

# Vibrationsgalvanometer

## Allgemeine Eigenschaften

J

852-1

Verfasser: Dr. H. Zölllich, Berlin

DK 621.317.715.083.2

Vibrationsgalvanometer (Vg) sind, obwohl für die Messung von Wechselstrom oder Wechselspannung bestimmt, dem Bau nach Gleichstrom-Meßgeräte; aber ihre mechanische Eigenfrequenz ist auf die Frequenz der Meßgröße abgestimmt, um eine wesentliche Empfindlichkeitssteigerung durch Resonanzwirkung zu erhalten. Während bei normalen Wechselstrom-Meßgeräten die durch die Meßgröße erzeugten Richtkräfte das Maß bilden, also statisch durch eine Art Waage gemessen werden, wenn der Zeiger sich eingespielt hat, werden bei dem Vg synchrone Schwingungen erzeugt und die Schwingweite dient als Maß. Das zur Wirkung kommende physikalische Grundgesetz könnte an sich beliebig sein: Wärmeausdehnung erhitzter Leiter (aber hier stört die Schwierigkeit der Abstimmung); elektrostatische Anziehung geladener Körper (wegen der geringen Kräfte allerdings nur für beschränkte Anwendungsgebiete brauchbar) oder elektromagnetische Kraftwirkung. Die Praxis bevorzugt das letzte. Hierbei ist entweder ein Teil des Stromkreises beweglich bei feststehendem Feldmagnet (s. ATM J 852—3) oder es ist der Magnet beweglich und die Stromleiter stehen fest (s. ATM J 852—2).

**Folgen der Abstimmung auf Resonanz.** Die Schwingweite ist sehr stark frequenzabhängig. Wegen der unvermeidbaren Frequenzschwankungen der üblichen Wechselspannungsquellen werden die Vg daher fast ausschließlich nur zum Nachweis von schwachen Wechselströmen oder Wechselspannungen, also in Meßbrücken und Kompensationsschaltungen, benutzt. — Bei frequenzabhängiger Nulleinstellung ist hierbei die sehr große Unempfindlichkeit gegenüber Oberwellen von auf die Grundwelle abgestimmten Vg sehr vorteilhaft, sie ermöglicht auch die Benutzung nicht einwelliger Spannungsquellen in der Meßschaltung. — Eine weitere Folge der Abstimmung ist leichtes Ansprechen auf mechanische Erschütterungen von gleicher Frequenz, z. B. durch eine in der Nähe laufende, als Spannungsquelle der Meßschaltung dienende Maschine; man setzt daher das Vg zweckmäßig auf eine schwere Platte, die auf Luftkissen, Schwammgummi oder Stahlfedern ruht.

**Arten der Abstimmung.** Die Abstimmung erfolgt sehr selten durch Ändern der elektrischen Frequenz. Man regelt gewöhnlich die mechanische Frequenz des Vg; dies kann geschehen stufenweise durch Ändern des Trägheitsmomentes, indem man den beweglichen Teil des Meßwerkes austauscht, stetig durch Ändern des Richtvermögens. Die Richtkraft wird meist durch elastische Mittel erzeugt a) durch einseitig befestigte Zungen oder Drähte, b) durch beiderseits befestigte (gestreckte oder gebogene) einfache Blattfedern, Bänder

oder Drähte, c) durch beiderseits befestigte Bifilare. Das Richtvermögen wird dabei geändert durch Verändern der Länge des schwingenden Teiles mittels verschiebbarer Stege und durch Verändern seiner mechanischen Spannung, das von Hand geschehen kann oder elektromagnetisch, also durch Fernsteuerung. — Bei Nadel-Vg ändert man auch die Stärke des schwingenden Magneten durch Ändern eines Dauerfeldes.

**Beobachtung der Schwingweite.** Man mißt die Schwingweite manchmal unmittelbar mittels eines Mikroskopes, besonders bei zeigerartigem Meßwerk, was aber recht ermüdend ist, in der Regel jedoch mittels Schatten- oder Lichtzeiger, die vom schwingenden Teil gesteuert werden und auf eine Mattscheibe treffen. Hier (und auch im Gesichtsfeld des Mikroskopes) erscheint dann ein Licht- oder Schattenband, das bei ruhendem Meßwerk scharf begrenzt und schmal ist, bei Schwingungsbeginn unscharfe Ränder bekommt und mit zunehmender Schwingweite länger wird. — Bisweilen wird das Band stroboskopisch beobachtet, und zwar mit synchron umlaufender Blende oder unter Verwendung eines von einer synchron gespeisten Glühlampe erzeugten Lichtzeigers<sup>10</sup>.

