

*Joseph*

# Elektrostatische Abschirmung von Wechselstrom-Meßbrücken im Tonfrequenzbereich

J  
025-1

Verfasser: Dipl.-Ing. Theodor Walcher, Wien

DK 621.317.733.025

Aus der Wheatstonebrücke für Gleichstromwiderstands-Messungen wurde Schritt für Schritt im Einklang mit der Entwicklung der Wechselstromtechnik eine Reihe von Brückenschaltungen entworfen, die für die verschiedenen Verwendungszwecke eine besondere Ausbildung erfahren haben. Während der Aufbau derartiger Apparate für Wechselstrom mit einigen Hundert Hertz keine besonderen Schwierigkeiten verursacht, sind im gesamten Tonfrequenzbereich bereits erhebliche Vorsichtsmaßnahmen notwendig, um den Aufwand an Mitteln zur Erreichung einer Erhöhung der Meßgenauigkeit, wie sie etwa aus der Anzeige direktzeigender Meßinstrumente zu erhalten ist, zu rechtfertigen. Für Frequenzen über einige Tausend Hertz kann im allgemeinen nicht jede beliebige Brückenschaltung verwendet werden, ohne sie prinzipiell z. B. durch Anwendung einer teilweisen oder vollständigen Substitutionsmethode abzuändern. Maßgebend für die praktische Schaltanordnung ist immer die Grundforderung nach höchster Genauigkeit, wie sie nur durch Brückenschaltungen erreicht werden kann. Diese Methoden haben deshalb auch, allerdings bisher in einem etwas beschränkten Maße, Eingang in die Hochfrequenztechnik gefunden. Die Weiterentwicklung bekannter Schaltungen und die Durchführung wesentlicher Maßnahmen zur Verwendung in diesem Gebiet sind vielfach begonnen worden, neue Richtlinien zur allgemeinen Verwendungsmöglichkeit stehen noch bevor.

**Zweck der Abschirmung.** Wenn die einzelnen Schaltelemente einer Wechselstrom-Meßbrücke in entsprechender Entfernung voneinander aufgestellt, die Verbindungsleitungen mit Berücksichtigung der Induktion bzw. der gegenseitigen Kapazität verlegt und die Zuleitungen der Stromquelle und des Nullinstrumentes bifilar geführt werden, so sind damit Fehler durch elektrostatische und magnetische Einflüsse beseitigt. Obwohl aus diesem Grunde eine Abschirmung nicht notwendig wäre, treten durch die gewählte Aufstellung zusätzliche Fehler auf, wie erhebliche Restinduktivität und Ohmscher Widerstand der Verbindungsleitungen, Zusatzkapazitäten zwischen den einzelnen Brücken-zweigen, Erdkapazitäten aller Apparate usw., so daß veränderliche und undefinierte Meßergebnisse erhalten werden und schließlich aus diesem Grunde als Hilfsmittel zur Abschirmung gegriffen werden muß. Auch dieses Hilfsmittel erfüllt nicht immer vollständig den Zweck. Jede Abschirmung irgendeines Brückenteiles führt zu unvermeidlichen Kapazitäten und Ableitungen zwischen dem Apparat und seinem Schirm, die entsprechende Berücksichtigung finden müssen, sei es durch Korrekturformeln oder andere Maßnahmen, die noch

im folgenden näher besprochen werden. In besonderen Fällen ergibt sich jedoch durch die Anwendung zweckmäßiger Abschirmung eine derart günstige Lösung und Verteilung der Zusatzkapazitäten und Ableitungen, daß etwa Korrekturformeln vermieden werden können und die Einrichtung auch Messungen bei höheren Frequenzen gestattet.

Die Verteilung der elektrostatischen Einflüsse in der einfachen Scheinwiderstands-Meßbrücke, auf die jede andere Brückenschaltung zurückgeführt werden kann, ist unbestimmt und setzt sich aus verschiedenen Kapazitäten und Ableitungen zwischen jedem einzelnen Brücken-

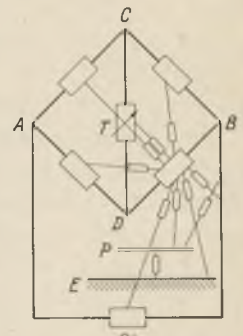


Bild 1. Verteilung der elektrostatischen Einflüsse in der einfachen Scheinwiderstandsbrücke.

teil und jedem anderen zusammen, die, wie aus Bild 1 hervorgeht, zusammengefaßt als hochohmige Scheinwiderstände zwischen den vier Brücken-zweigen, zwischen diesen und der Stromquelle bzw. dem Nullinstrument  $T$ , brückenfremden Potentialen  $P$  und Erde liegen. Außerdem treten noch die Kapazitäten und Ableitungen der einzelnen Aufbauelemente eines Brücken-zweiges untereinander hinzu, so z. B. die Kapazitäten der Spulen eines Kurbelwiderstandes zueinander. Diese Erscheinungen werden als kapazitive und galvanische Kopplungen der einzelnen Brückenteile entsprechend der Kapazität bzw. Ableitung zusammengefaßt. Der Zweck der Abschirmung ist nun die Festlegung unvermeidlicher und veränderbarer elektrostatischer und oft auch elektromagnetischer Einflüsse in Wechselstromeinrichtungen. Sie stellt hierzu das einfachste Hilfsmittel dar und wird durch eine andere Möglichkeit kaum übertroffen.

Wie in Bild 1 gezeigt wurde, fließen von den verschiedenen Punkten eines Schaltelementes in einem Brücken-zweig über die durch die elektrostatischen Beeinflussungen bedingten Scheinwiderstände Ströme gegen ihre Umgebung ab, so daß der an den Klemmen angeschlossene Scheinwiderstand von der Lage gegen seine Umgebung abhängig und nicht mehr eindeutig feststellbar ist. Für die Bestimmung des Meßergebnisses und für die Genauigkeit, mit der die Untersuchung durchgeführt wird, muß bis zu einem bestimmten Prozentsatz der Sollwert dieses Scheinwiderstandes bestimmt sein. Es handelt sich also darum, durch Abschirmung des betreffenden Brückenteiles die Ströme durch die Zusatzwiderstände so abzuleiten

oder zwischen solche Potentialpunkte der Schaltung zu verlegen, daß eine Bestimmung des Scheinwiderstandes des Brückenweiges ermöglicht wird. Wird dies systematisch für alle Brückenweige durchgeführt, dann kann ein stabiles Gleichgewicht der Brücke hergestellt werden und das Meßergebnis einwandfrei ausgewertet werden.

Während die prinzipiell notwendigen Maßnahmen zur einwandfreien Abschirmung für jede beliebige Wechselstrombrücke die gleichen sind, erfordert ihre praktische Ausführung meist ein eingehendes Studium des erfahrenen Schwachstromtechnikers dieses Spezialgebietes. Maßgebend für die Konstruktion der einzelnen Brückenteile, ihrer Zusammenstellung zur geforderten Meßeinrichtung, für den Entwurf des genauen Schaltplanes usw. sind die Größe der zu messenden Kapazität oder der Induktion, die Größe des Verlustwinkels bzw. Verlustwiderstandes, die Größe des Frequenzbereiches und die verlangte Genauigkeit.

