

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 62 (1971)

**Heft:** 15

**Artikel:** Kapazität und Verlustwinkel von Kondensatoren bei tiefen Temperaturen

**Autor:** Goldschmidt, R. / Ohayon, D.H.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915841>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 13.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## Kapazität und Verlustwinkel von Kondensatoren bei tiefen Temperaturen

Von R. Goldschmidt und D. H. Ohayon, Lausanne

621.319.4:621.317.374:536.48  
(Übersetzung)

### 1. Einleitung

In vorliegender Arbeit wird untersucht, wie sich Kondensatoren üblicher Fabrikation bei sehr tiefen Temperaturen bezüglich Kapazität und Verlustwinkel verhalten. Der untersuchte Temperaturbereich ging von etwa 290 bis 90 °K und wurde für einige Untersuchungen nach unten bis fast 1 °K, nach oben bis 350 °K ( $\approx$  80 °C) erweitert.

### 2. Die benutzten Einrichtungen

Für die Messungen bis etwa —180 °C ( $\approx$  90 °K) wurde ein Dewargefäß benutzt, das selbst noch durch eine Verpak-

kung aus Zellulärplastik thermisch isoliert war. Die Abkühlung der Kondensatoren erfolgte schrittweise, und zwar erst durch gefrorene Kohlensäure und dann durch flüssigen Stickstoff. Diese Einrichtung war im Laboratorium für Materialuntersuchungen des elektrotechnischen Instituts der EPFL aufgebaut.

Für die Messungen in der Nähe des absoluten Nullpunktes standen die Einrichtungen des Kältelaboratoriums der Abteilung für experimentale Physik der Universität Lausanne zur Verfügung. Die Versuche wurden dort in einem Dewardoppelgefäß ausgeführt, dessen äusserer Raum mit flüssiger Luft, der innere mit flüssigem Helium gefüllt war.

Tabelle I

Nr.	Typ	C Nennwert nF	U Nennwert V	Abmessungen mm			Gewicht g
				L	D	E	
1	Papier	100	250	50,3	21,3		26,3
2	Papier	360	500	80,3	93,1	53,4	693
3	Metallisiertes Papier	500	180	32	14		9,25
4	Polystyren	30	350	40	15,5		10,5
5	Polystyren	10	125	20,4	8,1		1,33
6	Polystyren	6,04	300	16	6		1,25
7	Polystyren	6,34	300	16	6		1,25
8	Plastikfolie, metallisiert	1 000	160	35,4	12,3		6,2
9	Polyesterfolie, metallisiert	220	400	27	13	7	4,05
10	Polycarbonatfolie metallisiert	18	63	10	5		0,7
11	Polycarbonatfolie metallisiert	5,6	63	10	5		0,7
12	Polycarbonatfolie metallisiert	330	63	15	9		1,4
13	Glimmer	0,400	300	15	10	3	1,1
14	Glimmer	0,886	300	15	10	3	1,0
15	Glimmer	0,338	300	15	10	3	1,0
16	Tantal	1 000	6	3,8	1,8		0,08
17	Tantal	2 200	10	5,5	2,2		0,1
18	Tantal	22 000	35	17,2	7,3		4,04
19	Tantal	220 000	6	19,4	9,1		6,65
20	Tantal	1 000	6	6,4	3,2		0,5
21	Tantal	1 000	25	6,4	3,2		0,5

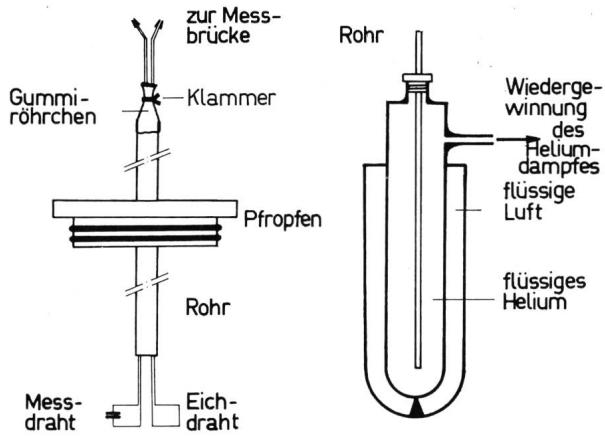


Fig. 1  
Messeinrichtung für sehr tiefe Temperaturen

Ein eloxiertes Aluminiumrohr (Durchmesser  $\approx 1 \text{ cm}$ ) führte in den heliumgefüllten Raum. Auf dem Rohr glitt ein Kupferpfropfen, der mit Dichtungsringen versehen war, und gestattete, den Heliumraum des Dewargefäßes dicht abzuschliessen. Die sich bildenden Heliumdämpfe wurden abgepumpt und das Helium so zurückgewonnen. Im Rohr lagen die Leitungsdrähte, die die Verbindung mit den Kondensatoren herstellten. Mit einer Gruppe von 4 Drähten konnten im gleichen Versuch 3 Kondensatoren gemessen werden; je ein Draht führte zu je einem Pol der Kondensatoren, die anderen Pole wurden gemeinsam an den vierten Draht angeschlossen. Mit 3 Versuchen pro Tag konnten so 9 Kondensatoren bei