**Charakter der Schwingung des Vg.** Um störende Erscheinungen, wie mehrfache Resonanz und damit zusammenhängende unübersichtliche Vorgänge, zu vermeiden, soll das Vg ein schwingungsfähiges mechanisches System mit einem Freiheitsgrad darstellen. Wenn auch Vg selten so kräftig gebaut sind, daß sie mit starren Drehachsen versehen werden können, die seitliche Kräfte aufzunehmen vermögen, so läßt sich bei Drehsystemen doch meist erreichen, daß die Achse der Drehbewegung ständig durch den Schwerpunkt geht und nur reine Kräftepaare auf den beweglichen Teil einwirken. Auch quer schwingende Systeme, die z. B. wie die unbelastete Saite an sich unendlich viele Freiheitsgrade haben, verhalten sich so, als besäßen sie nur einen Freiheitsgrad. — Eine weitere Bedingung, die man einzuhalten bestrebt sein muß, besteht in der Unabhängigkeit des Richtvermögens vom Ausschlag. — Sind beide Bedingungen erfüllt, so besitzt das Vg, gleichgültig, wie es sonst gebaut ist, die im folgenden zusammengestellten Eigenschaften. Die dabei angegebenen Werte sind Näherungswerte, die bei den kleinen Dämpfungen, mit denen die Vg arbeiten, ziemlich genau gelten.

### Benutzte Formelzeichen.

Dämpfungsgrad . . . . .  $\Delta$   
Gleichstrom-Empfindlichkeit . . . . .  $A_{\text{G}}$   
Wechselstrom-Empfindlichkeit bei Resonanz  $A_{\text{W}}$

ATM

Archiv für Technisches Messen

J 852-1  
November 1932

ihr Verhältnis zur Gleichstrom-Empfindlichkeit . . . . .	$A_{\sim}$
Spannungs-Empfindlichkeit bei Resonanz . . . . .	$V_{\sim}$
Oberwellen-Empfindlichkeit . . . . .	$A_n$
Eigenfrequenz des Meßwerkes . . . . .	$f$
Resonanzbreite . . . . .	$\varrho$
Ansprechzeit . . . . .	$T$
Rückwirkungsfaktor . . . . .	$h$
Galvanometerwiderstand . . . . .	$r$
Der Index $\infty$ bedeutet „für Kurzschluß“, $\infty$ „für Leerlauf“.	

**Stromempfindlichkeit.** Das Verhältnis der Wechselstrom-Empfindlichkeit für die Resonanzfrequenz zur Gleichstrom-Empfindlichkeit, im folgenden kurz als „Stromempfindlichkeits-Steigerung“ bezeichnet, ist bis auf einen Zahlenfaktor umgekehrt proportional dem Dämpfungsgrad  $\alpha$ , worunter man das Verhältnis der tatsächlichen Dämpfungskonstante zu der den aperiodischen Grenzfall herbeiführenden versteht. Mißt man statt der einfachen Schwingweite die gesamte Bildverbreiterung der Licht- oder Schattenlinie auf der Mattscheibe für eine effektiv gemessene Stromstärke und vergleicht mit der am einseitigen Ausschlag gemessenen Gleichstrom-Empfindlichkeit, so ergibt sich für die Stromempfindlichkeits-Steigerung

$$A_{\sim} = \frac{1}{\alpha} \quad (1)$$

Das entsprechende Empfindlichkeits-Verhältnis für die  $n$ te Oberwelle ist vom Dämpfungsgrad  $\alpha$  unabhängig und nimmt nahezu umgekehrt proportional mit dem Quadrat der Ordnungszahl  $n$  ab; sie hat den Wert  $2\sqrt{2}/(n^2 - 1)$ .