**Praktische Ausführung der Schirme.** Die Schirme werden meist aus Kupfer- oder Messingblech hergestellt. Die Blechdicke wird weniger durch das elektrische Leitvermögen als vielmehr durch die geforderte mechanische Festigkeit bestimmt, da die Schirmung oft auch das tragende Gehäuse eines Schaltelementes, etwa eines Kondensators oder Widerstandes, bildet. Vom elektrischen Standpunkt aus betrachtet, sollte der Schirm, der ein Schaltelement umgibt, überall gleiches Potential haben. Dies trifft theoretisch, wie an einem Beispiel in Bild 2 gezeigt wird, nicht zu, da die an verschiede-

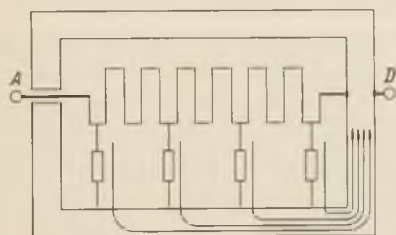


Bild 2.  
Stromverteilung in  
einem elektrostatischen  
Schirm. (Beispiel.)

denen Stellen des Schirmes zufließenden Kapazitäts- und Ableitungsströme verschiedene Spannungsabfälle auf ihrem Weg zum gemeinsamen Anschlußpunkt verursachen. Da aber diese Ströme gewöhnlich in geringen Grenzen gehalten werden können, sind die hervorgerufenen Potentialunterschiede zu vernachlässigen. Es kann daher auch der Schirm so dünn sein, als seine Ausführung mechanisch möglich ist. Weiters steht dem nichts im Wege, die Schirme aus minder gut leitendem Material, z. B. Zinkblech, oder als aufgespritzten Metallbelag auf Holz oder Isoliermaterial auszuführen. Trotzdem ist es wünschenswert, die Stromwege in den Schirmen möglichst kurz zu halten, da etwa in dem, allerdings selten vorkommenden, Fall eines um die Achse des Schaltelementes (eines Widerstandes, einer Induktions- oder Transformatorspule) spiralig gewickelten Schirmes die hindurchfließenden Kapazitäts- und Ableitungsströme eine nennenswerte Induktion in der Wicklung des betreffenden Schaltelementes hervorrufen können.

**Der Einfluß der Frequenz auf die Verwendungsmöglichkeit abgeschirmter Meßbrücken.** Wie bereits erwähnt, führt jede Abschirmung zu zusätzlichen Schein-

widerständen, deren Komponenten Kapazität und Ableitung sind und zwischen jedem Punkt des Schaltelementes und seinem Schirm liegen. Diese verteilten Scheinwiderstände können für die weiteren Überlegungen zu zwei an den beiden Klemmen des Schaltelementes gegen den Schirm liegenden Scheinwiderständen zusammengefaßt werden. Bei dem am häufigsten vorkommenden Fall, daß der Schirm mit einer Klemme verbunden wird, kommt eine Zusatzkapazität und Ableitung parallel zum Schaltelement zu liegen. Sowohl ein rein Ohmscher Widerstand oder ein idealer verlustloser Kondensator als auch eine Induktivität als Schaltelement werden durch die Abschirmung und die mit ihr verbundenen parallelen Scheinwiderstände selbst zu Scheinwiderständen, die von den idealen Sollwerten mehr oder weniger stark abweichen. Da einerseits der Strom durch die Zusatzkapazität proportional mit der Frequenz ansteigt, andererseits die Zusatzableitung sich mit der Frequenz und dem verwendeten Isoliermaterial ändert, kann die Frequenzabhängigkeit der einzelnen Scheinwiderstände in den Brückenarmen und damit die Einbuße an Meßgenauigkeit sehr erheblich werden. Es wird daher bei der Konstruktion von Wechselstrombrücken getrachtet, jedes Schaltelement mit seinem Schirm für sich möglichst genau und winkelfehlerfrei herzustellen. Gute Isoliermaterialien, lange Kriechstrecken, große Abstände des Schirmes von den stromführenden, an sich möglichst kleinen Teilen, deren Abmessungen meist durch die zulässige Wattbelastung gegeben sind, sind die erste Voraussetzung, die Zusatzwiderstände und damit ihren Einfluß möglichst zu verringern. Restliche Beträge werden durch Winkel- und Widerstandsjustierung vermindert, z. B. die Zusatzkapazität bei geschirmten Widerstandseinheiten durch kleine induktive Wicklungen des Widerstandes. Diese Methode ist theoretisch allerdings nur für eine bestimmte Frequenz exakt durchzuführen. Innerhalb eines größeren Frequenz- und Genauigkeitsbereiches läßt sich dies praktisch jedoch einwandfrei durchführen. Schließlich besteht die Möglichkeit, auf schaltungstechnischem Wege die Zusatz-Scheinwiderstände in andere Brückenweige oder in Hilfsweige zu verlegen, wo deren Einfluß vernachlässigt bzw. durch eine Hilfsabgleichung vollkommen beseitigt werden kann. Diese letztere Methode dürfte auch in Zukunft für die Entwicklung abgeschirmter Brückenschaltungen im Hochfrequenzgebiet von maßgebender Bedeutung sein.

**Symbole für Abschirmungen in Schaltschemen.** Um die Übersichtlichkeit von Schaltschemen und Schaltplänen mit mehreren abgeschirmten Apparaten nicht zu stören, wurde von G. A. Campbell<sup>1</sup> vorgeschlagen, nur die Grundschialtung vollständig zu zeichnen und die Schirme, wie in Bild 3 gezeigt wird, nur durch verschieden geformte Klammern anzudeuten. Gleichgeformte Klammern werden für jene Schirme verwendet, die an gleichen Potentialen liegen, überdies können diese Schirme mit Buchstaben be-

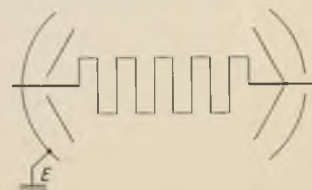


Bild 3. Symbolische Darstellung eines doppelt abgeschirmten Widerstandes.

zeichnet werden. — Im folgenden werden jedoch die Schirme voll eingezeichnet, da es sich in dieser Arbeit nicht darum handelt, die Grundschaltung, sondern die Abschirmung besonders hervorzuheben.

### Allgemeine Grundregeln zur Abschirmung.

J. G. Ferguson hat in einer ausgezeichneten Arbeit<sup>2</sup> die grundlegenden Richtlinien zur elektrostatischen Abschirmung aufgezeichnet und eingehend behandelt. Sie sollen hier in einer kurzen Übersicht zusammengefaßt werden.<sup>26</sup>

**1. Widerstände.** a) Ein fester Widerstand, z. B. eine Spule, die nach Bild 1 als Vergleichswiderstand in dem Brückenarm  $AD$  eingeschaltet ist, hat, wie erwähnt, im ungeschirmten Zustand verteilte Kapazität und Ableitung gegen seine Umgebung. Die an den Klemmen des Widerstandes zu- und abfließenden Ströme sind deshalb nicht gleich und der Scheinwiderstand nicht genau bestimmt. Wird der Widerstand nach Bild 4 mit einem allseitig geschlossenen Schirm umgeben, der nicht mit einem Punkt des Widerstandes oder mit Erde verbunden ist, sondern an ein anderes Poten-

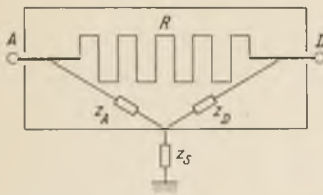


Bild 4.  
Geschirmter Widerstand.