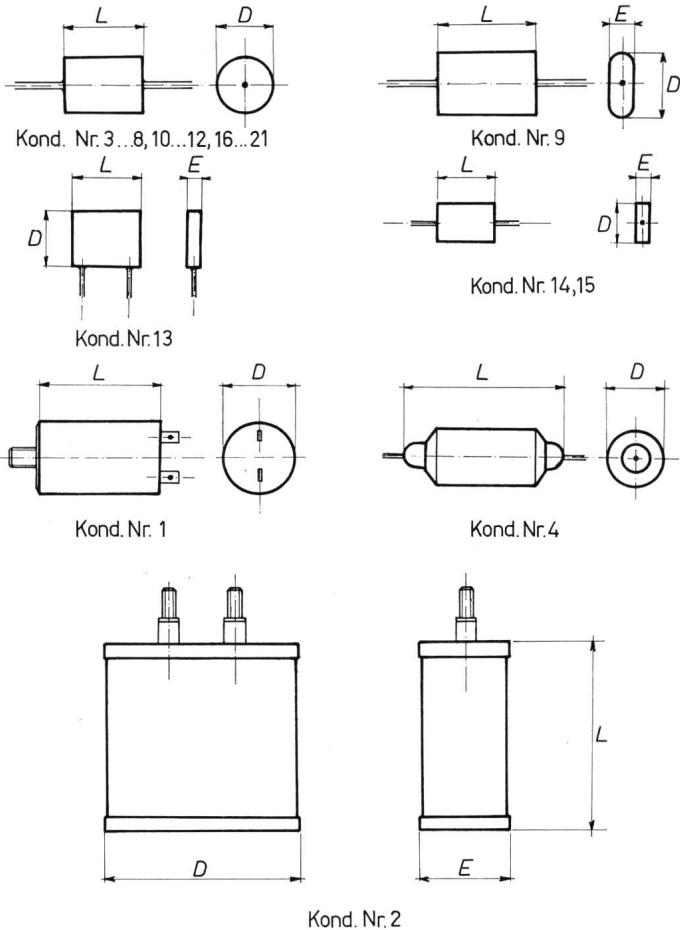


Fig. 2  
Kondensatortypen

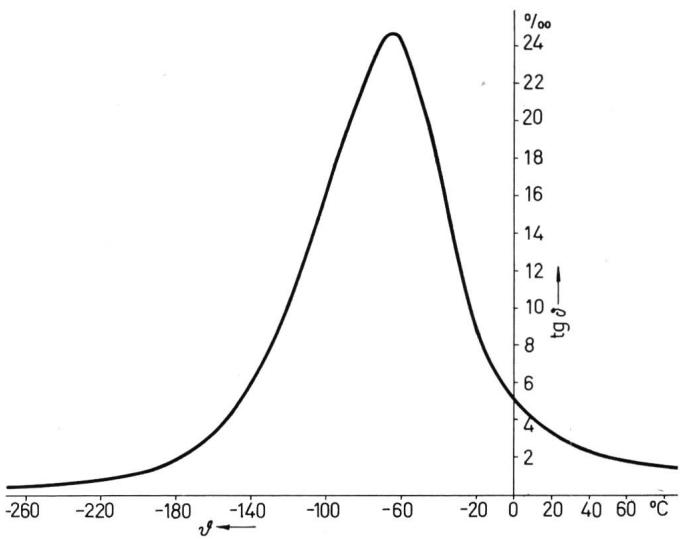
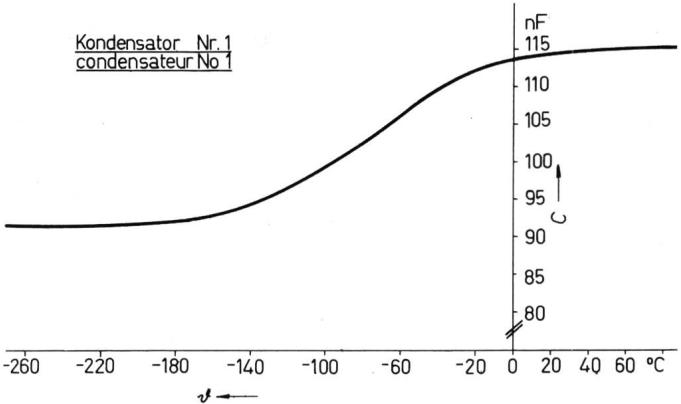


Fig. 3  
Kapazität  $C$  und Verlustfaktor  $\tan \delta$  bei 1600 Hz, 2 V in Abhängigkeit von Temperatur, Papierkondensator  $C_n = 100 \text{ nF}$

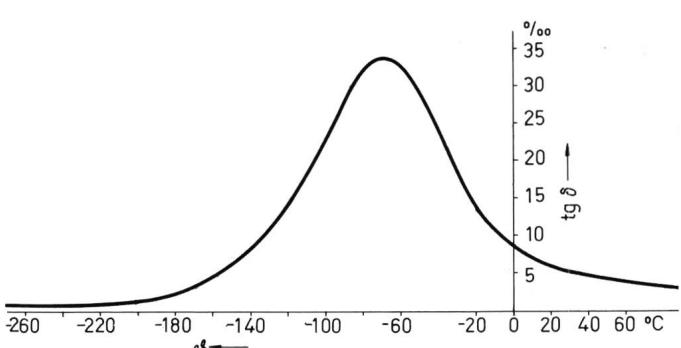
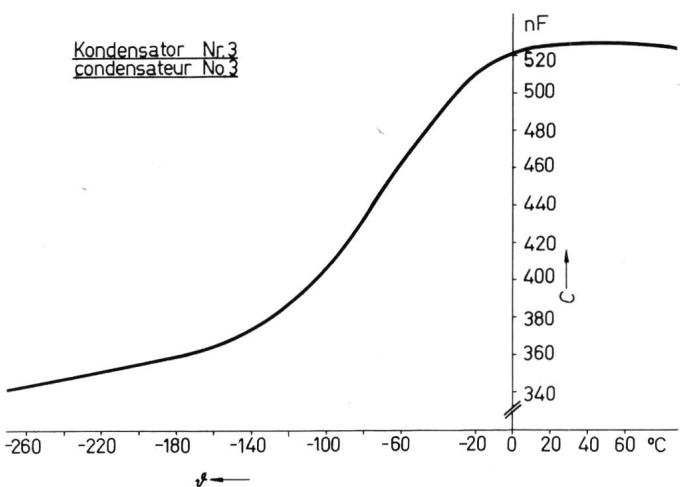


