

Gerät zur betrieblichen Messung von Temperaturkoeffizienten von Kondensatoren

Z**136-4**

Verfasser: F. Lieblang, Mitteilung aus dem Hochfrequenz-Laboratorium der Hescho, Hermsdorf i. Thür.

DK 621.319.4.029.6
: 621.317.335

Seit der Einführung von keramischen Kondensatoren macht die Hochfrequenz-Technik in ständig steigendem Umfang von der bequemen Möglichkeit Gebrauch, durch geeignete Wahl der Kondensator-Werkstoffe den Einfluß äußerer Temperatureinwirkungen auf Schwingkreise zu kompensieren. Die Anforderungen, die dabei an die Frequenzkonstanz der kompensierten Schwingkreise gestellt werden, machen sehr enge Toleranzen und daher sehr genaue Messungen der Temperaturkoeffizienten (TK) in der laufenden Fertigung derartiger Kondensatoren erforderlich. Für diese Messungen stehen heute jedoch lediglich Geräte zur Verfügung, die mehr oder weniger als Laboratoriums-Geräte anzusprechen sind. Wegen der Schwierigkeit der Messung mit diesen Geräten ist man auf äußerst zuverlässige und sehr intelligente Arbeitskräfte angewiesen, und es ist daher unmöglich, derartige Geräte für Mengenmessungen innerhalb einer Kondensatoren-Fabrikation anzusetzen. Der größte Nachteil solcher Geräte in einer betrieblichen Mengenmessung ist jedoch darin zu erblicken, daß die Messung eine durch die Erwärmungszeit bedingte sehr lange Leerlaufzeit des Bedienungspersonals erfordert. Der Meßvorgang ist dabei folgender:

- a) Einsetzen eines Prüflings an die C_p -Klemmen.
- b) Abwarten, bis der Kondensator sich genau auf die Umgebungstemperatur eingestellt hat (5 bis 10 min).
- c) Einstellung des Meßgerätes.
- d) Aufheizen und Abwarten, bis der Temperaturausgleich erfolgt ist (15 bis 20 min).
- e) Messung der durch die Temperatur bewirkten Kapazitätsänderung.

Während also der eigentliche Meßvorgang mit etwa 1 bis 2 min anzusetzen ist, beträgt die Leerlaufzeit bis zu 30 min für jeden Einzelkondensator, bei großen Kondensatoren sogar bis zu 60 min.

Im folgenden ist eine Meßanlage beschrieben, die vornehmlich für Mengenmessungen in laufender Fertigung entwickelt wurde und die die beschriebenen Nachteile nicht aufweist.

1. Meßverfahren.

Das Meßverfahren wird bestimmt durch die zu fordernde Meßgenauigkeit einerseits und die Bereiche für die Kapazität und die in Frage stehenden TK andererseits.

Da in der Hochfrequenz-Industrie Kondensatoren von rd. 5 bis 3000 pF mit TK von rd. $5 \cdot 10^{-6}$ bis $800 \cdot 10^{-6}$ verwendet werden, benötigt man ein Gerät mit einem außergewöhnlich großen Meßbereich, wenn

man nicht verschiedene Geräte für einzelne kleinere Bereiche einsetzen will, was jedoch unwirtschaftlich wäre. Die für die Kondensatoren einzuhaltende Toleranz für den TK erfordert die Messung von Kapazitätsänderungen in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{-6}$ pF/pF $^{\circ}\text{C}$, d. h. $1 \cdot 10^{-3}\text{‰}$ (eintausendstel promille!) je $^{\circ}\text{C}$ Temperaturänderung, also eine Genauigkeit, die das Maß üblicher betrieblicher Messungen um Zehnerpotenzen überschreitet.