tial der Schaltung, z. B. an den Brückenpunkt  $B$  oder  $C$ , dann ist zwar der verteilte Scheinwiderstand zwischen Spule und Schirm festgelegt und kann zu den an den beiden Klemmen  $A$  und  $D$  gegen den Schirm liegenden Scheinwiderständen  $z_A$  und  $z_D$  zusammengefaßt werden, doch ist der Scheinwiderstand des Schirmes zur Erde  $z_S$  eine variable Größe. Die aus den drei Zusatzwiderständen  $z_A$ ,  $z_D$  und  $z_S$  gebildete Sternschaltung kann in ein Dreieck umgewandelt werden<sup>3...8</sup>. (Siehe hierüber ATM, J 910—1 und J 920—1.) Eine Seite des neugebildeten Dreieckes liegt parallel zum Widerstand  $R$ . Dieser zusätzliche parallele Scheinwiderstand ist durch die Formel:  $z_A \cdot z_D \cdot \left( \frac{1}{z_A} + \frac{1}{z_D} + \frac{1}{z_S} \right)$  gegeben. Da in diesem Ausdruck die veränderbare Größe  $z_S$  vorkommt, ist der Gesamtwiderstand veränderlich und daher der Anschluß des Schirmes an ein beliebiges Potential nicht zulässig. Wird nun, wie in Bild 2 gezeigt wurde, der Schirm mit einer Klemme des Widerstandes, z. B. mit  $D$ , verbunden, dann wird  $z_D = 0$  und  $z_A$  kommt parallel zu  $R$  zu liegen. Der Scheinwiderstand  $z_S$  kann nun durch Wahl einer entsprechenden Schaltung, z. B. parallel zu einem Diagonalzweig (Stromquellen- oder Nullzweig), zu einem Hilfszweig bei Verwendung einer Hilfsbrücke<sup>9...11</sup> oder eventuell zu einem niederohmigen Brückenwiderstand geschaltet werden, so daß für die Feststellung des Widerstandes zwischen den Klemmen  $A$  und  $D$  außer dem Ohmschen Widerstand  $R$  nun der zusätzliche Scheinwiderstand  $z_A$  in Betracht zu ziehen ist. Wenn der Brückeneckpunkt  $D$  geerdet werden kann oder durch eine Hilfsbrücke Nullpotential erhält, dann wird der Einfluß des Scheinwiderstandes  $z_S$  vollkommen beseitigt. Der frequenzabhängige Einfluß des parallelen Restbetrages  $z_A$  kann durch entsprechende Korrekturformeln, wie bereits angedeutet wurde, oder durch Justierung des

Widerstandes  $R$  (der Größe nach durch Änderung der Länge und des Querschnittes des Wicklungsdrahtes, dem Winkel nach, z. B. durch unifilare oder bifilare Wicklungsanordnung eines Teiles der Wicklung) unter Berücksichtigung des durch seine individuelle Abschirmung gegebenen Wertes von  $z_A$  für einen bestimmten Frequenzbereich praktisch innerhalb geringer prozentueller Grenzen beseitigt werden (Siehe hierüber ATM, Z 111—1).

b) Parallelschaltung von Widerständen. Dieser Fall tritt in der Praxis seltener auf und hat im allgemeinen nur Bedeutung bei Brückenarmen, die größere Ströme führen<sup>12</sup> und meist aus niederohmigen Widerständen bestehen, zu denen ein höherohmiger Regelwiderstand parallelgeschaltet ist und für den Fall der Isolations- oder Ableitungs-Messung an Kondensatoren<sup>1,13...15</sup>, bei der der zu messende Widerstand parallel zu einem Regelwiderstand zu liegen kommt, dessen Änderung ein Maß für die Isolation oder Ableitung ist. Beide parallelgeschaltete Widerstände werden einfach mit je einem Schirm umgeben und an ein gemeinsames Potential gelegt, das, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, bestimmt wird. Es wird also jeder Widerstand so behandelt, als wäre er allein in den betreffenden Brückenarm eingeschaltet. Die Unterbringung der beiden Widerstände in einem gemeinsamen Schirmkasten ohne Trennwand zwischen den beiden Schaltelementen ist nicht einwandfrei, da gegenseitige Kapazitäten und Ableitungen Grund von Potentialverschiebungen und Fehlern sein können.

c) Serienschaltung von Widerständen. Für die Durchführung der Abschirmung von in Serie geschalteten Widerständen stehen mehrere Wege offen. Bei der Schaltung nach Bild 5a erscheinen außer den Zusatzwiderständen  $z_{R1}$  bzw.  $z_{R2}$  parallel zu den geschirmten Widerständen  $R_1$  bzw.  $R_2$ , noch  $z_{R1E}$  bzw.  $z_D$  als Erd-Scheinwiderstand des Schirmes von  $R_1$  bzw.  $R_2$ . Der Einfluß der beiden ersten ( $z_{R1}$  und  $z_{R2}$ ) wird, wie oben geschildert, durch Justierung der Widerstände beseitigt. Ebenso kann durch die oben besprochene Maßnahme (Verlegung von  $z_D$  in einen Diagonalzweig, Hilfszweig od. dgl.)  $z_D$  unschädlich gemacht werden. Der Erd-Scheinwiderstand  $z_{R1E}$  ist jedoch durch keine Maßnahme zu beseitigen und bildet eine Fehlerquelle dieser Schaltung. Sie stellt nur im Falle der Verwendung zweier konstanter Widerstände, bei Erdung eines Punktes  $A$  oder  $D$  und unveränderter Lage der Schirme gegen Erde eine befriedigende Lösung dar, da dann  $z_{R1E}$  parallel  $z_{R1}$  oder  $z_{R2}$  zu liegen kommt und mitberücksichtigt wird.

Die Schaltung nach Bild 5b bildet unter einer bestimmten Voraussetzung eine einwandfreie Lösung. Während für  $z_{R1}$  und  $z_{R2}$  dieselben Richtlinien wie für den vorhergehenden Fall gelten, kann der Einfluß von  $z_A$  und  $z_D$  dadurch beseitigt werden, daß bei Anwendung einer Erdungsschaltung etwa der Punkt  $D$  auf Nullpotential gebracht wird, so daß kein Strom durch  $z_D$  abfließen kann und  $z_A$  parallel zu einem Hilfszweig zu liegen kommt und keine Störung der Hauptbrücke verursacht.

Während die Schaltung nach Bild 5b also nur für bestimmte Fälle eine richtige Durchführung der Ab-

schirmung zuläßt, bildet die Serienschaltung einer beliebigen Anzahl von Widerständen und deren Abschirmung nach Bild 5c eine allgemein gültige Lösung, wie sie z. B. auch für Kurbelwiderstände für die einzelnen

Es soll hier nicht unerwähnt bleiben, obwohl es nicht den Gegenstand der Betrachtung bildet, daß man in der Radiotechnik durch die Schirmung von Hochfrequenz-Induktionsspulen mit gut leitenden, nicht

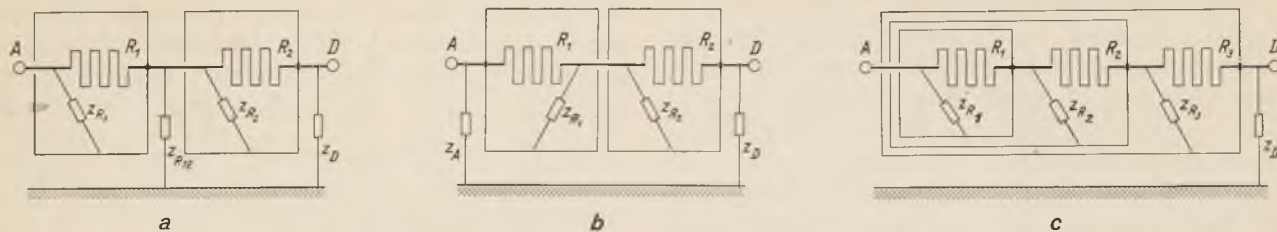


Bild 5. Abschirmung von in Serie geschalteten Widerständen.