Fig. 4  
Gleich wie Fig. 3, aber mit Metallpapierkondensator  $C_n = 500 \text{ nF}$

Tabelle II

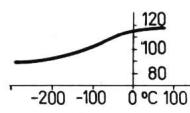
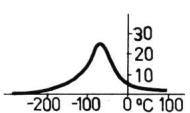
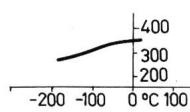
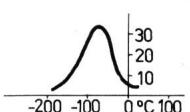
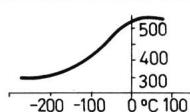
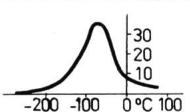
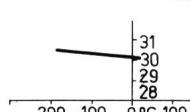
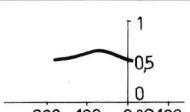
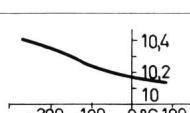
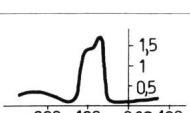
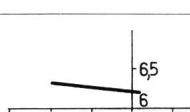
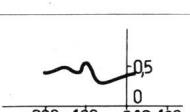
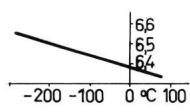
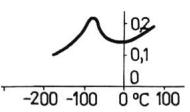
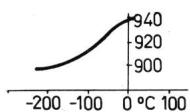
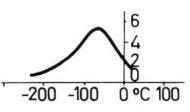
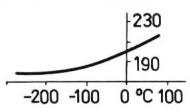
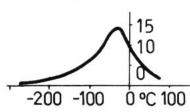
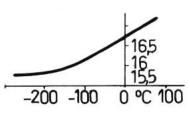
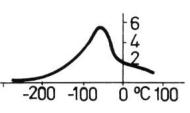
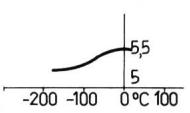
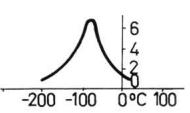
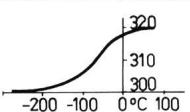
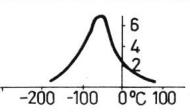
Nr.	$C_{20}$ nF	$C_{-180}$ nF	$\frac{\Delta C}{C_{20}}$ %	$C$ nF	$\operatorname{tg} \delta_{20}$ %	$\operatorname{tg} \delta_{-180}$ %	$\frac{\Delta \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta_{20}}$ %	$\operatorname{tg} \delta$ %
1	113,60	92,04	— 189,7		3,31	1,65	— 500	
2	357	273	— 230		4,78	3,17	— 337	
3	525,29	360,84	— 314		6,36	2,32	— 630	
4	30,15	30,69	+ 18		0,516	0,513	— 1,7	
5	10,12	10,32	+ 19,4		0,110	0,240	+ 1180	
6	6,17	6,32	+ 24,3		0,40	0,42	+ 50	

Tabelle III

Nr.	$C_{20}$ nF	$C_{-180}$ nF	$\frac{\Delta C}{C_{20}}$ %	$C$ nF	$\operatorname{tg} \delta_{20}$ %	$\operatorname{tg} \delta_{-180}$ %	$\frac{\Delta \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta_{20}}$ %	$\operatorname{tg} \delta$ %
7	6,37	6,505	+ 20,5		0,1336	0,0944	— 300	
8	938,9	898,3	— 43,3		1,22	1,26	+ 31,6	
9	204,75	179,91	— 122		5,76	0,65	— 886	
10	16,776	15,891	— 53		1,68	0,48	— 714	
11	5,45	5,25	— 36,7		1,19	1,70	+ 428	
12	318,5	300,8	— 55,6		1,37	0,54	— 607	

etwa 77 und 4  $^{\circ}\text{K}$  gemessen werden. Als Verbindungsdrähte wurden dünne, lackisierte Drähte (etwa 0,2 mm  $\varnothing$ ) gewählt. Der geringe Drahtdurchmesser gestattete, das Aluminiumrohr durch einen zusammengequetschten kurzen Gummischlauch genügend dicht abzuschliessen. Die 4 Drähte waren von Hand mit einem Schritt von ungefähr 6 mm zu einem Vierer verseilt. Ausser diesem Messvierer befand sich im Rohr noch ein Drahtpaar aus gleichen Drähten. Dieses wurde als Testpaar zur Bestimmung des Widerstandes der Schleife und der Kapazität zwischen den Drähten benutzt (Fig. 1). So wurde gemessen:

$$\begin{array}{lll} \text{bei } +20^{\circ}\text{C} & R_{\text{Cu}} = 1,30 \Omega & C = 0,3 \text{ nF} \\ \text{bei } -180^{\circ}\text{C} & R_{\text{Cu}} = 0,94 \Omega & C = 0,3 \text{ nF} \\ \text{bei } -270^{\circ}\text{C} & R_{\text{Cu}} = 0,94 \Omega & C = 0,3 \text{ nF} \end{array}$$

Diese Beträge wurden von den an den Kondensatoren bestimmten Werten in Abzug gebracht. Die Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunkts wurden durch barometrische Messungen bestimmt.