Als Meßverfahren kommt für diese hohen Anforderungen nur ein Schwebungsverfahren in Frage, das die Bestimmung der durch eine Temperaturänderung hervorgerufenen Kapazitätsänderung als Frequenzänderung zu messen gestattet. In diesem Falle muß die Meßgenauigkeit für die Frequenzänderung z. B. bei 1 MHz mindestens 1 Hz betragen. Die Frequenzänderung kann nach verschiedenen Verfahren gemessen werden. Ein direkt anzeigender Frequenzmesser würde bei einer Meßgenauigkeit von $\pm 2\%$ für größere Frequenzänderungen am Prüfling die geforderte TK-Meßgenauigkeit von $1 \cdot 10^{-6}$ nicht ergeben, während die Bestimmung von Δf mittels Frequenzmeßbrücke für eine betriebliche Mengenmessung zu zeitraubend und zu unbequem wäre.

Eine sehr genaue und einfache Bestimmung von Δf ist möglich durch nochmalige Überlagerung mit einer genau bestimmbaren Frequenz eines Schwebungssummers. Die Übereinstimmung von Δf mit der Frequenz ist mittels einer Elektronenstrahlröhre sehr genau festzustellen, da bei genauer Frequenzgleichheit auf dem Bildschirm eine einfache Lissajous-Figur (Kreis bzw. Ellipse) entsteht. Der Frequenzvergleich nach dieser Methode ist sehr bequem und schließt subjektive Fehler weitgehend aus. Bei diesem Meßverfahren ist eine sehr gute Konstanz des Schwebungssummers erforderlich, sowie zur Messung kleiner Frequenzänderungen — entsprechend kleinen TK-Werten —, eine hohe Ablesegenauigkeit.

Zur TK-Bestimmung sind jeweils 2 Messungen erforderlich:

- a) Frequenzvergleich bei t_0 $^{\circ}\text{C}$,
- b) Frequenzvergleich bei $t_0 + \Delta t$ $^{\circ}\text{C}$.

a) Der Frequenzvergleich bei der Anfangstemperatur t_0 wird der Einfachheit halber unmittelbar mit Hochfrequenz durchgeführt, indem an das eine Plattenpaar der Elektronenstrahlröhre I (Bild 3) die Prüfsenderfrequenz und an das andere Plattenpaar eine entsprechende Oberwelle der Normalfrequenz gelegt wird. Die Prüfsenderfrequenz wird durch Feinabstimmung des Prüfsender-Variometers so lange verändert,

bis auf dem Bildschirm eine einfache stehende Lissajous-Figur (Kreis oder Ellipse) entsteht.

Um ohne Schwierigkeiten stets die entsprechenden Frequenzen an die Plattenpaare geben zu können, wird die Quarzoberwelle hinter einem abgestimmten Verzerrer und die Prüfsenderfrequenz über einen Verstärker mit eingebautem Frequenzmesser entnommen. Sowohl die Abstimmkala des Verstärkers als auch die des Frequenzmessers sind mit den Ordnungszahlen der Oberwellen des Normalgenerators geeicht. Einfache Lissajous-Figuren im Anzeigebild sind somit nur möglich bei Übereinstimmung dieser Skalen. Beide zu vergleichenden Frequenzen sind auf so hohe Spannungen verstärkt, daß auf dem Bildschirm Figuren von etwa 40 mm Durchmesser entstehen.

b) Der Frequenzvergleich bei der Endtemperatur des Prüflings $t_0 + \Delta t$ °C erfolgt mit einer zweiten Elektronenstrahlröhre. Die Prüfsenderfrequenz und die entsprechende Quarzoberwelle werden zu dem Zweck in einem Mischgerät gemischt und demoduliert. Die herausfallende Differenzfrequenz $\Delta f = f_0 - f_1$ wird nach Verstärkung auf entsprechende Spannung an das eine Plattenpaar der Röhre II gelegt. An dem anderen Plattenpaar liegt die entsprechend verstärkte Niederfrequenzspannung des Schwebungssummers. Zur genauen Bestimmung von Δf wird die Skala des Schwebungssummers so lange verstellt, bis auch hier eine einfache Lissajousche Figur entsteht. Am Schwebungssummer kann sodann die durch Temperaturänderung entstandene Frequenzänderung bestimmt werden. Hieraus und aus der bekannten Temperaturänderung sowie der bekannten Ausgangsfrequenz kann sodann der TK leicht berechnet werden. Es ergibt sich:

$$-TK = \frac{2 \cdot \Delta f}{f_0 \cdot \Delta t} \cdot \frac{C_x + C_0}{C_x} \quad (1)$$

worin C_0 die gesamte Kreiskapazität des Prüfsenders ohne den Prüfling C_x , f_0 die Frequenz der Quarzoberwelle darstellt. Bei Mengenprüfungen kann der Prüfungsvorgang dadurch wesentlich vereinfacht werden, daß durch verstellbare Reiter auf der Skala des Schwebungssummers jeweils die für die zu messenden Kondensatoren zulässige Frequenz Δf nebst dem zugehörigen Toleranzbereich festgelegt wird.

Um die geforderten Stückzahlen nach diesem Meßverfahren zu leisten, sind insgesamt 18 Prüfsender vorgesehen, die (Bild 1) auf einem runden Tisch längs des Umfanges eingebaut sind. Das eigentliche Meßgerät mit den dazu nötigen Gleichrichtern ist in der Mitte des Tisches drehbar angeordnet. Um Einstrahlungen der 18 Prüfsender auf das Meßgerät zu verhindern, sind diese sehr gut geschirmt, während die HF-Spannung hinter einer Trennstufe geerdet ist. Diese Erdung wird während der eigentlichen Messung aufgehoben und die Prüfsenderspannung an den Eingang des Meßgerätes gelegt.

Die Prüflinge befinden sich in Metallgehäusen und werden durch einen Luftstrom erwärmt. Hierbei wurde Wert gelegt auf geringste thermische Trägheit des Gehäuses und der gesamten Heizvorrichtung. Die Erwärmung erfolgt elektrisch über Heizwiderstände, die in den Luftstrom eingeschaltet sind. Um kurze Aufheiz- und Abkühlzeiten zu erzielen, wird zunächst mit

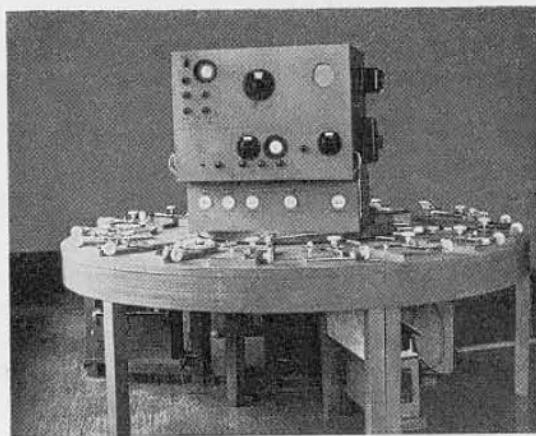


Bild 1. Ansicht der betriebsfertigen Meßeinrichtung.

sehr großem Heizstrom angeheizt. Sobald die obere Meßtemperatur (60° C) erreicht ist, schaltet ein Quecksilber-Schaltthermometer den Strom über ein Relais auf einen Wert zurück, der genau der Temperatur von 60° C entspricht. Zum Abkühlen auf 40° C wird zunächst der gesamte Heizstrom unterbrochen und Luft von Raumtemperatur durch die Anlage geblasen. Sobald die Temperatur auf 40° C zurückgegangen ist, schaltet ein zweites Thermometer einen Heizstrom ein, der genau der Temperatur von 40° C entspricht. Durch diese Maßnahme gelingt es, den in Bild 2 dargestellten Temperaturverlauf zu erzielen. Um den Einfluß schwankender Raumtemperaturen auf die Reproduzierbarkeit von Δt auszuschneiden, wird die angesaugte Raumluft auf konstante Temperatur vorgewärmt. Da die geförderte Luftmenge nur sehr geringen Schwankungen unterliegt und die einzelnen Heizströme hinreichend stabilisiert sind, ist die nach dieser Methode erreichte Temperaturkonstanz auf beiden Betriebstemperaturen sehr gut. Die Reproduzierbarkeit für Δt , die damit erzielt wurde, macht es möglich, auf eine dauernde Temperaturüberwachung zu verzichten, so daß Δt für jeden Prüfsender als Konstante eingesetzt werden kann.