**Leerlauf-Eigenschaften.** Die Werte für die Wechselstrom-Empfindlichkeiten gelten allgemein, gleichgültig, wie groß der Schließungswiderstand des Vg ist und welchen Charakter er hat. Es gibt aber keine zur Eichung genügend empfindlichen Strommeßgeräte. Die Empfindlichkeiten können nur mit im Verhältnis zum Eigenwiderstand des Vg sehr großen Vorwiderständen, also im „Leerlauf“ gemessen werden; nur dann ist der tatsächlich durch das Vg fließende Strom aus der an der Gesamtanordnung liegenden Spannung einwandfrei zu berechnen. Dies gilt natürlich auch für die Werte der Stromempfindlichkeit außerhalb der Resonanzfrequenz. Diese interessieren vor allem wegen der praktisch unvermeidlichen Frequenzschwankungen der Spannungsquellen. Man benutzt als Kennzeichen für die Abhängigkeit der Stromempfindlichkeit von der Frequenz die Resonanzbreite  $\varrho$  und versteht darunter diejenige Frequenzabweichung von der Scheitelfrequenz in Hundertsteln ausgedrückt (Verstimmung), bei der die Schwingweite auf den halben Betrag des Scheitelwertes heruntergeht. Sie ist bei Leerlauf, also konstant gehaltener Stromstärke, proportional dem Dämpfungsgrad  $\alpha$  und damit umgekehrt proportional der Steigerung der Wechselstrom-Empfindlichkeit  $A_{\sim}$ , nämlich:

$$\varrho_{\infty} = \frac{1}{A_{\sim}} \quad (2)$$

Man könnte also durch Verminderung der Dämpfung bedeutende Empfindlichkeiten erreichen. Die in der

Praxis vorkommenden Frequenzschwankungen der Wechselstromquellen gestatten aber diese Möglichkeit nicht auszunutzen. Weit unter 1% dürfte die Resonanzbreite nicht liegen. Das entspricht einer Stromempfindlichkeits-Steigerung von etwa 245.

Die Ansprechzeit eines Vg ist umgekehrt proportional dem Dämpfungsgrad und damit der Resonanzbreite. Mißt man die Zeit in dem durch das Produkt von Kreisfrequenz des Meßwerkes bei fortgedachter Dämpfung mit Zeitskunden gegebenen dimensionslosen Zeitmaß<sup>4</sup>, so erhält man die Beträge  $\log \text{nat } 10/\alpha$ ,  $\log \text{nat } 50/\alpha$ ,  $\log \text{nat } 100/\alpha$ , je nach dem Schwellenwert für die Bildverbreiterung, den man zugrunde legt, d. h. je nachdem 10%, 5%, 1% gerade noch oder nicht mehr erkennbar sind. Legt man die mittlere Zahl zugrunde, so ergibt sich für die Anlauf- und Abklingzeit

$$\tau = \frac{6,7}{\varrho_{\infty}} = 2,7 A_{\sim} \quad (3)$$

Daraus ergibt sich z. B. für Wechselstrom von 50 Hz eine Ansprechzeit von 2,15 s, für Wechselstrom von 25 Hz das Doppelte.

**Kurzschluß-Eigenschaften, Spannungs-Empfindlichkeit.** In der Regel wird das Vg in einer Schaltung benutzt, deren Widerstand außerhalb der Klemmen des Vg nicht als sehr groß gegenüber dem Galvanometerwiderstand betrachtet werden kann. Das Vg stellt nun einen Motor (insbes. Schwingmotor) mit kleinsten Abmessungen dar; wie bei einem solchen entsteht zwischen den Klemmen eine rückwirkende EMK durch das Schwingen des beweglichen Teiles (sei es eines Eisenankers oder beweglichen Leiters) im Feld. Um den Einfluß der rückwirkenden EMK, die eine Minderung der Stromstärke im Vg hervorruft, zu trennen von den Einflüssen im Schließungskreis enthaltener Induktanzen oder Kapazitäten, die bei Frequenzabweichungen auch stromändernd wirken, schließt man das Vg über Ohmsche Widerstände. Man bevorzugt als Kurzschluß wirkende Widerstände, da dann der Einfluß der rückwirkenden EMK am stärksten ist.