Die Versuche bei Temperaturen zwischen 20 und 80  $^{\circ}\text{C}$  wurden in einem Wärmeschrank mit Luftumwälzung und automatischer Temperaturregelung durchgeführt.

### 3. Die Messungen

Alle Messungen in Abhängigkeit von der Temperatur wurden mit der Frequenz 1600 Hz und der Spannung 2 V durchgeführt. Jedoch wurden in einem Vorversuch die Kon-

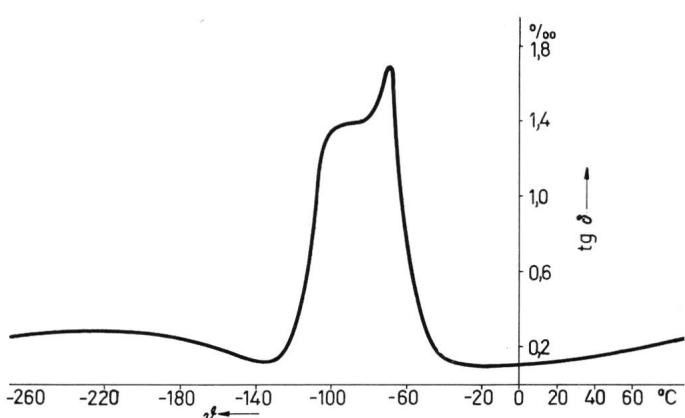
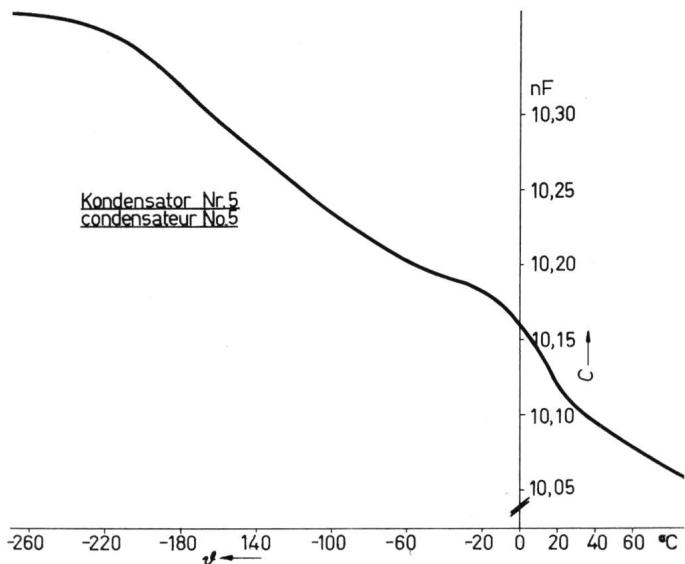


Fig. 5  
Gleich wie Fig. 3, aber mit Polystyrenkondensator  $C_n = 30 \text{ nF}$