Stufen durchgeführt wird. Die Schaltung stellt gewissermaßen eine Erweiterung der Schaltung nach Bild 5a dar, derart, daß der Schirm des Widerstandes  $R_2$  den Schirm des Widerstandes  $R_1$  umschließt. Die Rest-Scheinwiderstände  $z_{R1}$ ,  $z_{R2}$  . . . usw. finden wieder durch Justierung der Widerstände  $R_1$ ,  $R_2$  . . . oder durch Korrekturformeln Berücksichtigung. Der einzige Erd-Scheinwiderstand des äußersten, an D angeschlossenen Schirmes kann durch die bereits mehrfach erwähnten Maßnahmen, wie im Falle nach Bild 4, 5a oder 5b, beseitigt werden.

**2. Induktionsspulen.** Für die Abschirmung induktiver Scheinwiderstände kommen durchaus dieselben Richtlinien in Betracht, wie sie für die Ohmschen Widerstände angeführt wurden. Die gleichen Regeln gelten nicht nur bloß für die Abschirmung einer einzelnen Spule oder für die Schirmung der Serien- bzw. der selten vorkommenden Parallelschaltung von Induktionen, sondern auch für die Serien- und Parallelschaltung von induktiven und Ohmschen Widerständen.

Die nach den geschilderten Gesichtspunkten notwendige Verbindung des Schirmes mit einem Ende des induktiven Widerstandes führt zu einer unvermeidlichen Restkapazität, die parallel zur Spule zu liegen kommt und demnach ihre Eigenkapazität scheinbar vergrößert. Die wirksame Induktivität wird hiedurch stärker frequenzabhängig und errechnet sich aus der Formel:

$$L_{\omega} = L (1 + \omega^2 L C).$$

Es bedeutet:

- $L_{\omega}$  . . . die Induktion bei der Meßfrequenz  $\omega$ ,
- $L$  . . . die Induktion bei tiefer Frequenz,
- $C$  . . . die um die Restkapazität vermehrte Eigenkapazität.

Wie aus der Formel zu ersehen ist, wird der Fehler um so größer, je größer die Induktion und die Kapazität wird. Man muß daher trachten, bei großen Induktionen z. B. Drosselspulen mit Eisenkernen (z. B. aus Permalloypulver), die Distanz zwischen Spule und metallischer Abschirmung möglichst zu vergrößern, um die Kapazität in mäßigen Grenzen zu halten.

Auch die Abschirmung von Luftdrosselspulen mit kleinerer Induktion muß mit größeren Abständen zwischen Spule und Abschirmung durchgeführt werden, damit in dem metallischen Schirm keine nennenswerten Wirbelströme induziert werden, die einen weiteren Frequenzfehler verursachen würden. Es ist auch manchmal üblich, den Schirm z. B. streifenförmig zu unterteilen, um die Ausbildung größerer Wirbelströme zu vermeiden.

magnetischen Materialien eine magnetische Schirmung dadurch erreicht, daß man im Gegensatz zu den oben geschilderten Gesichtspunkten größere Wirbelströme zuläßt, deren Feld das äußere Feld der Spule aufhebt. Die hierdurch eintretende Änderung der Induktion ist hier belanglos; die Erhöhung der Dämpfung wird durch höhere Verstärkung ausgeglichen.

Die durch die Schirmung bedingte, parallel zur Induktion liegende Restableitung wird, soweit sie nicht vernachlässigbar ist, durch geringe Veränderung des Ohmschen Widerstandes der Spule ausgeglichen.

Was die prinzipielle Durchführung der Abschirmung von gegenseitigen Induktionen betrifft, so gelten für jede Primär- oder Sekundärspule die gleichen Regeln wie für eine einzelne Spule oder einen Widerstand, ohne Rücksicht auf die induktive Kopplung der Spulen. Wirbelströme in den Schirmen müssen selbstverständlich durch die erwähnten Maßnahmen vermieden werden. Im allgemeinen wird bei gegenseitigen Induktionsspulen auf eine richtig durchgeführte Abschirmung verzichtet, da diese Spulen meist einen geringen Scheinwiderstand besitzen und Zusatzkapazitäten weniger zur Geltung kommen. Aus dem gleichen Grunde bildet der Anschluß einer Klemme jeder Spule an ein erdnahes Potential einen weiteren Vorteil. Schließlich würde die Verteuerung der Konstruktion durch die zusätzliche Abschirmung besonders bei veränderbaren Induktionsspulen in keinem Verhältnis zu dem geringen Gewinn an Meßgenauigkeit einer Brücke bei Verwendung solcher Spulen stehen.

**3. Kondensatoren.** Zur Abschirmung kapazitiver Scheinwiderstände sind dieselben Verfahren anzuwenden wie bei Ohmschen und induktiven Widerständen. Die besondere Anführung bezieht sich, ebenso wie bei den Induktionen, nur auf einzelne beachtenswerte Erscheinungen. Der einen Kondensator umgebende, mit einem Belag verbundene Schirm führt zu einer parallelen Zusatzkapazität, die die Kapazität des Kondensators scheinbar vergrößert. Der Kondensator muß also, um wieder auf seinen Nennwert gebracht zu werden, verkleinert werden. Praktisch erfolgt die Abgleichung mit Hilfe eines kleinen Justierkondensators parallel zu dem um einige Prozente kleineren Hauptkondensator.

Die Zusatzableitung wird so klein wie möglich gehalten, um sie in vernachlässigbaren Grenzen zu halten oder die entsprechenden Korrekturformeln nicht unhandlich zu gestalten. Selbstverständlich muß die Isolierung des Kondensators gegen den Schirm mindestens

mit den gleichen, wenn möglich mit besseren Isoliermaterialien geschehen, als der beiden Beläge gegeneinander.

Bei der Parallelschaltung zweier oder mehrerer Kondensatoren ist wieder die getrennte Abschirmung mit gemeinsamer Verbindung vorzuziehen oder die Unterbringung in einem gemeinsamen Gehäuse mit Trennwänden durchzuführen. Die Serienschaltung von Kondensatoren ist für Brückenschaltungen selten im Gebrauch, sehr häufig ist jedoch die Serienschaltung von Kondensator und Widerstand. Auch für diesen Fall kommt das Schema nach Bild 5c in Betracht. Zur Vereinfachung und Verbilligung der Konstruktion tritt dann (unter Voraussetzung von  $R_3 = 0$ ) immer der konstante Wert an die Stelle von  $R_1$  und der veränderbare Wert an die Stelle von  $R_2$ . Außer der verhältnismäßig einfacheren Konstruktion z. B. von Kurbelwiderständen, bei einfacher gegenüber mehrfacher Abschirmung, ergibt sich oft die Möglichkeit, bei Erdung des Punktes  $D$ , daß die Feineinstellung von  $R_2$ , etwa als Schleifdraht ausgebildet, keiner Schirmung bedarf, da die Spannung gegen Erde sehr gering ist und eine nicht bemerkbare Beeinflussung des Widerstands- und Winkelfehlers auftritt. Die mehrfache Abschirmung eines Blockkondensators oder einer festen Stufe eines Widerstandes macht dagegen keine Schwierigkeiten, ebenso ist es praktisch noch verhältnismäßig einfach, Stöpselkondensatoren oder -widerstände mehrfach zu schirmen.

