Reihenschaltung 16, 20, 21, 65.  
 Reihenwiderstandsmethode 56.  
 Relative Meßverfahren 40, 48ff.  
 Resonanzbrücke 78, 79, 80.  
 Resonanzkurve 84, 85, 86.  
 —, Symmetrie 81, 84.  
 Röhrensender 51, 92.  
 Röhrenvoltmeter 84.  
 Rotierender Unterbrecher 46, 47.  
 Rückstandsbildung 18, 42, 49.  
 Rückwirkung 81.  
  
 Schaltungskapazität 34, 35, 36, 37,  
 38, 75.  
 Scheinwiderstand 10, 15.  
 Schraubkondensator 31, 87.  
 Schutzring 23.  
 Schutzringplattenkondensator 9, 10,  
 23, 67, 68, 82, 90.  
 Schutzringzylinderkondensator 10,  
 23, 24, 39, 91.  
 Schutzzyylinder 23.  
 Schwebungsmethode 96.  
 Schwingungsdauer (Galv.) 42, 44, 45.  
 Schwingungskreis 83.  
  
 Selbstinduktion 10, 14, 20, 28, 52,  
 55, 56, 75, 76, 78, 81, 82, 83, 85,  
 87.  
 — einer Doppelleitung 10.  
 Siemens 22.  
 Skineffekt 80, 87, 88.  
 Spulenkapazität 78, 84.  
 Stabilisierung 82.  
 Steigungsverhältnis 30, 36.  
 Stern-Dreieck-Transformation 16,  
 17, 63.  
 Stimmgabelunterbrecher 48.  
 Stöpselkondensator 33ff.  
 Streufelder 52, 53.  
 Streukapazität 23, 34, 43, 53, 58,  
 59, 62, 69, 79, 80, 84.  
 Stromschlüssel 49.  
 Stromspannungsmessung 41.  
 Substitution 55, 57, 59, 85, 86,  
 94, 96.  
 Symmetrie 32, 59, 73, 81, 88.  
 Synchronmotor 47.  
  
 Teilkapazität 1, 2, 23, 26, 32, 35,  
 36, 37, 38, 48, 54, 58, 59, 60, 61,  
 62, 63, 64, 71, 82, 84, 85.  
 Telephon 51.  
 Teller 26, 30, 33, 60.  
 Temperaturkoeffizient 24, 28, 39, 45.  
 Thermokreuze 51, 84, 93.  
 Thermowattmeter 41.  
 Thomsonscher Schwingungskreis  
 33, 83.  
 Toroidspulen 52.  
 Tourenregler 47.  
 Transformatoren 51, 52.  
 Trockengefäße 28.  
  
 Übergangswiderstände 39.  
 Überlagerung 81, 92.  
 Überschlagspannung 30, 39.  
 Übertrager 51, 52.  
 Unmittelbare Meßverfahren 41ff.  
 Unterbrecher 43, 46, 47, 48.  
 Unterbrechermethode 43.  
 Untersatz 26, 30, 33.  
 Untersetzung 47.

- Variometer 80, 81.  
Verbindungskapazität 24.  
Verluste, Verlustfaktor, Verlustwinkel 4, 5, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 28, 33, 36, 37, 39, 40, 41, 57, 58, 59ff., 64, 65, 75, 76, 82, 85ff.  
Verlustwiderstand 87, 95.  
Verstärker 51, 57.  
Vibrationsgalvanometer 51.  
Volt 21.  
Voltmeter, elektrostatisches 41.  
Vorwiderstand 19, 20.
- Wagnerscher Hilfszweig** 54, 55, 57.  
Wattmeter 89.  
Wechselstrombrücke 33, 50ff.
- Wechselstromkreis 14.  
Wechselstromquellen 51.  
Wellenlänge 92.  
Wheatstonesche Brücke 43, 50.  
Widerstand, Doppelleitung 10.  
Widerstandsbüchsen 45.  
Widerstandsoperator 15, 16, 17, 50.  
Wirbelstromverluste 85, 87.  
Wirkleistung 19.  
Wirksame Kapazität 83.  
Wirkwiderstand 15, 18, 50.
- Zeitkonstante 19, 78.  
Zweiplattenkondensator 2, 8, 90.  
Zylinderkondensator 3, 6, 7, 8, 30.

# Verfahrens- und Meßkunde der Naturwissenschaft

## In Vorbereitung befindliche Hefte:

- Antweiler, Dr. H. J., Elektrometrische Methoden in der Chemie
- Bauder, Prof. Reinhold, Messung von Drehmoment, Leistung und Drehzahl
- Blechschildt, Dr. Erich, Induktivität und Wirkwiderstände
- Cordes, Dr. Heinrich, Die chemische Theorie der Explosionen
- Dahlke, Dr. Walter, Experimentelle Methoden in der Ultrarotspektroskopie
- Dunken, Dr. Heinz, Destillieren, Kristallisieren, Sublimieren
- Dunken, Dr. Heinz, Kalorimetrie
- Gielessen, Dr. J., Vakuummessung
- Harms, Dr. Helmut, Dichtemessung
- Harms, Dr. Helmut, Dipolmomente und Polarisierbarkeit
- Kast, Prof. Dr. W., Die Streuung der Röntgen- und Elektronenstrahlen an Dämpfen
- Matossi, Dr. Frank, Ramaneffekt
- Moser, Dr. Helmut, und Tingwaldt, Dr., Thermolemente
- Potthoff, Dr.-Ing. Karl, Meßtechnik der hohen Wechselspannungen
- Rexer, Dr. Ernst, Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Gläsern
- Rexer, Dr. Ernst, Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Gläsern
- Roth, Prof. Dr. Walter, Thermochemische Meßmethoden
- Scholz, Dipl.-Chem. Günther, Verfahren zur Herstellung von Nebeln und Rauchen
- Seybold, Prof. Dr. August, Chromatographische Analyse
- Stach, Dr. Erich, Kohlenpetrographische Untersuchungsverfahren
- Tomaschek, Prof. Dr., und Deutschbein, Dr., Gitter- und Prismenspektrographen
- Voigt, Dr. Ehrhard, Methoden der Konservierung und Untersuchung von Braunkohlenfossilien
- Volkman, Dr. H., Drehung der Ebene des polar. Lichtes
- Volkman, Dr. H., Künstliche Doppelbrechung
- Wolf, Prof. Dr. K. L., und Dunken, Dr. H., Oberflächenaktivität und Oberflächenfilme
-