



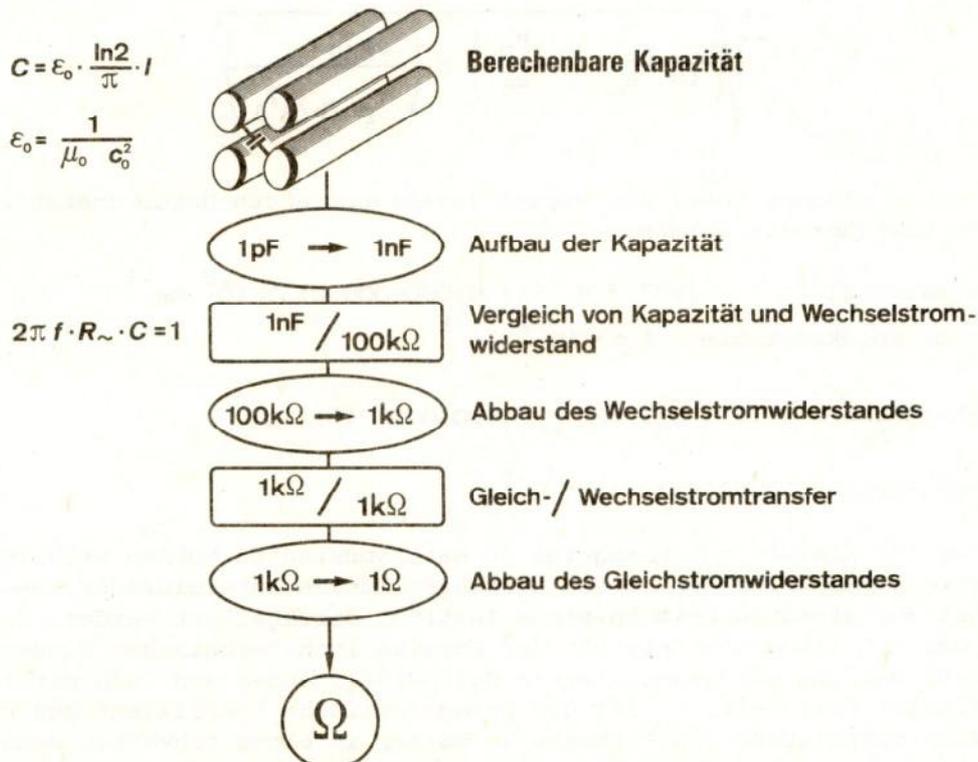
### BEWAHRUNG UND DARSTELLUNG DER EINHEIT DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDES OHM ( $\Omega$ )

Normale für den elektrischen Widerstand werden in der Meßtechnik über einen Bereich von mindestens 18 Zehnerpotenzen benötigt, nämlich von etwa  $10^{-5} \Omega$  ( $10 \mu\Omega$ ) bis etwa  $10^{14} \Omega$  ( $100 T \Omega$ ). Bezugsgröße für den Aufbau dieser Widerstandsskala ist in der PTB eine Gruppe von ausgewählten  $1-\Omega$ -Normalwiderständen, mit denen die Widerstandseinheit Ohm bewahrt wird. An diese  $1-\Omega$ -Normale werden höchste Anforderungen hinsichtlich zeitlicher Konstanz und Unempfindlichkeit gegen Einflußgrößen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Stombelastung und Transportbeanspruchung gestellt; entsprechend werden für das Vergleichen der Normale untereinander Meßeinrichtungen höchster Präzision und Empfindlichkeit, Thermostate mit hoher Temperaturkonstanz ( $\Delta T = 0,001 K$ ) sowie klimatisierte Räume benötigt.

Um sicherzustellen, daß das durch diese Widerstände bewahrte Ohm der gesetzlichen Definition entspricht, ist in regelmäßigen Abständen eine direkte Ableitung aus den Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems (SI) notwendig. Diese sogenannte Darstellung der Widerstandseinheit kann nach zwei verschiedenen Methoden erfolgen.