Die bisher angeführten Richtlinien zur Abschirmung einzelner Brückenarme können nun auf vollständige Brückenschaltungen angewendet werden. Während sich die prinzipielle Anordnung der Abschirmungen von Brückenschaltungen in die Grundform der Schirmung der allgemeinen Scheinwiderstandsbrücke zusammenfassen läßt, ist ihre praktische Anwendung und Ausführung der Schirmung an jede bestimmte Schaltung gebunden. Die Größe des zu messenden Scheinwiderstandes, seine Art, der geforderte Frequenz- und Genauigkeitsbereich beeinflussen die Ausführung der geschirmten Brückenteile, und die Konstruktion derselben ergibt oft bemerkenswerte Probleme.

Nach der Art des zu messenden Scheinwiderstandes kann die allgemeine Scheinwiderstandsbrücke nach folgenden Gesichtspunkten entwickelt werden: Für „reine Scheinwiderstände“ (ohne, bzw. vernachlässigbare Erd-Scheinwiderstände) und „Scheinwiderstände

mit Erd-Scheinwiderständen“ (z. B. die Kapazität zweier Leiter eines Kabels gegeneinander und gegen den Bleimantel). Besondere Fälle der letzteren Art sind „einpolig geerdete“ und „gegen Erde im Gleichgewicht stehende“ Scheinwiderstände. Die Anwendung der für die allgemeine Wechselstrombrücke geltenden Regeln zur elektrostatischen Abschirmung erfolgt individuell entsprechend dem Ohmschen, induktiven oder kapazitiven Charakter des zu messenden bzw. zu vergleichenden Scheinwiderstandes.

### Die allgemeine Wechselstrombrücke.

**1. Für reine Scheinwiderstände.** Das Problem der Abschirmung von Wechselstrom-Meßbrücken wurde in der genannten Arbeit von Campbell<sup>1</sup> erstmalig behandelt und, wie erwähnt, von Ferguson<sup>2</sup> einer eingehenden Behandlung unterworfen.

Wie in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt wurde, erhält jeder der vier Zweige der in Bild 6a gezeigten allgemeinen Wechselstrom-Meßbrücke eine mit einem Ende jedes Scheinwiderstandes verbundene Abschirmung. Ein Minimum der in Bild 1 gezeigten Rest- und Erd-Scheinwiderstände wird nur dann erhalten, wenn die Schirme an zwei gegenüberliegenden Brückeneckpunkten angeschlossen werden. In diesem Fall bleibt dann lediglich ein Scheinwiderstand  $z_{CD}$  zwischen den beiden Brückenpunkten  $C$  und  $D$ , der sich aus Kapazität und Ableitung zwischen den beiden Schirmpaaren zusammensetzt, und deren Erd-Scheinwiderstände  $z_C$  und  $z_D$ . Keine dieser drei Größen fällt parallel zu einem Brückenarm, sondern lediglich in einen Diagonalarm, so daß aus diesem Grunde keine Fälschung des Meßergebnisses zu erwarten wäre. Betrachtet man jedoch die Verhältnisse nach dem Hinzufügen der notwendigen Ein- und Ausgangstromkreise (Bild 6b), so besteht keine Möglichkeit die Zusatzwiderstände lediglich auf gegenüberliegende Punkte zu vereinigen. Bei unabgeschirmten Ein- und Ausgangstromkreisen würde ihre verteilte und gegenseitige Kapazität und Ableitung das Gleichgewicht stören. Um dies zu verhindern werden diese Stromkreise, wie das Bild zeigt, geschirmt. Es erscheinen dann außer den Scheinwiderständen  $z_B$ ,  $z_C$  und  $z_D$  der Schirme gegen Erde, noch die Scheinwiderstände  $z_{BC}$  und  $z_{BD}$  der Schirme gegeneinander. Der Einfluß dieser Größen kann nur dadurch beseitigt werden, daß entweder der Ein- oder der Ausgangstromkreis mit einem zweiten Schirm umgeben wird, der mit einem gegenüberliegenden Brückeneckpunkt

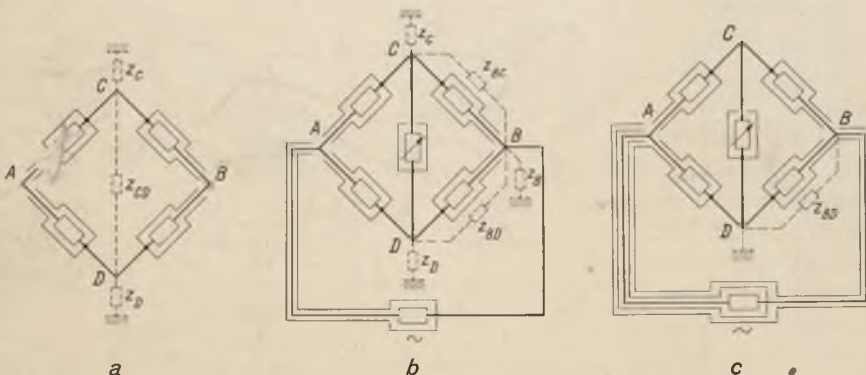


Bild 6. Die Abschirmung der allgemeinen Scheinwiderstands-Meßbrücke.

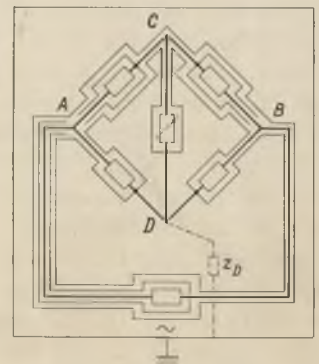


Bild 7. Brückenschaltung mit einem Erd-Scheinwiderstand.

verbunden ist, wie dies Bild 6c für den Fall des Stromzweiges  $AB$  zeigt, dessen äußerer Schirm mit dem Punkte  $D$  in Verbindung ist. Außer den beiden Erd-Scheinwiderständen  $z_C$  und  $z_D$  tritt nur ein Zusatzwiderstand  $z_{BD}$  zwischen dem inneren und äußeren Schirm des Zweiges  $AB$  auf, der parallel zum Brücken-zweig  $BD$  zu liegen kommt. Die beiden Größen  $z_C$  und  $z_D$  bleiben ohne Einfluß auf das Brückengleichgewicht, da sie parallel zum Zweig  $CD$  in Serie über den Erdpunkt zu liegen kommen. Es steht dem nichts im Wege, im besonderen Fall den Punkt  $C$  oder  $D$  zu erden, wodurch  $z_D$  bzw.  $z_C$  parallel zum Zweig  $CD$  zu liegen kommt und ebenfalls keine Störung des Brückengleichgewichts eintritt. Der Zusatz-Scheinwiderstand  $z_{BD}$  parallel zu  $BD$  muß allerdings Berücksichtigung erfahren, da er das Brückengleichgewicht stört. Dies kann je nach dem vorliegenden Fall auf verschiedene Weise geschehen. Entweder durch Wahl der Schaltung und Abschirmung der Brücken-zweige, derart, daß der verhältnismäßig hohe Scheinwiderstand  $z_{BD}$  zu einem kleinen Scheinwiderstand zu liegen kommt und vernachlässigt werden kann, durch Einjustierung des Wertes  $z_{BD}$  in den Wert des zwischen den Punkten  $B$  und  $D$  eingeschalteten Brückenelementes, durch Einführung einer Korrekturformel für die Auswertung des Meßergebnisses, in der der Wert des Scheinwiderstandes  $z_{BD}$  erscheint, oder schließlich bei Durchführung einer sog. Nullmessung bei ausgeschaltetem Meßobjekt, durch Ausscheidung des Wertes  $z_{BD}$  bei der Bildung der Differenz aus den beiden Meßergebnissen. Die letzte Möglichkeit wird vor allem und besonders bei Kapazitätsmessungen angewendet<sup>16...19</sup>.