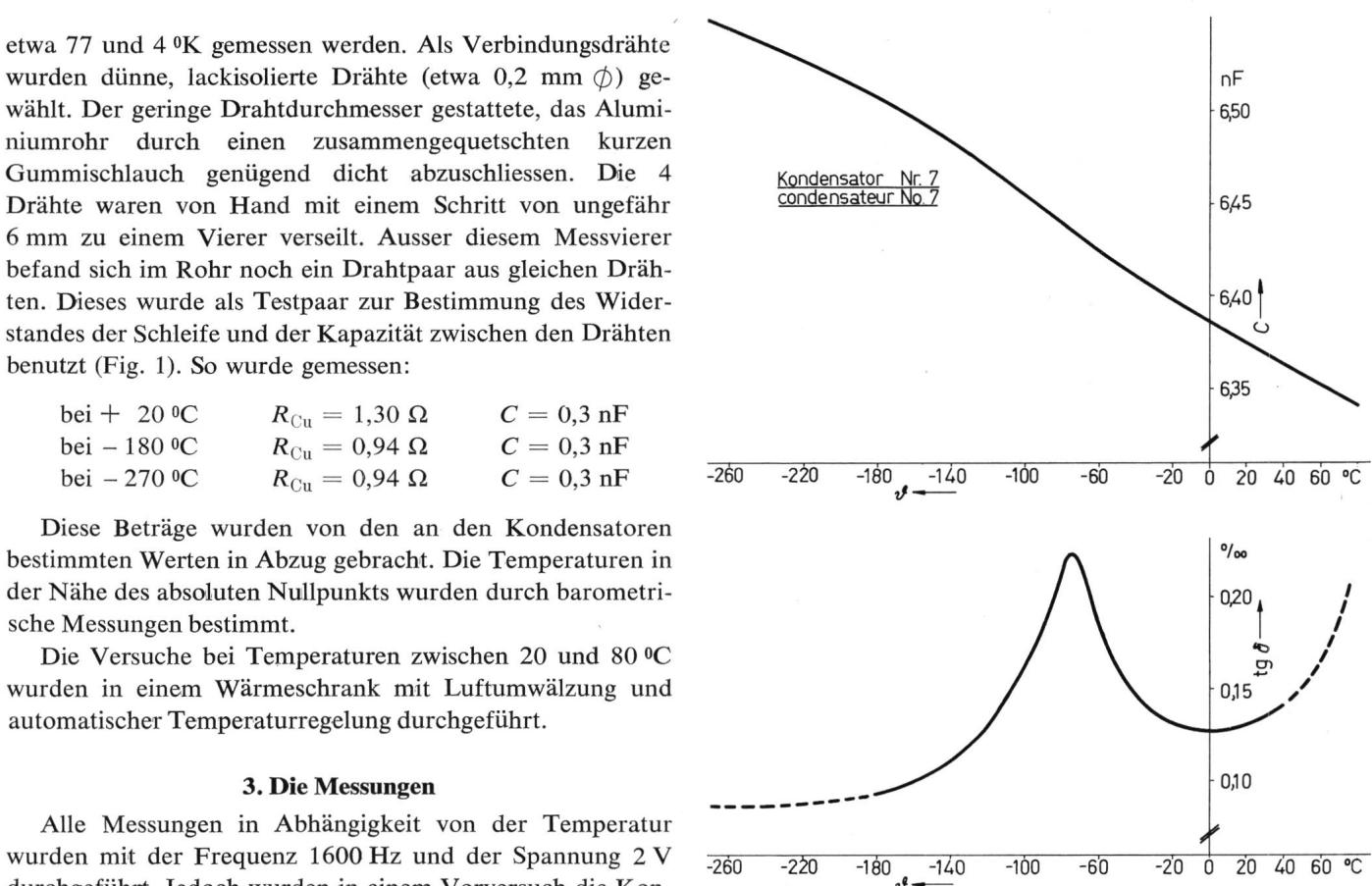


Fig. 6  
Gleich wie Fig. 3, aber mit Polystyrenkondensator  $C_n = 6,34 \text{ nF}$

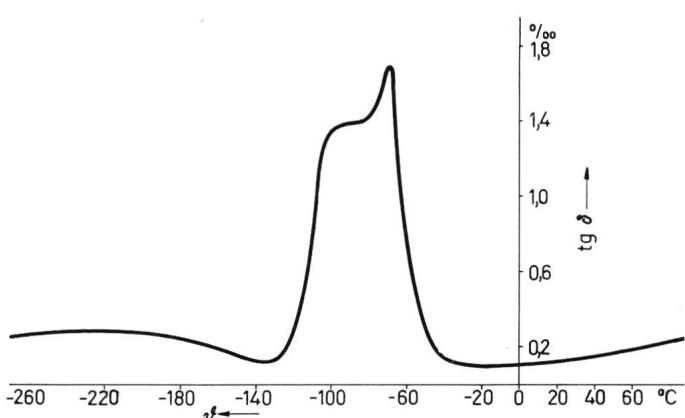
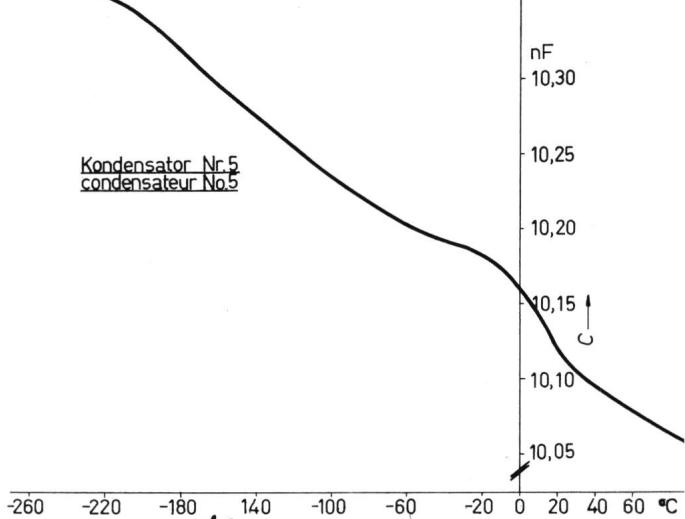


Fig. 7  
Gleich wie Fig. 3, aber mit Metall-Kunststoffkondensator  $C_n = 1000 \text{ nF}$

Tabelle IV

Nr.	$C_{20}$ nF	$C_{-180}$ nF	$\frac{\Delta C}{C_{20}}$ %	$C$ nF	$\text{tg } \delta_{20}$ %	$\text{tg } \delta_{-180}$ %	$\frac{\Delta \text{tg } \delta}{\text{tg } \delta_{20}}$ %	$\text{tg } \delta$ %
13	0,500	0,522	42		0,80	$\approx 0$	— 1000	
14	0,845	0,832	— 15,4		0,845	$\approx 0$	— 1000	
15	0,312	0,305	— 22,4		0,80	$\approx 0$	— 1000	
16	642,7	368,9	— 42,6		279	1253	3500	
17	2 492	1 179	— 528		126	1940	18 000	
18	21 033	16 491	— 216		84,2	1113	12 250	

densatoren bei Raumtemperatur mit 2 bis 6 V und im Tonfrequenzband (200 bis 3400 Hz) gemessen. Es zeigte sich, dass diese geringe Spannungsänderung bei allen Kondensatoren praktisch mit keiner Änderung der Kapazität und des Verlustwinkels verbunden war.