Das Verhalten des Vg in diesem Kurzschlußfall kann aus dem Verhalten für Leerlauf geschlossen werden, wenn an Stelle des Dämpfungsgrades  $\alpha$  ein Dämpfungsgrad  $\alpha h_0$  gesetzt wird, wo  $h_0$  den Rückwirkungsfaktor für Kurzschluß bezeichnet und immer größer als eins ist. Denn zu der mechanischen Dämpfung (Luftdämpfung + elastische Hysterese + Wirbelstromdämpfung in Metallmassen oder besonderer Kurzschlußspule am beweglichen Teil) kommt die elektromagnetische Dämpfung hinzu, deren Größe bei Kurzschluß durch den Galvanometerwiderstand  $r$  gegeben ist. Alles übrige bleibt. Man kann den Wert von  $h_0$  finden als Verhältnis der Resonanzbreiten für Kurzschluß und Leerlauf oder als Verhältnis der Spannungsempfindlichkeits-Steigerungen für Leerlauf und Kurzschluß. Der Betrag, um den er größer als eins ist, wird gegeben durch das Verhältnis vom Quadrat der dynamischen Galvanometerkonstante zu dem Produkt von mechanischer Dämpfung mit Galvanometerwiderstand  $r$ . Hierbei bedeutet die dynamische Galvanometerkonstante das Drehmoment, das der Strom 1 erzeugt.  $r$  ist als praktisch selbstinduktionsfrei zu betrachten, fast immer beim Spulengalvanometer und häufig beim Nadel-

galvanometer ohne Eisenschluß der Wechselstromspule. Sonst kann die Selbstinduktion überwiegen. Dann verhält sich das Vg im Kurzschlußfalle so, als wäre es über eine widerstandslose Selbstinduktion geschlossen und zeigt deshalb ein abnormales Verhalten.

In Bild 1 sind Resonanzkurven für zwei Fälle dargestellt und zwar für Leerlauf, also konstantgehaltene Stromstärke, und für Kurzschluß mit konstanterhaltener

mittelbar messen. Es ist daher üblich geworden, dafür die Wechselstrom-Empfindlichkeit  $A_{\sim}$ , Wechselspannungs-Empfindlichkeit  $V_{\sim}$  und den Galvanometer-Widerstand  $r$  anzugeben. Diese fünf Größen zusammen

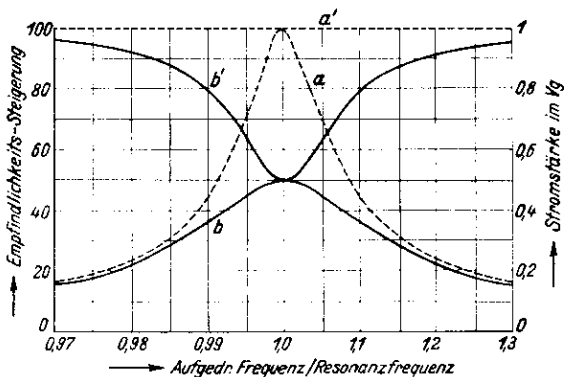


Bild 1. Resonanzkurven für konstanten Strom im Vg (a) und konstante Spannung am kurzgeschlossenen Vg (b) zusammen mit den zugehörigen Stromkurven (a' und b') bei Dämpfungsgrad  $\alpha = 0,5\%$  (entsprechend Resonanzbreite von etwa 0,87%) und Rückwirkungsfaktor  $h_0 = 2$ .

Klemmenspannung an einem gegenüber dem Galvanometerwiderstand verschwindend kleinen Schließungswiderstand. Es ist dabei der Rückwirkungsfaktor  $h_0 = 2$  zugrunde gelegt. Ferner ist angenommen, daß das Vg eine gegenüber dem Ohmschen Widerstand verschwindende Selbstinduktion besitzt.

Die Resonanzkurve bei Kurzschluß ist erheblich stumpfer als bei Leerlauf, und zwar ist die Resonanzbreite wegen  $h_0 = 2$  doppelt so groß. Die Stromempfindlichkeit bleibt selbstverständlich ungeändert. Die Abstumpfung der Resonanzkurve bei Kurzschluß kommt also durch eine von beiden Seiten nach dem Resonanzpunkt hin zunehmende Verminderung der Stromstärke im Vg zustande.

Im Bild 1 zeigt die obere ausgezogene Kurve den Strom durch das Vg, er eilt unter der Resonanzfrequenz nach, über ihr vor. Das Vg hat also scheinbar einen Widerstand, der unter der Resonanzfrequenz induktiv, darüber kapazitiv ist. Bei Resonanzfrequenz ist er ohmisch und gleich dem doppelten Betrag des Gleichstromwiderstandes. Bei der bekannten Darstellung auf der komplexen Zahlenebene ergibt der Widerstand des schwingenden Vg, der Betriebswiderstand, einen Kreis.