## 2. Für Scheinwiderstände mit Erd-Scheinwiderständen.

Dem reinen Scheinwiderstand kommt eigentlich nur die Bedeutung eines Begriffes zu. Praktisch hat tatsächlich jeder Scheinwiderstand gegen Erde eine verteilte Kapazität und Ableitung, die man sich zu je einem Scheinwiderstand zwischen Erde und den beiden Klemmen des Schaltelementes zusammengefaßt denken kann. Ist der zusätzliche Wert dieser beiden Größen vernachlässigbar klein gegen den Wert des Schaltelementes, dann wird das in Bild 6c gezeigte und besprochene Schirmverfahren angewendet. Ebenso kann das gleiche Verfahren bei jenen Scheinwiderständen angewendet werden, die einpolig geerdet sind und deren anderer Pol einen Erd-Scheinwiderstand besitzt. In diesem Fall wird an den Brückenpunkt  $D$  der geerdete Pol des Schaltelementes angeschlossen und dessen Scheinwiderstand samt dem parallelen Erd-Scheinwiderstand gemessen, wie es der Verwendung des Schaltelementes zukommt. Während also im vorhergehenden Kapitel bei der Messung eines reinen Scheinwiderstandes keine Zusatz-Scheinwiderstände auftreten, die einen Fehler bei der Bildung der Differenz aus der Messung und Nullmessung verursachen würden, trifft dies für mit Erd-Scheinwiderständen verbundene Scheinwiderstände nicht mehr zu. Würde etwa an eine Brücke mit dem prinzipiellen Schaltbild nach Bild 6c (mit nicht geerdetem Punkt  $D$ ) ein derartiger Scheinwiderstand an die Klemmen  $B$  und  $D$  angeschlossen werden, so würde nach Auflösung des durch die drei Erd-Scheinwiderstände der Brückenpunkte  $B$ ,  $C$  und  $D$  gebildeten

Sternes in ein Dreieck, ein Teil-Scheinwiderstand parallel zum Brücken-zweig  $BC$  fallen, der zu falscher Brückeneinstellung führen würde. Dieser zusätzliche Scheinwiderstand könnte durch Eliminierung des Erdscheinwiderstandes des Brückenpunktes  $C$  vermieden werden. Dies geschieht nach Bild 7 derart, daß der Punkt  $C$  und alle an diesem angeschlossenen Schirme mit einer weiteren Abschirmung versehen wird, die mit dem Punkte  $D$  verbunden wird, wodurch  $z_C$  parallel zum Diagonalzweig  $CD$  zu liegen kommt. Es bleibt dann lediglich nur mehr der Erd-Scheinwiderstand des Punktes  $D$  über. Eine weitere Möglichkeit, auch diesen durch das einfache Mittel einer Abschirmung zu vermeiden, besteht nicht mehr. Die gezeigte Anordnung genügt aber noch nicht zur Messung von Scheinwiderständen mit Erd-Scheinwiderständen. Dies geht aus folgendem Beispiel hervor. Handelt es sich etwa um die Messung der Betriebskapazität eines zweiadrigen Kabels, so werden entsprechend der Vergleichs- oder Substitutionsmethode in den Brücken-zweig  $AD$  (bzw. in  $AD$  und  $BD$ ) Kondensatoren eingeschaltet und zunächst durch die Änderung einer Kapazität eine Nullmessung bei nicht eingeschaltetem Kabel durchgeführt. Nach Bild 8a wird also tatsächlich mit der Brücke nur die zwischen den Klemmen  $BD$  herrschende Kapazität  $c_{BD}$  gemessen. Die Kapazität  $c_D$  des Punktes  $D$  als Komponente des Scheinwiderstandes  $z_D$  gegen Erde hat keinen Einfluß auf die Brückeneinstellung, da kein Strom über diese Kapazität zu irgendeinem anderen Brückenpunkt fließen kann. Werden nun nach Bild 8b die beiden Leiter 1 und 2 des Kabels an  $B$  und  $D$  angeschlossen, dann wird zwischen diesen Punkten eine Kapazität gemessen, die durch den Ausdruck  $C_{12} + c_{BD} + \frac{(C_1 + c_D) \cdot C_2}{C_1 + C_2 + c_D}$  definiert ist. Wird das Ergebnis der Nullmessung  $c_{BD}$  abgezogen, so ergibt sich nicht die Betriebskapazität des Kabels  $C_{12} + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ , sondern eine von dieser abweichende Kapazität, deren Größe von  $c_D$  abhängt. Eine genaue Messung der Betriebskapazität ist demnach nur durch ein Näherungsverfahren möglich.

Für sehr große Betriebskapazitäten könnte die beschriebene Brücke unter der Voraussetzung verwendet werden, daß  $c_D$  gegen  $C_1$  vernachlässigbar klein gemacht werden kann. Da der Wert  $c_D$  nur wenig durch Vergrößerung des Abstandes zwischen den an  $D$  liegenden Schirmen und dem Erdschirm verkleinert werden kann, hat diese Einschränkung des Meßbereiches der geschilderten Brücke wenig praktischen Wert. Außer-

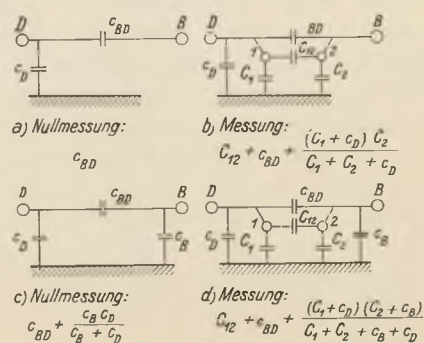


Bild 8. Messung der Betriebskapazität eines zweiadrigen Kabels.

dem gibt es ein anderes Näherungsverfahren mit besseren Ergebnissen und verhältnismäßig einfacherer Abschirmung. Voraussetzung dieses Verfahrens ist die Annahme der Messung sog. „erdsymmetrischer“ Scheinwiderstände, d. h. daß im Falle des zweiadrigen Kabels die Erdkapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  als annähernd gleich groß (also  $C_1 = C_2 = C_E$ ) angenommen werden können. Damit ist weiters die Bedingung verbunden, daß auch die Anschlußklemmen der Brücke für das Meßobjekt gleiche Erdkapazitäten besitzen, also  $c_D = c_B (= c_E)$  ist, da dann nach Bild 8c die Nullmessung den Wert  $c_{BD} + \frac{c_E}{2}$ , nach Bild 8d die Messung bei angeschaltetem Kabel  $C_{12} + c_{BD} + \frac{C_E + c_E}{2}$  und die Differenz aus beiden Messungen den Wert der Betriebskapazität eines erdsymmetrischen Kabels:  $C_{12} + \frac{C_E}{2}$  ergibt. Die Zulassung der Erdkapazität  $c_B$  und  $c_D$  der Brückenpunkte  $B$  und  $D$  setzt eine von der vorher beschriebenen etwas abweichende Brücke (nach Bild 9) voraus. Wenn zunächst wieder von der Schaltung nach Bild 6b ausgegangen wird, mit dem Unterschied, daß zwar jeder der sechs Brückenarme seinen individuellen Schirm besitzt, die Verbindungsleitungen zu den Brückenpunkten  $A$  und  $B$  aber nicht geschirmt werden, so besitzen alle vier Brückeneckpunkte Erdscheinwiderstände. Da nur die Erdscheinwiderstände der Punkte  $B$  und  $D$  zulässig sind, müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden, um die Erdscheinwiderstände der Punkte  $A$  und  $C$  zu eliminieren. Wie nun in Bild 9 an einem Beispiel gezeigt wird, ist dies auf die Weise möglich, daß alle an  $C$  liegenden Schirme und Verbindungsleitungen mit einer Abschirmung versehen werden, die mit dem Brückenpunkt  $D$  verbunden ist, und weiters alle an  $A$  liegenden Schirme und Leitungen mit einem mit  $B$  verbundenen Schirm umgeben werden. Wie aus dem Schema hervorgeht, ist die Abschirmung im Vergleich zu der nach Bild 7 einfacher, da nur mehr die Brückenarme  $AC$  und  $BC$ , abgesehen von dem gemeinsamen Erdschirm, eine doppelte Schirmung besitzen.