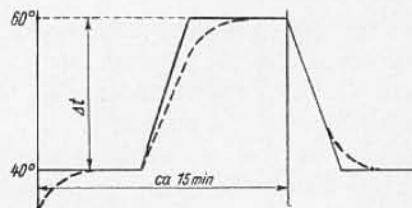


Bild 2. Temperaturverlauf der Heizluft (—) und des Prüflings (---).

Bei derartigen Messungen ist die Bestimmung der tatsächlich am Prüfling auftretenden Temperaturdifferenz von größter Bedeutung (1% Fehler in der Temperaturbestimmung bedeuten ebenfalls einen Fehler von 1% für den gemessenen TK). Aus diesem Grunde wurde Δt besonders sorgfältig bestimmt. Da die Messung mit Thermometern sich als sehr schwierig und schlecht reproduzierbar erwies, wurde die Temperaturdifferenz über eine Frequenzmessung mit einem Kondensator aus Condensa F ermittelt, dessen TK nach anderen Meßmethoden sehr genau zu $725 \cdot 10^{-6}$ festgestellt war. Dieser Kondensator hat die gleiche Lage, in der später die Prüflinge gemessen werden,

womit Δt sehr brauchbar festgelegt ist. Die Reproduzierbarkeit von Δt über mehrere Tage betrug $\pm 0,2^\circ \text{C}$, d. h. die Meßgenauigkeit der Meßanlage beträgt bei $\Delta t = 20^\circ \text{C}$, etwa $\pm 1\%$, bedingt durch die Meßsicherheit von Δt .

Zu diesem Fehler kommen noch kleine Fehler dadurch, daß Abgleich und Messung vorgenommen werden, bevor die Lissajouschen Figuren absolut ruhig stehen, so daß die gemessenen TK auf $\pm 1,5\%$ sicher sind. Diese Unsicherheiten wurden durch sehr umfangreiche Messungen, die sich über Tage erstreckten, bestens bestätigt.

Größere Meßunsicherheiten lassen sich nach diesen Erfahrungen ohne weiteres vermeiden, wenn man die Genauigkeit der Temperaturbestimmung weiter steigert. Da aber alle solche Maßnahmen eine erhebliche Verlängerung der Meßzeit verlangen und das Arbeiten mit dem Gerät wesentlich erschwert hätten, wurde auf eine weitere Steigerung der Meßgenauigkeit vorerst verzichtet.

Da im vorliegenden Fall der Absolutwert des Temperaturmeßkondensators zu schätzungsweise $\pm 10 \cdot 10^{-6}$ unsicher ist, besteht diese Unsicherheit natürlich auch für alle auf diesem Gerät gemessenen Kondensatoren, bis zu einem späteren Zeitpunkt die Temperatureichung mit einem Kondensator möglich wird, dessen TK absolut bekannt ist.

Während die Messung unter den Bedingungen normaler Erwärmungs- und Abkühlungskurven für einfache kleine Kondensatoren über 40 min bis zur jeweiligen Temperaturkonstanz benötigt hätte, wird nach der getroffenen Anordnung die erforderliche Konstanz auf beiden Meßtemperaturen praktisch bereits nach knapp 15 min erreicht. Bei der Messung kleiner Prüflinge können daher je Stunde und Prüfsender bis zu 4 Kondensatoren gemessen werden, mit der gesamten Meßanlage somit rd. 70 Kondensatoren je Stunde. Für diese Leistung würde man 35 der eingangs erwähnten Labor-Meßgeräte nebst entsprechendem Bedienungspersonal benötigen, während diese Meßanlage mit einer einzigen Hilfskraft auskommt.