Im angegebenen Frequenzband ergab sich:

Typen	Kapazität	Verlustwinkel
Plastikfolien und Mica	konstant	konstant
Plastikfolien metallisiert und Papier	geringe Abnahme	Zunahme
Tantal	Abnahme	starke Zunahme

Hierauf soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden.

Die Messbrücke war eine gleicharmige Wienbrücke, die Vergleichsnormale ein Präzisionsdekadenkondensator in

Reihe mit einem Präzisionsdekadenwiderstand. Die Kapazität konnte also direkt abgelesen werden, während der Verlustwinkel aus der Beziehung

$$\text{tg } \delta_e = R_x \omega C_x$$

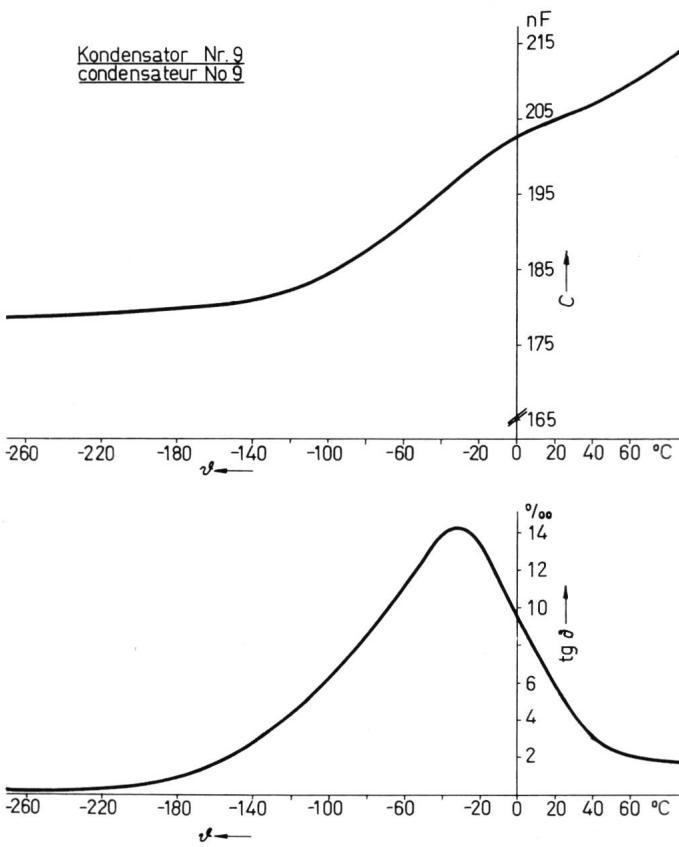
bestimmt wurde. Für Verlustwinkelwerte von  $\text{tg } \delta_e > 0,1 = 100\%$  muss der Kapazitätswert dann noch wie folgt umgerechnet werden:

$$C = \frac{C_{\text{gemessen}}}{1 + (\text{tg } \delta_e)^2}$$

Tantalkondensatoren wurden ohne überlagerten Gleichstrom gemessen.

Tabelle V

Nr.	$C_{20}$ nF	$C_{-180}$ nF	$\frac{\Delta C}{C_{20}}$ %	$C$ nF	$\text{tg } \delta_{20}$ %	$\text{tg } \delta_{-180}$ %	$\frac{\Delta \text{tg } \delta}{\text{tg } \delta_{20}}$ %	$\text{tg } \delta$ %
19	166 800	166 800	0		300	8000	59 000	
20	1 030	880	— 145		35	270	6 700	
21	1 035	910	— 120		30	210	6 000	



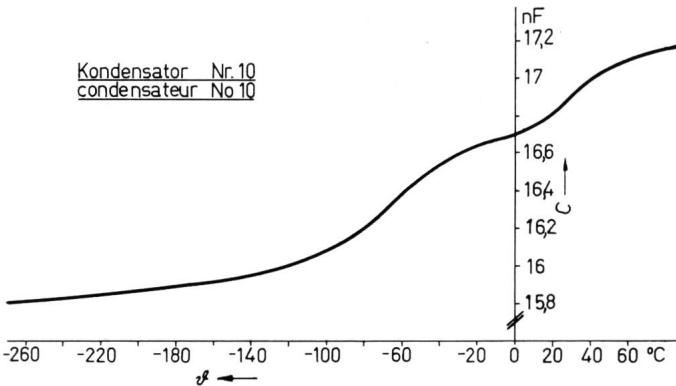
Verlustwinkel in den Figuren 3...11 graphisch dargestellt ist.

In Tabelle VII sind dann noch die Werte für Kapazität und Verlustwinkel eingetragen, die bei  $\approx 20^\circ\text{C}$  vor, 24 Stunden und 30 Tage nach dem Versuch bei tiefster Temperatur ( $\approx 4^\circ\text{K}$ ) gemessen wurden. Mit Ausnahme des Kondensators Nr. 1 — Isolation imprägniertes Papier in Aluminiumbecher, der beim Herausnehmen aus dem Kryostaten aufplatzte und seine Imprägniermasse verlor — haben alle Kondensatoren die starke Abkühlung gut vertragen.

## 6. Schlussfolgerungen

1. Die Messungen bei Zimmertemperatur nach den verschiedenen thermischen Versuchen zeigen, dass Kapazitäten und Verlustwinkel praktisch wieder dieselben Werte aufweisen wie vor den Versuchen. Das Dielektrikum und der Aufbau der Kondensatoren hat also keine irreversiblen Änderungen erfahren.