Es handelt sich nun darum, die beiden Rest-Scheinwiderstände  $z_B$  und  $z_D$  auf gleichen Wert zu bringen, um die angeführte Gleichgewichtsbedingung für erdsymmetrische Scheinwiderstände zu erfüllen. Dies ist durch die Anwendung eines verhältnismäßig einfachen Verfahrens möglich. Zunächst wird z. B. der Brücken-

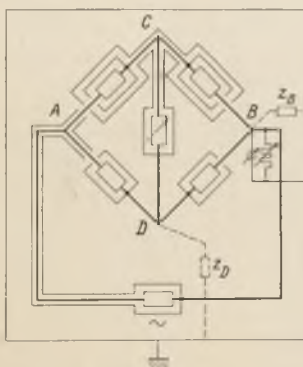


Bild 9. Meßbrücke für erdsymmetrische Scheinwiderstände.

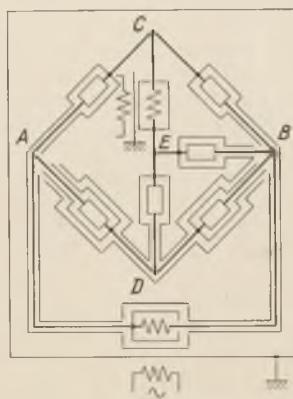


Bild 10. Abschirmung der allgemeinen Andersonbrücke.

punkt  $D$  mit dem Erdschirm verbunden, wodurch der Widerstand  $z_D$  kurzgeschlossen erscheint und  $z_B$  parallel zum Brückenarm  $BD$  zu liegen kommt. Nun wird irgendein Brückenarm solange geändert, bis die Brücke im Gleichgewicht ist. Bei ungeändertem Brückenverhältnis wird nun an Stelle des Brückenpunktes  $D$  der Punkt  $B$  geerdet, wodurch  $z_B$  kurzgeschlossen erscheint und nun  $z_D$  parallel zu  $BD$  zu liegen kommt. Ist  $z_D$  größer als  $z_B$ , so muß nun eine Zusatzkapazität und -ableitung zwischen  $B$  und Erde geschaltet werden, um die Gleichheit der Erd-Scheinwiderstände der beiden Brückenpunkte  $B$  und  $D$  und damit das Brückengleichgewicht wieder herzustellen. Ist  $z_B$  größer als  $z_D$ , so wird durch Zusatz-Scheinwiderstände von  $D$  gegen Erde die Brücke noch stärker aus dem Gleichgewicht gebracht. Es wird dann wieder der Brückenpunkt  $D$  geerdet und Zusatz-Scheinwiderstände von  $D$  gegen Erde eingeschaltet, bis die Brücke im Gleichgewicht ist. Nach Hinzufügung dieser Scheinwiderstände, die gewöhnlich aus kleinen veränderbaren Kondensatoren und dazu parallelen hohen Widerständen bestehen, und Aufhebung der Erdung des Punktes  $B$  bzw.  $D$  ist die Brücke zur Messung erdsymmetrischer Scheinwiderstände geeignet.

Ein prinzipielles Verfahren zur Abschirmung einer zur Messung von erd-unsymmetrischen Scheinwiderständen geeigneten, ähnlich aufgebauten Brückenschaltung ist derzeit noch nicht veröffentlicht. Im allgemeinen werden z. B. für Kabelmessungen, die Meßmethoden erdsymmetrischer Scheinwiderstände mit genügend hoher Genauigkeit angewendet. Bei den selten vorkommenden Fällen starker Unsymmetrie oder für Präzisionsmessungen zieht man die Messung der Teil-Scheinwiderstände vor, die z. B. mit der in Bild 6c gezeigten Brücke derart bestimmt werden, daß bei permutierender Anschaltung der Klemmen des Meßobjektes, seiner Gehäuseklemme und der Erde an die Meßklemmen der Brücke aus den einzelnen Meßergebnissen der Wert des Scheinwiderstandes berechnet wird.

**Die Abschirmung der allgemeinen Andersonbrücke<sup>20, 21</sup>.** Obwohl, wie erwähnt, jede Brückenschaltung auf die allgemeine Wheatstonebrücke durch die Anwendung der Stern-Dreieck-Umwandlung zurückgeführt werden kann, muß bei Vermehrung der Brückenarme auf die Anschlußpunkte der Schirme der zusätzlichen Zweige besonderes Augenmerk gelegt werden. Von Einfluß auf die Schaltung und Ausbildung der Schirme ist auch hier die Art des Scheinwiderstandes. Analog den allgemeinen Regeln für die Abschirmung der Wheatstonebrücke, wie sie unter Zuhilfenahme von Bild 6 und 7 erläutert wurden, kann auch z. B. eine Abschirmung für die allgemeine Andersonbrücke (Bild 10) durchgeführt werden. Zunächst wird jeder der Brückenarme  $AC$ ,  $BC$ ,  $AD$ ,  $BD$ ,  $BE$  und  $DE$  mit einem besonderen Schirm umgeben und wie nach Bild 6b angeschaltet. Um die Erd- und gegenseitigen Scheinwiderstände auf zwei Diagonalepunkten der Brücke, z. B. auf die Punkte  $C$  und  $E$  des Nullzweiges, zu vereinigen, wird wie in Bild 6c der Eingangskreis mit einem an  $C$  liegenden zusätzlichen Schirm umhüllt und analog, außer den einfachen Schirmen der Zweige  $DE$  und  $BE$ ,

ein zweiter Schirm der Zweige  $AD$  und  $BD$  mit dem Brückenpunkt  $E$  verbunden, womit die genannte Bedingung erfüllt ist.

**Andere Anwendungsarten der Abschirmung.** Um den Einfluß der Zusatzwiderstände zwischen bestimmten Brückenpunkten und ihren Schirmen zu verkleinern, kann, unter der Voraussetzung, daß die Schirme nicht mit einem bestimmten Brückenpunkt verbunden sind, mit Hilfe von Hilfsbrücken und Hilfszweigen, irgendein Schirm das gleiche Potential erhalten, wie der betreffende Brückenweig. Es kann dann kein Strom von dem geschirmten Brückenpunkt abfließen, wodurch eine Störung des Gleichgewichtes durch die Zusatz-Scheinwiderstände vermieden ist. Ein Beispiel dieser Schaltmöglichkeit ist die Anwendung der Schutz-elektrode für den Hochspannungskondensator bei der Scheringbrücke und die Einstellung ihres Potentials mit Hilfe eines Hilfszweiges<sup>22...24</sup>.