2. Aufbau der Meßanlage.

Der Aufbau der Anlage ist in Bild 3 schematisch dargestellt; Bild 1 zeigt die fertige Anlage.

a) Generator für die Normalfrequenz. Die Normalfrequenz wird durch einen Quarzoszillator erzeugt, dessen Temperatur durch Einbau in den Wärmekreislauf eines Ultra-Thermostaten nach Höppler auf besser als $\pm 0,01^\circ \text{C}$ konstant gehalten wird. Bei Verwendung eines Schwingquarzes mit sehr kleinem TK und gut stabilisierter Stromquelle wird somit eine außerordentliche Frequenzkonstanz der Normalfrequenz erreicht.

b) Schwebungssummer. Zur Erzeugung der veränderbaren Meßfrequenz für die Bestimmung der Frequenzänderung wurde ein Schwebungssummer eigens entwickelt. Die konstante Quarzfrequenz von 100 kHz wird mit der Frequenz eines variablen Schwingkreises überlagert, der besonders sorgfältig temperaturkompensiert ist. Zusätzlich ist auch dieses Gerät in den Thermostat-Kreislauf eingeschaltet, um größte Frequenzkonstanz zu erzielen. Auf diesem Wege gelang es, für die Tonfrequenz eine hervorragende Konstanz zu er-

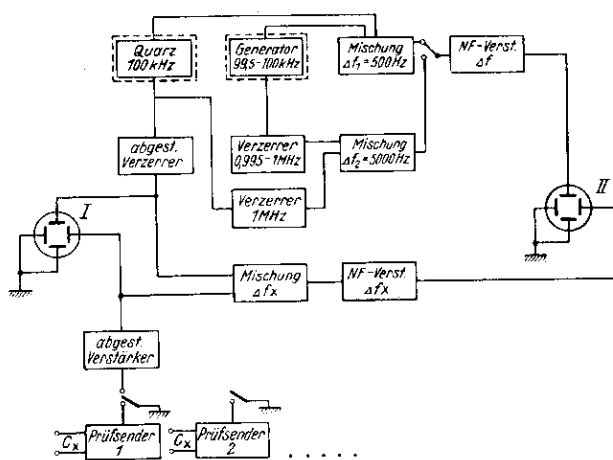


Bild 3. Schema der TK-Meßanlage (□□□ im Thermostat).

reichen. Beobachtungen über einen Zeitraum von mehr als 8 Tagen, wobei die Tonerfrequenz mit der Normalfrequenzaussendung des Deutschlandsenders verglichen wurde, ergaben max. Frequenzschwankungen von rd. $\pm 0,25 \text{ Hz}$. Zwecks genauer Ablesung hat der Tonerfrequenz-Generator einen Frequenzbereich von 500 Hz, so daß man an einer 2000teiligen Noniusskala noch 0,25 Hz genau ablesen kann. Um auch höhere Tonerfrequenzen mit der gleichen relativen Konstanz zu erhalten, wird die Frequenz von b) verzehnfacht und mit der 10. Oberwelle des Normalquarzes gemischt. Es entsteht somit hier ein Frequenzbereich von 5000 Hz. Durch Verwendung eines Drehkondensators mit entsprechendem Plattenschnitt wurde es möglich, über den Tonerfrequenzbereich einen konstanten Steigungsfaktor für die Frequenz zu erhalten, so daß zur Tonerfrequenzbestimmung keinerlei Kurven oder dgl. benötigt werden.

c) Prüfsender. Der Prüfling C_x , Bild 4, liegt in einem Schwingkreis parallel zu einer regelbaren Spule. Diese dient dazu, für jede Prüflingskapazität innerhalb eines Frequenzbereiches von 0,8 bis 2 MHz eine ganzzahlige Oberwelle von 100 kHz abzustimmen. Von der Verwendung eines Drehkondensators wurde abgesehen, um eine möglichst geringe Kreiskapazität zu erhalten. Wie aus 1. zu erkennen ist, wird der Einfluß von C_x auf die Frequenz um so kleiner, je größer $\frac{C_0}{C_x}$ wird. Bei großem C_0 und kleinen Prüflingen würden demzufolge nur sehr geringe Frequenzänderungen entstehen, wenn gleichzeitig auch der TK von C_x sehr klein ist.

