

Normalelemente

A. Verwendungszweck

Die Gebrauchsnormale für Gleichstrommessungen sind die Normalwiderstand und das Normalelement. Dieses liefert eine genau definierte EMK, welche zur genauesten Messung von Spannungen und Strömen durch Vergleichs- und Kompensationsverfahren verwendet werden kann. Es ist damit ein wichtiger Bestandteil der Kompensatoren und der Kompensationschreiber.

B. Anforderungen und allgemeine Eigenschaften

Die hauptsächlichsten Anforderungen an ein Normalelement sind:

- a) Geringe Herstellungstoleranz der EMK,
- b) große zeitliche Konstanz der EMK,
- c) geringe Temperaturabhängigkeit der EMK.

Für seine Herstellung müssen daher solche Materialien verwendet werden, die

1. in einer derart großen Reinheit technisch darstellbar sind, daß die Herstellungstoleranz für die EMK genügend klein wird, und
2. sich während der Ruhezeit des Elements auch über längere Zeit nicht im geringsten chemisch verändern.

Die Normalelemente sind nicht zur Entnahme größerer Ströme bestimmt, sondern sie weisen nur dann die angegebene EMK auf, wenn ein bestimmter Maximalwert des Stromes nicht überschritten wird. Andernfalls ändert sich die EMK infolge von Polarisationserscheinungen; sie geht (jedoch nach einer gewissen Ruhezeit auf den Normalwert zurück. Die Normalelemente können daher nur in Kompensationsaltungen verwendet werden, wo ihnen kein merklicher Strom entnommen wird.

C. Das Weston-Normalelement

Als Spannungs-Gebrauchsnormalelement wurde international das Weston-Element festgelegt (London 1908, Washington 1910).

$$EMK \text{ bei } t = 20^\circ \text{C} = 1,01830 \text{ V}$$

1. Aufbau des Elements

Äußere Form: Meist Glasgefäß in H-Form (nach Rayleigh), luftdicht verschlossen und in Metallgehäuse montiert, siehe Bild 1.

Positive Elektrode: Quecksilber (Hg), darüber als Depolarisator Quecksilberoxydulsulfat (Hg_2SO_4).

Negative Elektrode: Kadmiumamalgam, 10...13 Gewichts-% Cd, 90...87 Gewichts-% Hg.

Elektrolyt: Gesättigte Kadmiumsulfatlösung ($\text{CdSO}_4 + 8/3 \text{H}_2\text{O}$) mit ungelöstem Kristallüberschuß.

Zur Stromabnahme dienen Platindrähte, die in das Quecksilber hineingehen. Auf größte Reinheit aller verwendeten Chemikalien ist zu achten! Bei technischen Ausführungen wird durch fest gelagerte Porzellanstücke mit dazwischenliegenden Glaswollschichten ein Vermischen der einzelnen Bestandteile verhindert.

Tabelle 1 EMK = f(t) des Weston-Normalelements

Temperatur °C	EMK V	Temperatur °C	EMK V
5	1,01870	18	1,01838
10	1,01860	19	1,01834
11	1,01858	20	1,01830
12	1,01856	21	1,01826
13	1,01853	22	1,01822
14	1,01851	23	1,01817
15	1,01848	24	1,01812
16	1,01845	25	1,01807
17	1,01841		

2. Eigenschaften des Weston-Normalelements

a) **Temperaturabhängigkeit:** Das Element soll nur im Temperaturbereich von $+4...+40^\circ \text{C}$ benutzt werden. Einseitige Erwärmung ist zu vermeiden. Formel für die Temperaturabhängigkeit der EMK zwischen $t = 4...+40^\circ \text{C}$
 $EMK_t = 1,01830 - 0,0000406(t - 20) - 0,00000095(t - 20)^2 + 0,0000001(t - 20)^3$
 Daraus ergibt sich ein mittlerer negativer Temperaturkoeffizient von ca. 0,004 % pro Grad Celsius Temperaturänderung.