#### 1. Darstellung über eine berechenbare Kapazität

Die einzelnen erforderlichen Schritte zeigt das Diagramm:



Das Verfahren beruht darauf, daß sich die Kapazität eines sogenannten Kreuzkondensators nach Thompson und Lampard bei Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit  $c$  durch eine einzige Längenmessung ermitteln läßt. Von der Kapazität, die bei Wechselspannung einen genau berechenbaren Blindwiderstand darstellt, führt der weitere Weg über Wechselstromwiderstände zum Gleichstromwiderstand von  $1 \Omega$ . Ein wesentlicher Abschnitt dieser Ableitung, der Vergleich zwischen Kapazität und Widerstand (im Bild schraffiert) mit einer digitalen Wechselspannungsquelle, wird im Experiment vorgestellt. Diese Quelle erzeugt zwei stufenförmig approximierete sinusförmige Wechselspannungen gleicher Frequenz, die sich in ihrer Phasenlage zueinander genau einstellen lassen. Die digitale Wechselspannungsquelle bildet zusammen mit den beiden Widerständen eine Brückenschaltung, mit der ein Vergleich zwischen Widerstand und Kapazität mit einer relativen Unsicherheit von  $5 \cdot 10^{-7}$  möglich ist.

## 2. Darstellung über Naturkonstanten

Wird ein Leiter von einem Strom durchflossen und liegt senkrecht zur Stromrichtung ein Magnetfeld an, so kann senkrecht zu diesen beiden Richtungen eine Spannung, die "Hall-Spannung", abgegriffen werden. Der Quotient aus Hall-Spannung und Stromstärke ist der "Hall-Widerstand".

Der deutsche Physiker v. Klitzing machte nun im Jahre 1980 folgende Entdeckung: der Hall-Widerstand von Silizium-Feldeffekttransistoren (MOSFETs) in hohen Magnetfeldern (ca. 15 Tesla) und bei sehr tiefen Temperaturen (ca. 1 K) ist stets ein ganzzahliger Bruchteil des Naturkonstanten-Quotienten  $h/e^2$  ( $h$  = Plancksches Wirkungsquantum,  $e$  = Elementarladung), der Hall-Widerstand ist also "quantisiert". Der Zahlenwert für  $h/e^2$  ist zur Zeit aus indirekten Messungen mit einer Unsicherheit von etwa einem millionstel bekannt:  $h/e^2 = (25812,81 \pm 0,002) \Omega$ . Diese Unsicherheit ist zu groß, um die Einheit des elektrischen Widerstandes Ohm direkt auf  $h/e^2$  zurückführen zu können. Die große Bedeutung dieses neuen Quanteneffektes für die Metrologie liegt aber darin, daß die Ergebnisse der Präzisionsbestimmungen von  $h/e^2$  und anderer Quanteneffekte aufgrund physikalischer Zusammenhänge so miteinander verknüpft werden können, daß eine Ableitung der Widerstandseinheit Ohm möglich wird. Das Verhältnis der in der PTB bewahrten Widerstandseinheit zur SI-Einheit, der sogenannte Konversionsfaktor  $K_\Omega$ , ergibt sich zu

$$K_\Omega = \sqrt[3]{\left(\frac{c^3 \mu_0^2}{16 R_\infty} \cdot \frac{\mu_P}{\mu_B}\right) \cdot \left(\frac{2e/h}{\gamma_P (h/e^2)^2}\right)}$$

Die in der ersten Klammer unter der Wurzel zusammengefaßten Naturkonstanten sind mit sehr geringer Unsicherheit bekannt.

$c$  Lichtgeschwindigkeit:  $(2,997\,924\,58 \pm 0,000\,000\,012) 10^8 \text{ ms}^{-1}$

$\mu_0$  magnetische Feldkonstante  $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$

$\frac{\mu_P}{\mu_B}$  in Bohr-Magnetonen  $(1,521\,032\,209 \pm 0,000\,000\,016) 10^{-3}$

$R_\infty$  Rydbergkonstante  $(1,097373177 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1})$

Die in der zweiten Klammer zusammengefaßten Naturkonstanten können mithilfe von Quanteneffekten gemessen werden. Diese Messungen müssen untereinander konsistent sein, d.h. möglichst zur gleichen Zeit in einem Institut durchgeführt werden. Dies geschieht zur Zeit in der Abteilung Elektrizität der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt.  $h/e^2$  wird durch Messung des quantisierten Hall-Widerstandes und  $2e/h$  mithilfe des Josephson-Effektes ermittelt.  $\gamma_P$  ist der gyromagnetische Koeffizient des Protons, der aus der Präzessionsfrequenz von Protonen in Wasser in einem schwachen Magnetfeld bestimmt wird.