In umgekehrter Weise, nämlich durch Einstellung des Potentials eines Brückenpunktes mittels Hilfsbrückenweige auf das gleiche Potential wie das des Schirmes, kann dasselbe erreicht werden. Bei der von K. W. Wagner angegebenen Erdungsschaltung<sup>9</sup> und durch andere ähnliche Schaltungen<sup>11, 25</sup> wird den Anschlußklemmen des Nullzweiges an die Brücke Nullpotential erteilt, so daß keine Ströme durch die Erd-Scheinwiderstände dieser Punkte abfließen können und daher keine Störung des Brückengleichgewichtes möglich ist. — Eine genauere Beschreibung sei einer anderen Arbeit vorbehalten.

**Zusatzeinrichtungen.** Die Abschirmung der Zusatz-einrichtungen zum Betrieb von Wechselstrommeßbrücken, wie Stromquelle, Stromreiniger, evtl. Strom- und Spannungsmeßeinrichtungen, Röhrenverstärker, Röhrenvoltmeter, Telephon usw., ist unter der Voraussetzung, daß die Brücke einwandfrei geschirmt ist und geschirmte Ein- und Ausgangsübertrager besitzt, nicht unbedingt notwendig. Durch die elektrostatische Abschirmung der primären gegen die sekundäre Wicklung

dieser Übertrager werden etwa kapazitive Kopplungen zwischen einzelnen Brückenarmen und den Ein- bzw. Ausgangstromkreisen vollkommen ausgeschlossen<sup>27</sup>. Für den allgemeinen Verwendungszweck ist es nun einerseits wünschenswert, die Zusatzeinrichtungen so aufzubauen, daß keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen bei der Aufstellung der vollständigen Meßeinrichtung notwendig sind, wie größere örtliche Trennung der einzelnen Apparate, andererseits müssen auch Kopplungen zwischen den Ein- und Ausgangstromkreisen selbst vermieden werden. Würde eine derartige Kopplung bestehen, also eine zusätzliche Spannung im Nullzweig induziert werden, dann müßte durch Fälschung der Brückengleichgewichtsbedingungen eine entgegengesetzte Spannung erzeugt werden, um erstere zu kompensieren. Um dies zu verhindern, werden die einzelnen Zusatzapparate einzeln mit einem geerdeten Schirm umgeben. Ebenso werden die im allgemeinen verdrillten Zuleitungen mit einem Metallmantel versehen, der geerdet wird. Auf diese Weise ist es möglich, die störenden Kopplungen zu verhindern und richtige Meßergebnisse zu erhalten.

Die angeführten Regeln gelten auch für die innere Abschirmung der Schaltung der Zusatzeinrichtungen, z. B. für die Symmetriereinrichtung der Stromquelle für eine Vergleichsmeßbrücke für erdsymmetrische Scheinwiderstände. Im Falle der Verwendung von Röhrenverstärkern, müssen Kopplungen zwischen den einzelnen Teilen der Schaltung im gleichen Maße wie die Verstärkung verringert werden. Auch dies geschieht gewöhnlich leicht durch Einschaltung zusätzlicher geerdeter Schirme zwischen den einzelnen Schaltelementen. Der Zusammenbau aller Zusatzeinrichtungen, insbesondere der Stromquelle, mit der Brückenschaltung zu einer vollständigen Meßeinrichtung ist nicht zu empfehlen, da zwar die elektrostatische Abschirmung eine befriedigende Lösung zuläßt, dagegen stärkere magnetische Kopplungen zwischen einzelnen Spulen oder Leiterschleifen kaum zu verhindern sind.

#### Literatur.

1. G. A. Campbell, The Shielded Balance. *Electr. World* 43 (1904), S. 647...649. — 2. J. G. Ferguson, Shielding in highfrequency measurements. *J. Amer. Inst. electr. Engr.* 48 (1929), S. 517...521. — 3. A. E. Kennelly, The Equivalence of Triangles and Three-Pointed Stars in Conducting Networks. *Electr. World* 34 (1899), S. 413...414. — 4. K. Küpfmüller, Über das Nebensprechen in mehrfachen Fernsprechkabeln und seine Verminderung. *Arch. Elektrotechn.* 12 (1923), S. 160...173. — 5. K. Küpfmüller, Über einen Umwandlungssatz zur Theorie der linearen Netze. *Wiss. Veröff. Siemens-Konz.* 3 (1923...24), S. 160...169. — 6. A. Rosen, A new network theorem. *J. Inst. electr. Engr. Lond.* 62 (1924), S. 916...918. — 7. B. Hague, *Alternating Current Bridge Methods*, 3. Aufl. London 1932, S. 51...52. — 8. J. Krönert, Meßbrücken. Berechnung von Wechselstrombrücken. *ATM J* 920—1. — 9. K. W. Wagner, Zur Messung dielektrischer Verluste mit der Wechselstrombrücke. *Elektrotechn. Z.* 32 (1911), S. 1001...1002. — 10. K. W. Wagner, Die Messung der dielektrischen Ableitungen und Kapazitäten mehradriger Kabel mit Wechselstrom. *Elektrotechn. Z.* 33 (1912), S. 635...637. — 11. D. W. Dye, The "Wagner" earth connection, *Electrician* 87 (1921), S. 55...56. — 12. Tätigkeitsbericht d. Physik.-Techn. Reichsanstalt. *Elektrotechn. Z.* 45 (1924), S. 344. — 13. G. A. Campbell, Measurement of Direct Capacities, *Bell Syst. Techn. J.* (1922), S. 18. — 14. W. J. Shackleton, J. G. Ferguson, High frequency measurement of communication apparatus. *Trans. Amer. Inst. Electr. Engr.* 46 (1927), S. 519...527. — 15. Th. Walcher, Eine kombinierte Wechselstrombrücke. *Elektrotechn. u. Maschinenb.* 50 (1932), S. 518...523. — 16. W. J. Shackleton, A shielded bridge for inductive impedance measurements at speech and carrier frequencies. *J. Amer. Inst. electr. Engr.* 46 (1927), S. 159...166. — 17. J. G. Ferguson, Measurement of inductance by the shielded Owen bridge. *Bell Syst. Techn. J.* 6 (1927), S. 375...386. — 18. W. A. Ford, S. J. Reynolds, Alternating current Bridges for Measurements of Electrical Insulating Materials. *Gen. Electr. Rev.* 36 (1933), S. 99...105. — 19. E. Giebe, Präzisionsmessungen an Selbstinduktionsnormalen. *Z. f. Instr.* 31 (1911), S. 6...20, 33...52. — 20. A. Anderson, On coefficients of induction. *Phil. Mag.* (5) 31, (1891), S. 329...337. — 21. J. Krönert, Wechselstrom-Brücken vom Anderson-Typ. *ATM J* 21—1. — 22. B. G. Churcher, C. Dannat, The use of the Scheringbridge at 150 kilovolts, *World-Power*, 5 (1926), S. 238...247. — 23. J. B. Whitchrad, F. Hamburger, The influence of residual air and moisture in impregnated paper insulation. *Trans. Amer. Inst. electr. Engr.* 47 (1928), S. 314...333. — 24. H. Jenß, *Elektrotechn. Z.* 52 (1931), S. 7...8. — 25. K. Ogawa, General theory and earthing device of alternating current bridges. *Res. Electr. Lab. Ministry of Communications* (1929), No. 245, S. 1...45. — 26. J. Krönert, *Meßbrücken und Kompensatoren*, 1. Bd., S. 145...148, München 1935. — 27. Th. Walcher, Über die Verwendung von Ein- und Ausgangstransformatoren bei genauen Brückenmessungen. *Elektrotechn. u. Maschinenb.* 51 (1933), S. 397...401.