b) **Maximale Stromentnahme:**
 10^{-4} A

c) **Zeitliche Konstanz:** Änderung der EMK höchstens 0,01 % während mehrerer Jahre

d) **Herstellungstoleranz:**
 fältiger Herstellung
 Etwa 0,001 % der EMK bei sorg-

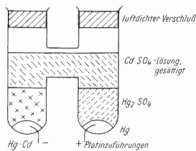


Bild 1. Prinzipieller Aufbau des Weston-Normalelements

D. Das Weston-Normalelement II

Außer dem international anerkannten Normalelement gibt es eine zweite Type, die einen verhältnismäßig geringen Temperaturkoeffizienten aufweist, aber nicht so genau reproduzierbar ist wie das unter C. beschriebene. Es unterscheidet sich von diesem dadurch, daß der Elektrolyt bei $+4^\circ \text{C}$ gesättigt ist, also nicht so hohe Konzentration aufweist. Innenwiderstand ca. 100 Ohm.

$$EMK = 1,01865 \text{ Volt über die normale Temperaturskala}$$

E. Das Clark-Normalelement

Es wird heute wenig verwendet, da es einen relativ hohen Temperaturkoeffizienten hat.

$$EMK \text{ bei } t = 20^\circ \text{C} = 1,4263$$

1. Aufbau des Elements

Äußere Form: Glasgefäß in H-Form wie Bild 1 oder Gefäß mit Tonzelle zur Trennung von Elektrolyt und Depolarisator (nach Feussner).

Positive Elektrode: Quecksilber (Hg)

Depolarisator: Hg_2SO_4

Negative Elektrode: Zinkamalgam 90 Gewichtsteile Hg, 10 Gewichtsteile Zn oder amalgamiertes Zink

Elektrolyt: Zinksulfatlösung ($\text{ZnSO}_4 + 7 \text{H}_2\text{O}$)

2. Eigenschaften

a) **Temperaturabhängigkeit der EMK** zwischen 0 und 30°C

$$EMK_t = 1,4324 - 0,00119(t - 15) - 0,000007(t - 15)^2 \text{ V}$$

Für je ein Grad Temperaturerhöhung nimmt die EMK um 0,06 bis 0,08 % ab.

b) **maximale Stromentnahme:** ca. $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ A}$

Tabelle 2 EMK = f(t) des Clark-Normalelements

Temperatur °C	EMK V	Temperatur °C	EMK V
0	1,4487	17	1,4300
5	1,4436	18	1,4288
10	1,4382	19	1,4275
15	1,4324	20	1,4263
16	1,4312	25	1,4198

F. Meßverfahren mit Normalelementen

Sämtliche Verfahren zur Messung von Spannungen, Strömen und Widerständen mit Hilfe von Normalelementen beruhen auf dem Vergleich der zu messenden Spannung mit der genau bekannten Spannung des Normalelementes. Als weitere Hilfsmittel sind notwendig: Ein Präzisions-Normalwiderstand und ein empfindliches Galvanometer. Da den Normal-Elementen kein nennenswerter Strom entnommen werden darf, kommen für diesen Spannungsvergleich nur Kompensationsverfahren in Betracht.

1. Grundsätzliches Meßverfahren, siehe Bild 2

Die zu messende Spannung U_X liegt an einem geeichten Präzisions-Spannungsteiler R_{AC} (Schleifdraht), durch den der Strom $I = \frac{U_X}{R_{AC}}$

fließt. Die Normalspannung U_N (Normalelement) liegt an einem Teil (AB) des Widerstandes mit entgegengesetzter Polung. Der Punkt B (Schleifer) wird nun so lange verschoben, bis die Spannung $I \cdot R_{AB} = U_N$ ist. Das Galvanometer G zeigt in diesem Falle keinen Strom an. Die gesuchte Spannung U_X errechnet sich aus den Teilwiderständen und der Normalspannung wie folgt:

$$U_X = I \cdot R_{AC}; U_N = I \cdot R_{AB}; \frac{U_X}{U_N} = \frac{I R_{AC}}{I R_{AB}} = \frac{R_{AC}}{R_{AB}}; U_X = U_N \frac{R_{AC}}{R_{AB}}$$

Die Nachteile dieses Verfahrens sind:

Die zu messende Spannung U_X ist belastet, da sie gleichzeitig zur Speisung der Anordnung dient. Es können also nur Klemmenspannungen, nicht die EMK gemessen werden.