Um bei großem C_x sowie großem TK die Frequenzänderung unter 5000 Hz zu halten, werden diese Prüflinge in Reihenschaltung mit einem Festkondensator, dessen Temperatur konstant bleibt, gemessen. Für diesen Fall ergibt sich:

$$\Delta TK = \frac{2 \Delta f}{f_0 \Delta t} \frac{[C_x (C_s + C_0) + C_s \cdot C_0] [C_x + C_s]}{C_x \cdot C_s^2} \quad (2)$$

Bei dieser Schaltung kann für jedes Produkt $C_x \cdot \text{TK}$ eine Frequenz Δf_0 bestimmt werden, bei der Δf in den gegebenen Grenzen bleibt und die größtmögliche Meßgenauigkeit erreicht wird. Um den Prüfsender von äußeren Temperaturänderungen unabhängig zu machen, ist der Schwingkreis für sich sehr gut kompensiert. Der ganze Prüfsender sitzt in einem metallisierten stark-

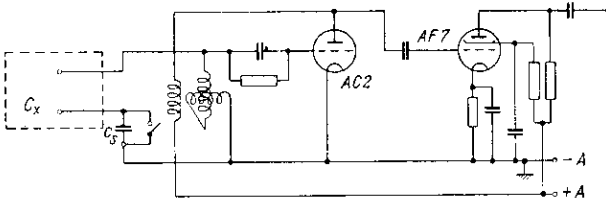


Bild 4. Schema des Prüfsenders.

wandigen Keramikgehäuse, wodurch auch äußere Temperatureinflüsse während der Meßperioden weitgehend ausgeschaltet sind. Die Frequenz des Prüfsenders wird über eine Trennstufe gut entkoppelt herausgeführt.

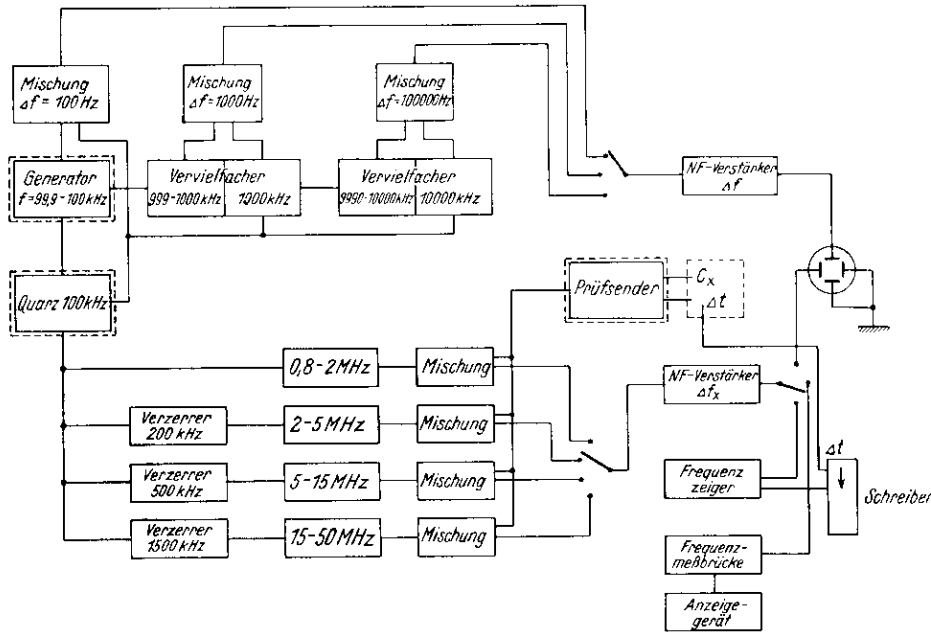


Bild 5. Schema des Laboratoriumsgerätes (----- im Thermostat).

3. Laboriumsgerät.

Gleichzeitig mit dem vorbeschriebenen wurde ein Gerät entwickelt, welches die Durchführung sehr genauer Laboriumsmessungen nach dem gleichen Meßverfahren gestattet. Vor allem wurde der Meßbereich dieses Gerätes bedeutend erweitert. Da die Einfachheit der Bedienung für ein Laboriumsgerät von geringerer Bedeutung ist und die Wirtschaftlichkeit der Messung keine ausschlaggebende Rolle spielt, konnte die mit diesem Gerät erzielbare Genauigkeit um gut eine Zehnerpotenz gesteigert werden. Dies ist insbesondere möglich durch genauere Bestimmung der Temperaturen am Prüfling, wie bereits vorn (Abschnitt 1b) gezeigt wurde. Das Prinzipschema dieses Gerätes zeigt Bild 5.