Für andere Werte von  $h_0$  ergeben sich andere Scheitelhöhen der Resonanzkurven bei Kurzschluß, vgl. Bild 2. Die Spannungsempfindlichkeit nimmt ab bei  $h_0 > 2$ ; d.h. eine zu starke Rückwirkung ist ungünstig, trotzdem die Empfindlichkeit für Gleich- und Wechselstrom mit ihr steigt. Der Versuch zeigt Übereinstimmung<sup>11</sup> mit dem aus den Formeln entwickelten Bild 2.

**Zusammenstellung der kennzeichnenden Merkmale des Vg.** Zur Beschreibung des Verhaltens eines Vg in den beiden Grenzfällen des Leerlaufes und Kurzschlusses reichen, wie sich aus dem obigen ergibt, die vier Größen aus: die Eigenfrequenz  $f$ , die Gleichstrom-Empfindlichkeit  $A_{\sim}$ , der Dämpfungsgrad bei Leerlauf und der Dämpfungsgrad bei Kurzschluß (oder der Rückwirkungs-faktor). Die beiden letzten Werte lassen sich nicht un-

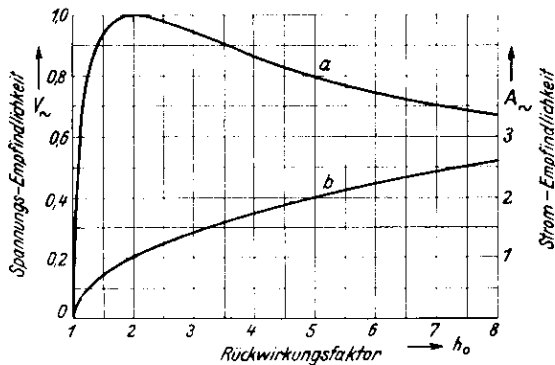


Bild 2. Wechselspannungs-Empfindlichkeit (a) und Wechselstrom-Empfindlichkeit (b), beide in willkürlichen Einheiten, als Funktion des Rückwirkungs-faktors  $h_0$ .

kennzeichnen das Vg mit einem Freiheitsgrad und konstantem Richtvermögen vollständig. Man kann aus ihnen die Resonanzbreiten bei Leerlauf und Kurzschluß, die Empfindlichkeit für die  $n$ te Oberwelle und die Ansprechzeiten bei Leerlauf und Kurzschluß bestimmen. Der Vergleich mit direkt gemessenen Werten ist eine gute Kontrolle vor allem der Messung der Stromempfindlichkeit, die besondere Vorsichtsmaßnahmen gegen Fälschung durch Lade- und Leckströme erfordert; er ist aber auch ein Prüfstein des Zutreffens der Voraussetzungen.

Der Zusammenhang ist in der folgenden Übersicht dargestellt:

Rückwirkungs-faktor . . . . .	$h_0 = \frac{A_{\sim}}{r V_{\sim}}$
Resonanzbreite bei Leerlauf . . . . .	$\varrho_{\infty} = \frac{2,45 A_{\sim}}{A_{\sim}}$
bei Kurzschluß . . . . .	$\varrho_0 = \frac{2,45 A_{\sim}}{r V_{\sim}}$
Oberwellen-Empfindlichkeit . . . . .	$A_n = \frac{2,8 A_{\sim}}{n^2 - 1}$
Ansprechzeit (Schwelle 5%)	
bei Leerlauf . . . . .	$T_{\infty} = \frac{0,43 A_{\sim}}{f A_{\sim}}$
bei Kurzschluß . . . . .	$T_0 = \frac{0,43 r V_{\sim}}{f A_{\sim}}$

**Das Vg mit Blindwiderständen im Stromkreis.** Wenn der Schließungswiderstand des Vg wenigstens angenähert als selbstinduktions- und kapazitätsfrei aufgefaßt werden kann, so läßt sich das Verhalten des Vg in der Schaltung aus dem Verhalten für die Grenzfälle des Leerlaufes und Kurzschlusses abschätzen. Hierbei ist zu beachten, daß der Rückwirkungs-faktor  $h_0 = 2$  der günstigste Wert für den Kurzschluß selbst ist, daß also bei mittleren Werten für den Schließungswiderstand ein etwas kleinerer Wert für  $h$  vorzuziehen wäre.