Spannungen unter 1,1 V sind nicht meßbar.

Die Zuleitungen von U_X zum Widerstand können Fehler verursachen.

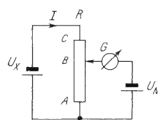
2. Verbessertes Meßverfahren, siehe Bild 3

Der Präzisionswiderstand R_{AD} wird von einer besonderen Hilfsstromquelle U_H gespeist. Der durch ihn fließende Hilfsstrom I_H läßt sich durch einen Vorwiderstand R_H regeln und mit dem Amperemeter Am überwachen. Jetzt liegen sowohl das Normalelement U_N als auch die zu messende Spannung U_X in je einem Kompensationskreis, werden also bei Abgleich der Anordnung strömmäßig nicht belastet. Das Galvanometer G läßt sich wahlweise in den einen oder anderen Kreis legen. B und C werden so gewählt, daß beide Kreise stromlos sind. Die gesuchte Spannung errechnet sich dann aus der Normalspannung U_N und den Teilwiderständen wie folgt:

Durch die Teilwiderstände R_{AB} und R_{CD} fließt der gleiche Strom, nämlich I_H . Folglich müssen sich auch die Spannungen $U_{AB} (= U_N)$ und $U_{CD} (= U_X)$ an ihnen wie die Widerstände R_{AB} und R_{CD} verhalten. Es ist also:

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{R_{CD}}{R_{AB}}$$

$$U_X = U_N \frac{R_{CD}}{R_{AB}}$$



Oben: Bild 2. Grundschialtung der Gleichstrom-Kompensation

Rechts: Bild 3. Verbesserte Schaltung zur Gleichstrom-Kompensation

Ein wichtiges Erfordernis und gewisser Nachteil der Schaltung ist, daß der Hilfsstrom I_H während des ganzen Meßvorgangs unbedingt konstant gehalten werden muß. Bei dieser verbesserten Schaltung gehen die Zuleitungen jedoch nicht mehr in das Meßresultat ein, und die zu messende Spannung ist unbelastet, wie auch das Normalelement.

3. Kompensationsapparate (Kompensatoren)

Im einfachsten Falle verwendet man für die eben besprochenen Präzisionswiderstände geeichte Schleifdrähte. Hierdurch ergeben sich aber mehr oder weniger große Fehler, z. B. durch die Nullpunkt-Ungenauigkeit, ungleichmäßige Abnutzung des Drahtes, ungenaue Kalibrierung. Um diese Fehler zu umgehen, verwendet man für höchste Genauigkeit Präzisionswiderstands-Dekaden. An sie sind folgende spezielle Anforderungen zu stellen:

Der Abgleich der Kompensationskreise darf den Gesamtwiderstand nicht beeinflussen, da ja durch ihn der konstant zu haltende Hilfsstrom bestimmt ist. Ferner genügend feine Regelbarkeit der Stufen.

Diese Anforderungen lassen sich durch verschiedene Konstruktionsformen erfüllen. In den Kompensatoren, die zur genauen Nachprüfung von Präzisions-Meßinstrumenten dienen, sind solche Präzisionswiderstände mit Normalelement und Galvanometer zusammengebaut. Als Beispiel soll der

a) Kompensator nach Feussner

genauer erläutert werden, siehe Bild 4. Der Widerstandsatz R_1, R_2, R_3, R_4 wird hier ebenfalls von einer Hilfsstromquelle U_H über einen einstellbaren Vorwiderstand R_H gespeist. Die zu messende Spannung U_X und die Normalspannung U_N werden an dem gleichen Widerstand R_{AB} kompensiert, das Galvanometer G läßt sich entsprechend umschalten. Der Kompensationswiderstand besteht aus einem stufenweise einstellbaren Dekadenwiderstand. Durch die Einstellung der Abbriffe an R_1 und R_3 ändert sich am Gesamtwiderstand und damit am Hilfsstrom I_H nichts; wohl aber wird er sich bei Verstellung von R_2 ändern. Nun ist dieser Widerstand mit einem genau gleichen Widerstand R_4 derart gekuppelt, daß der eine immer um genau den Widerstandsbetrag zunimmt, um den der andere abnimmt und umgekehrt. R_4 ist als Vorwiderstand geschaltet, und auf diese Weise bleibt der Gesamtwiderstand und damit I_H immer konstant.