2. Die Versuche zeigen, dass für fast alle Kondensatoren die Kapazität mit der Temperatur abnimmt. Dies ist allerdings nicht für die Polystyrenkondensatoren der Fall, deren



## 4. Die untersuchten Kondensatoren

Die untersuchten Kondensatoren waren Papier-, Plastik-, Mika- und Tantalkondensatoren. Ihre Nennwerte und Abmessungen sind in Tabelle I und Fig. 2 angegeben.

## 5. Messergebnisse

### 5.1 Messungen zwischen $+20$ und $-180^\circ\text{C}$

Die Messergebnisse — Kapazität und Verlustwinkel bei  $+20^\circ\text{C}$  und  $-180^\circ\text{C}$  sowie deren relative Änderungen zwischen diesen Temperaturen — sind in den Tabellen II...V zahlenmäßig und graphisch dargestellt.

### 5.2 Messungen zwischen $+80$ und $-270^\circ\text{C}$

Je ein Kondensator jedes Typs wurde noch in diesem erweiterten Temperaturbereich gemessen.

Tabelle VI enthält die Messergebnisse für  $+20$ ,  $+80$  und  $-270^\circ\text{C}$ , während der Kurvenverlauf für Kapazität und

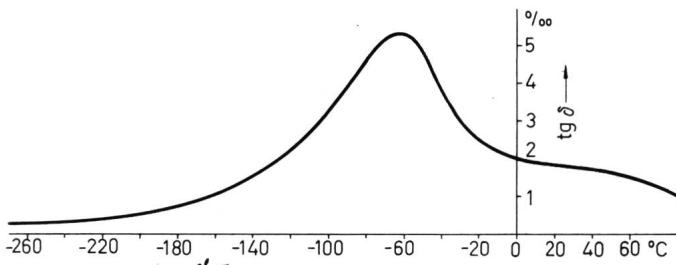


Fig. 9  
Gleich wie Fig. 3, aber mit Metall-Kunststoffkondensator  $C_n = 18 \text{ nF}$

Tabelle VI

Nr.	$C_{20}$ nF	$C_{80}$ nF	$C_{-270}$ nF	$\frac{C_{80}}{C_{20}}$ %	$\frac{C_{-270}}{C_{20}}$ %	$\text{tg } \delta_{20}$ %	$\text{tg } \delta_{80}$ %	$\text{tg } \delta_{-270}$ %	$\frac{\text{tg } \delta_{80}}{\text{tg } \delta_{20}}$ %	$\frac{\text{tg } \delta_{-270}}{\text{tg } \delta_{20}}$ %
1	113,60	115,40	91,50	101,5	80,5	3,31	1,50	0,40	45,3	12,1
3	525,29	505,70	342,10	96,4	65,1	6,36	3,00	0,50	47,1	7,9
5	10,12	10,07	10,37	99,6	102,5	0,11	0,22	0,26	200	236
7	6,37	6,34	6,55	99,5	102,5	0,113	0,210	0,086	186	7,6
8	938,90	945,75	897,23	100,5	95,6	1,22	0,63	0,51	51,6	41,8
9	204,75	212,75	176,50	103,9	86,2	5,76	1,80	0,20	31,3	3,5
10	16,77	17,16	15,80	102,2	94,2	1,68	1,10	0,30	65,4	17,8
12	318,50	320,20	300,20	100,5	94,3	1,37	0,60	0,10	43,8	7,3
16	642,7	707	145	110	22,5	279	280	4600	100,4	1650