Enthält jedoch der Schließungswiderstand Blindwiderstände oder ist im Vg selbst ein nicht zu vernachlässigender unkomensierter Blindwiderstand enthalten, so ist das Verhalten des Vg weniger durchsichtig. Zwar bleibt seine Stromempfindlichkeit ungeändert, aber der Strom durch das Vg ändert sich in eigentümlich verwickelter Weise, zumal dessen Betriebs-

widerstand von dem Schließungswiderstand abhängt. Im Ausdruck für die Schwingweite<sup>11,7</sup> spielen eine Rolle die Frequenz des Wechselstromes, der Rückwirkungsfaktor, die dynamische Galvanometerkonstante und die beiden (von der Frequenz abhängigen) Zeitkonstanten für die elektrischen und mechanischen Schwingungen. Diese Zeitkonstanten sind ohne Änderung der Formel miteinander vertauschbar.

Man kann sich zwei Aufgaben stellen:

a) Untersuchung der Abhängigkeit der Schwingweite von der elektrischen Frequenz. Sind sowohl Selbstinduktion wie Kapazität im Schließungskreis vorhanden, und zwar in solchen Beträgen, daß die elektrische Resonanzfrequenz mit der aufgedrückten übereinstimmt, dann erhält man bei Abstimmung des  $V_g$  auf dieselbe Frequenz eine sehr große Schwingweite im Resonanzpunkt, aber auch eine übermäßig scharfe Resonanzkurve. Verschiebt man jedoch die beiden Resonanzmaxima für Strom und Schwingweite gegeneinander, so erhält man eine Abflachung der die Schwingweite darstellenden Resonanzkurve, so daß die Frequenz der aufgedrückten Wechselspannung etwa zwischen den beiden entsprechenden Frequenzen schwanken kann, ohne daß die Schwingweite, d. h. die Spannungsempfindlichkeit, sich ändert<sup>6</sup>. — Besitzt der Schließungswiderstand im wesentlichen nur Selbstinduktion oder Kapazität, so ändert sich der Strom durch das  $V_g$  in ganz eigenartiger Weise mit der Frequenz, und zwar mit dem Erfolg, daß der Scheitelwert der Schwingweite gegen die Resonanzfrequenz des  $V_g$  verschoben ist, bei überwiegender Selbstinduktion liegt die Frequenz für größte Schwingweite oberhalb der Resonanzfrequenz, bei Kapazität liegt sie darunter. — Bemerkenswert ist auch das Verhalten bei Anwesenheit von kleinen Kapazitäten im Schließungskreis. Dann wird die Empfindlichkeit unabhängig von der Frequenz, wenn das  $V_g$  auf diese Frequenz abgestimmt ist, während sie sonst umgekehrt proportional mit dem Quadrat der Frequenz abnimmt. Man macht davon Gebrauch bei Messen der Oberwellen einer Wechselstromkurve mittels des  $V_g^5$  (s. ATM V 3621).

b) Lösung der Frage, wie die Größen, über die man verfügen kann, eingestellt werden müssen, um größte Schwingweite bei gegebener Frequenz zu erhalten. Das interessiert in erster Linie bei dem Entwurf eines  $V_g$ ; der Gebraucher ändert nur das Richtvermögen, obwohl auch die Möglichkeit bestände, durch vorgeschaltete Blindwiderstände abzustimmen. Auf die Möglichkeit, für vorliegende Fälle weniger passende  $V_g$  durch vorgeschaltete Wandler mit abgestimmtem Übersetzungsverhältnis brauchbar zu machen, sei noch hingewiesen<sup>1</sup>.

Größte Schwingweite erhält man, wenn die im  $V_g$  erzeugte rückwirkende EMK gleich der Hälfte der auf-

gedrückten und ihr entgegengesetzt gerichtet ist. Dies ist die auch sonst geltende Bedingung für maximale Leistungsentnahme. Man kann diese Bedingung auch in die beiden folgenden zerlegen:

1. Die elektrische Zeitkonstante (des Stromkreises) muß dem Betrage nach gleich der mechanischen Zeitkonstante des  $V_g$  sein, jedoch mit anderem Vorzeichen.