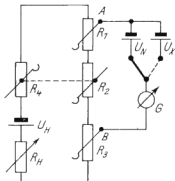


Bild 4. Grundschialtung des Feussner-Kompensators

Meßvorgang: Das auf U_X geschaltete Galvanometer zeigt keinen Ausschlag, wenn der Spannungsbetrag

$$I_H \cdot R_{AB} = U_X$$

ist. Der Wert R_{AB} läßt sich am Dekaden-Kurbelwiderstand bequem ablesen. Die Messung wird besonders einfach, wenn I_H genau Werte hat, z. B. 10^{-4} A. Dieser Wert muß vor der Messung genau eingestellt werden, dazu dient die Normalspannung U_N des Normalelementes. Das Galvanometer wird auf U_N geschaltet, der Dekadenwiderstand auf $U_N \cdot 10^4$ Ohm eingestellt und I_H mit R_H solange verändert, bis G keinen Ausschlag mehr zeigt. I_H beträgt dann 10^{-4} A. Nach der Messung ist I_H auf die gleiche Weise zu kontrollieren.

Eine Verbesserung der Schaltung ergibt sich, wenn zur Einstellung von I_H ein getrennter Widerstand von der Größe $U_H \cdot 10^4$ Ohm verwendet wird, der mit dem Kompensationswiderstand in Reihe liegt. Die Kompensation von U_X und U_N erfolgt dann auf zwei voneinander unabhängigen Widerständen.

b) Andere Kompensatoren

Raps-Kompensator

Meßdaten ähnlich denen des Feussner-Kompensators, jedoch Vermeidung der vielen Schalkkontakte durch eine Widerstands-Kunstschaltung.

Dieselhorst-Kompensator

Kompensationswiderstand niederohmig. Völlige Vermeidung von Kontakten im Kompensationswiderstand, sämtliche Kurbelkontakte liegen im Hilfsstromkreis. Dadurch auch Messung sehr kleiner Spannung möglich, wobei sonst die Thermo-EMK der Kontaktstellen stören würde.

Technischer Kompensator

Der Hilfsstrom wird durch ein Präzisionsamperemeter mit unterdrücktem Nullpunkt eingestellt, so daß das schwierig zu behandelnde Normalelement entbehrlich werden kann. Einfache Bedienung, betriebssicher, jedoch nicht so genau wie die Präzisionskompensatoren.

c) Verwendung und Daten der Kompensatoren

Feussner-Kompensator und Raps-Kompensator, hochohmig

Meßbereich: $10^{-1} \dots 1100$ V

Genauigkeit: ca. $\pm 0,05\%$ vom Sollwert

Anwendung: Eichung von Präzisionsmeßgeräten, genaue Strom- und Widerstandsmessung.

Dieselhorst-Kompensator, niederohmig

Meßbereich: $10^{-4} \dots 1,0$ V

Genauigkeit: ca. $\pm 0,05\%$ vom Sollwert

Anwendung: Messung sehr kleiner Widerstände und Ströme, Messung der EMK von Thermoelementen, Widerstandsthermometer.

Technischer Kompensator

Meßbereiche: $0,22$ mV, $0,110$ mV, $0,1100$ mV

Genauigkeit: ca. $\pm 0,3\%$ vom Sollwert

Anwendung: Eichung von Instrumenten, Prüfung von Thermoelementen.

Literatur

Näheres über Kompensatoren: Lehrbücher der Feinwerktechnik, Band 2, Schwerdfeger: Elektrische Meßtechnik 1, Ferner: Elektrische und wärmetechnische Messungen, Hartmann & Braun, Frankfurt.