Der Schwebungssummer arbeitet hier in 3 Kaskaden auf 0 bis 100 Hz, 0 bis 1000 Hz und 0 bis 10000 Hz, die nach dem gleichen Verfahren, wie unter 2b beschrieben, erzeugt werden. Auf dem kleinsten Bereich beträgt die Ablesegenauigkeit bei einer 2000teiligen Noniuskala somit 0,05 Hz. Da die Konstanz dieses Tongenerators noch etwas gegenüber der unter 1b beschriebenen Anordnung gesteigert werden konnte, sind Fre-

quenzablesungen auf dem kleinsten Bereich auf etwa 0,1 Hz sicher.

Der HF-Bereich dieses Gerätes umfaßt 1 bis 50 MHz und soll später bis 100 MHz erweitert werden. Die äußerst konstante Ausgangsfrequenz von ebenfalls 100 kHz wird in 4, später 5 Stufen auf die genannten Frequenzen vervielfacht, wobei die einzelnen Kaskaden abgestimmt und mit den Ordnungszahlen der Quarzoberwellen geeicht sind. Die Messung erfolgt nach dem unter 1 beschriebenen Verfahren. Um auch Alterungen messen und registrieren zu können, kann in Erweiterung dieser Anordnung Δf über einen Frequenzzeiger auf einen Farbenschreiber gegeben werden. Gleichzeitig können die Temperaturen am Prüfling mit aufgezeichnet werden.

Die Prüflinge werden bei diesem Gerät im Thermostat-Kreislauf eines Ultra-Thermostaten nach Höppler erwärmt. Dadurch besteht einerseits die Möglichkeit, in beliebigen Temperaturbereichen zu arbeiten und zum andern wird eine sehr gute Temperaturkonstanz (etwa $\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$) am Prüfling und eine genauere Δt -Bestimmung erreicht.

Nimmt man die Genauigkeit der Temperaturbestimmung für diesen Fall auf $\pm 0,01^\circ \text{C}$ an, was sich mit sehr guten Normalthermometern heute erreichen läßt, so beträgt unter Berücksichtigung der übrigen

Konstanzen und Meßgenauigkeiten die Unsicherheit des gemessenen TK etwa $\pm 0,1\%$, wenn man mit $\Delta t > 50^\circ \text{C}$ arbeitet.

Um das Meßgerät möglichst universell verwenden zu können, sind auswechselbare Prüfsender vorgesehen, wobei auch diese Prüfsender in Thermostate eingebaut sind. Somit wird es möglich, auch den TK von Spulen und kompletten Schwingkreisen, sowie deren Dauerkonstanz, in beliebigen Frequenzbereichen zu untersuchen.

Da sich mit diesem Gerät Verstimmungen sehr genau messen lassen, liegt es nahe, den Verlustwinkel von Kondensatoren, Spulen und Schwingkreisen ebenfalls nach der Methode der doppelten Überlagerung zu bestimmen. Die hierbei benötigte Verstimmung der Grundfrequenz am Prüfling auf den $\sqrt{2}$ fachen Wert des Resonanzausschlages kann nach einem Röhrenvoltmeter, evtl. über eine Brückenschaltung, sehr genau durchgeführt werden. All diese Messungen können dabei in Abhängigkeit von der Temperatur oder sonstigen äußeren Einflüssen bequem durchgeführt werden.

Schrifttum.

1. H. Handrek, Keramische Hochfrequenz-Kondensatoren. ATM-Blatt Z 136—1 (August 1936); daselbst weitere Literaturangaben. — 2. L. Rohde, Geräte zur Messung der Temperatur-Abhängigkeit von Hochfrequenz-Kondensatoren. ATM-Blatt Z 136—3 (April 1938).