2. Bei dem  $V_g$  muß die mechanische Dämpfung gleich der elektrischen sein.

**Das  $V_g$  bei plötzlichen Strom- und Spannungsänderungen.** Das bisher beschriebene Verhalten bezog sich auf den eingeschwingenen Zustand. Wird das  $V_g$  plötzlich eingeschaltet oder im Meßkreis die Stufe eines Wechselstromwiderstandes zu- oder abgeschaltet, so zeigen sich Übergangserscheinungen. Diese bestehen nicht in langsamem Aufschaukeln oder Abklingen, sondern in gedämpften Schwebungen, wenn die Wechselstromfrequenz nicht mit der Eigenfrequenz des  $V_g$  übereinstimmt<sup>11</sup>. Da diese das Abgleichen stören, darf ein  $V_g$  nicht etwa durch Verstimmen unempfindlich gemacht werden.

**Fehlerhafter Bau des  $V_g$ .** Ist das bewegliche System schlecht aufgehängt, so daß der Schwerpunkt nicht in der Drehachse liegt, so besitzt das System nicht mehr nur einen Freiheitsgrad. Außer den Drehschwingungen kommen seitliche Ausschläge zustande. Ihre Resonanzfrequenzen können so dicht nebeneinander liegen, daß störende Erscheinungen auftreten. Die Resonanzkurve hat nicht mehr den in Bild 1 dargestellten Verlauf, sondern weist in der Regel zwei Gipfel auf mit einer außerordentlich geringen Stromempfindlichkeit in dem Tal dazwischen<sup>9</sup>. Unter Umständen hat die Resonanzkurve ein noch merkwürdigeres Bild. Es zeigen sich zwei Stellen abnormer Unempfindlichkeit<sup>11</sup>. — Es ist daher sorgfältige Arbeit beim Zusammenbau des  $V_g$  dringend erforderlich.

Auch wenn die Bedingung einer linearen Abhängigkeit des Drehmomentes vom Ausschlag (konstantes Richtvermögen) nicht erfüllt ist, treten Störungen auf<sup>8</sup>. Nur bei ganz kleinen Schwingweiten, bei denen man also noch von Proportionalität des Drehmomentes sprechen kann, zeigt sich die normale Resonanzkurve, mit steigenden Weiten wird sie schief, und zwar zeigt sie bei dem aufsteigenden Ast eine kleinere Resonanzbreite als bei dem abfallenden. Geht man zu noch größeren Schwingweiten über, so zeigen sich labile Vorgänge ähnlich wie Zieherscheinungen; die Resonanzkurve überschlägt sich wie eine Brandungswelle. Teile von ihr sind auf dem gewöhnlichen Wege nicht aufzunehmen, da die Schwingweite plötzlich zu größeren oder kleineren Werten springt. Demnach muß man auch proportionalen Skalenverlauf anstreben.

#### Literatur.

1. Fr. Wenner, Bull. Bur. Stand. (6) 1909, S. 347...378. — 2. S. Butterworth, Proc. Physic. Soc. Lond. (24) 1911/12, S. 75...92. — 3. Fr. Wenner, Trans. Amer. Inst. Electr. Engr. (31) 1912, S. 1243...1254 oder Proc. Amer. Inst. Electr. Engr. (31) 1912, S. 1073...1084. — 4. H. Zölllich, Veröff. Siemens-Konz. (2) 1922, S. 378...400. — 5. A. Blondel, Ann. Physique (10) 1918, S. 195...354. — 6. W. Meißner und U. Adelsberger, Z. techn. Physik (11) 1930, S. 102...107, 143...147; (13) 1932, S. 475...477.

7. Zusammenfassende Darstellungen: H. Schering, Schwingungsinstrumente in: H. Geiger u. K. Scheel, Handbuch der Physik (16), Berlin 1927, S. 304...322; B. Hague, Alternating Current Bridge Methods<sup>2</sup>, London 1930, S. 171...201; A. E. Kennelly, Electrical vibration instruments, New York 1930, S. 265...286. — 8. E. V. Appleton, Philos. Mag. (6) (47) 1924, S. 609...619. — 9. R. L. Jones, Proc. Physic. Soc. Lond. (35) 1922/23, S. 67...80. — 10. J. B. Saunders, J. opt. Soc. Amer. (17) 1928, S. 326...327. — 11. H. Zölllich, Arch. Elektrotechn. (3) 1915, S. 369...383.