Tabelle VII

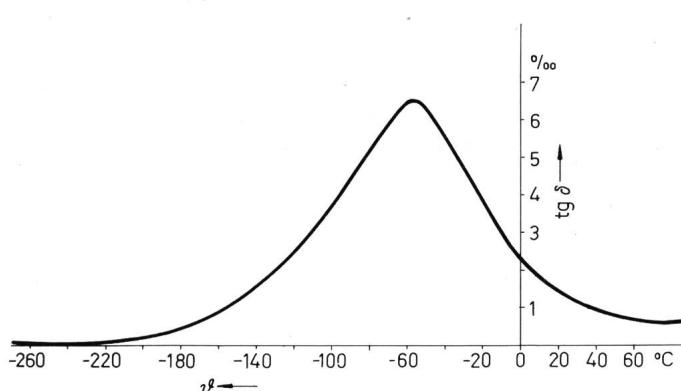
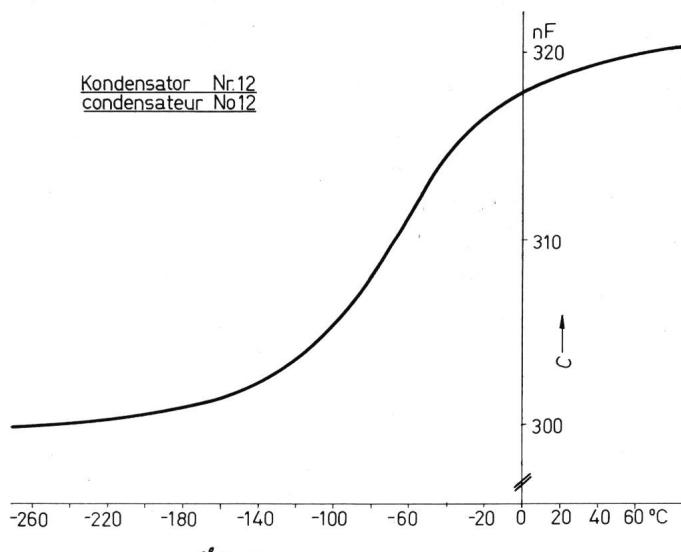
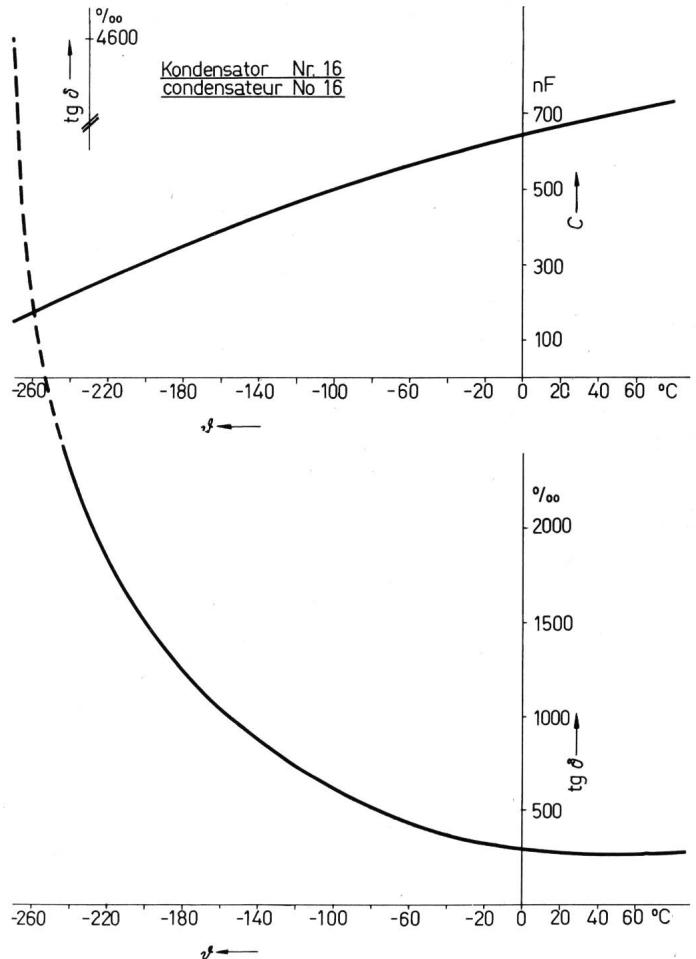
Nr.	Vor dem Versuch		Nach dem Versuch		nach 38 Tagen	
	$C_1$ nF	$\operatorname{tg} \delta_1$ %	$C_2$ nF	$\operatorname{tg} \delta_2$ %	$C_3$ nF	$\operatorname{tg} \delta_2$ %
1	113,93	2,55	96,75	2,54	107,35	12,45
3	525,10	6,97	507,87	3,50	507,53	8,14
5	10,09	$\approx 0$	9,93	$\approx 0$	9,90	$\approx 0$
7	6,42	$\approx 0$	6,39	$\approx 0$	6,37	1,27
8	948,74	1,80	939,23	$\approx 0$	948,19	2,75
9	206,19	5,52	207,07	5,48	205,22	5,77
10	16,83	1,68	16,82	1,78	16,74	1,81
12	319,83	1,32	320,06	$\approx 0$	319,43	4,18
16	692,67	320	654,53	296	—	—

Kapazität quasi linear mit abnehmender Temperatur zunimmt.

3. Die stärksten Kapazitätsänderungen zeigen, wie zu erwarten war, die Tantalkondensatoren:

Tabelle VIII

Nr.	$C_1 - C_3$ nF	$\frac{C_1 - C_3}{C_1}$ %	$\operatorname{tg} \delta_3$ $\operatorname{tg} \delta_1$
			—
3	17,57	3,34	1,17
5	0,19	1,88	—
7	0,05	0,84	—
8	0,55	0,06	1,52
9	0,97	0,47	1,04
10	0,09	0,53	1,08
12	0,40	0,12	3,14

Fig. 10  
Gleich wie Fig. 3, aber mit Metall-Kunststoffkondensator  $C_n = 330$  nFFig. 11  
Gleich wie Fig. 3, aber mit Tantalkondensator  $C_n = 1000$  nF

4. Die Kondensatoren mit Papier- oder Plastikisolation zeigen für den Verlustwinkel ein Maximum bei etwa  $-80$   $^{\circ}\text{C}$ , wonach der Verlustwinkel mit fallender Temperatur stark abnimmt.

5. Der bereits bei Zimmertemperatur kleine Verlustwinkel der Glimmerkondensatoren nimmt mit fallender Temperatur noch stark ab und ist unterhalb  $-100$   $^{\circ}\text{C}$  nicht mehr messbar ( $\operatorname{tg} \delta_e < 0,01$  %).

6. Der Verlustwinkel der Tantalkondensatoren nimmt wie bekannt bei fallender Temperatur stark zu und erreicht sehr hohe Werte (reelle Komponente wesentlich grösser als imaginäre,  $\operatorname{tg} \delta_e > 1$ ).

#### Adresse der Autoren:

Prof. R. Goldschmidt und D. H. Ohayon, Chaire des Télécommunications de l'EPF-L, 16, ch. de Bellerive, 1007 Lausanne.