

1 Elektromechanische Messwerke

Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes wurde bereits in der Frühzeit der Elektrotechnik zur Messung der Stärke des Stromes mittels elektromechanischer Messwerke angewendet. Das gemeinsame Prinzip dieser Messwerke ist die Kraftwirkung zwischen magnetischen Feldern. Je nach Art der Quellen der magnetischen Felder gibt es verschiedene Bauprinzipien mit unterschiedlichen Eigenschaften. Die Messwerke zeigen direkt die Stromstärke an. Von allen Varianten werden nur mehr das Drehspul- und das Dreheisenmesswerk besprochen, da sie noch erhältlich sind. Alle anderen sind fast vollständig durch moderne Digitalmessgeräte ersetzt.

2 Drehspulmesswerk

Prinzip:

Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter mit der wirksamen Länge l in einem Magnetfeld der Flussdichte B , so entsteht eine Kraft F auf den Leiter. Die Stromrichtung und die Richtung der Flussdichte müssen dabei aufeinander senkrecht stehen. Führt man den Leiter in Form einer drehbar gelagerten Spule mit N Windungen aus, lässt sich die Kraft vervielfachen. Mit dem Spulendurchmesser entsteht das elektromagnetische Drehmoment M_{el} das dem Strom I direkt proportional ist:

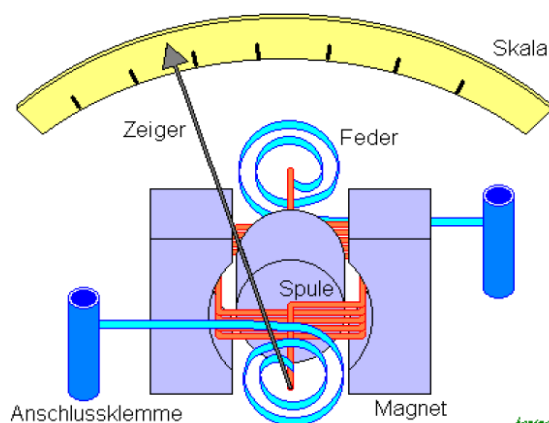
$$M_{el} = (BNld) \cdot I = k_m \cdot I$$

Drehfedern verhindern einerseits dass sich die Spule durchdrehen kann, andererseits bauen sie ein Gegendrehmoment M_F auf, das mit der Drehfederkonstante k_F dem Drehwinkel α proportional ist:

$$M_F = k_F \cdot \alpha$$

Es stellt sich eine Gleichgewichtsposition ein, wenn das mechanische und das elektromagnetische Drehmoment gleich sind. Es folgt mit einem Proportionalitätsfaktor p :

$$M_{el} = M_F \rightarrow \alpha = p \cdot I$$



Symbol



Die Spule ist mit einem Zeiger verbunden, der auf einer Skala die Stellung der Spule anzeigt. Durch eine Wirbelstromdämpfung wird das Pendeln des Zeigers bei der Einstellung auf einen Messwert

verhindert. Durch Wahl der Parameter B, N und l können sehr empfindliche Messwerke gebaut werden, die bis μA anzeigen können.

Das Messwerk besitzt folgende Eigenschaften:

- lineare Skala

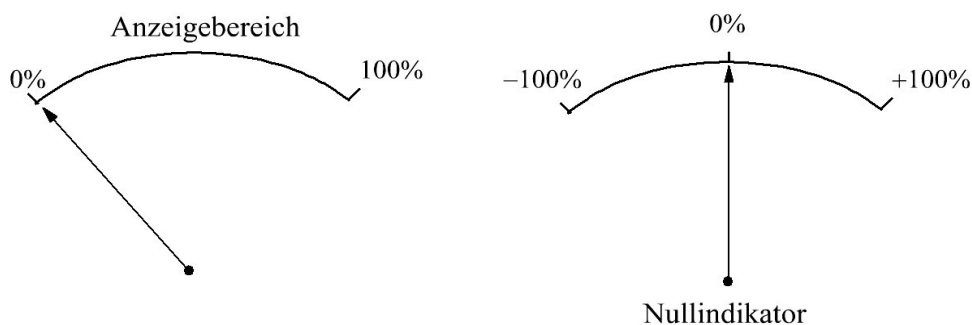
- stromrichtungsabhängig, daher nur für DC

- sehr empfindliche Messwerke realisierbar

- bei AC wird der arithmetische Mittelwert angezeigt

- Wird bei AC ein Gleichrichter verwendet, wird der Gleichrichtwert angezeigt.

Der Zeiger kann in Ruhestellung am linken Rand oder in der Mitte positioniert sein. Der Anzeigebereich entspricht dem Messbereich.



3 Dreheisenmesswerk

Prinzip:

In einer feststehenden Spule mit N Windungen erzeugt ein Strom I ein Magnetfeld der Flussdichte B. In der Spule befinden sich ein feststehendes und ein drehbar gelagertes Weicheisenplättchen. Diese Plättchen werden im Magnetfeld selbst magnetisiert, so dass sie eine Kraft F aufeinander ausüben. Es entsteht ein elektromagnetisches Drehmoment M_{el} das dem Quadrat der Flussdichte B und damit dem Quadrat des Stromes I direkt proportional ist:

$$M_{el} = k_m \cdot I^2$$

Drehfedern verhindern einerseits dass sich die Spule durchdrehen kann, andererseits bauen sie ein Gegendrehmoment M_F auf, das mit der Drehfederkonstante k_F dem Drehwinkel α proportional ist:

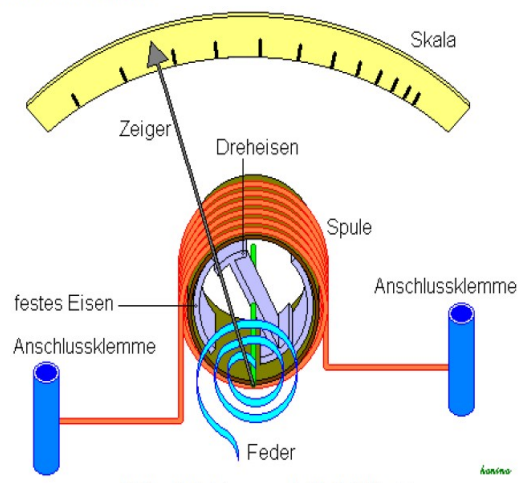
$$M_F = k_F \cdot \alpha$$

Es stellt sich eine Gleichgewichtsposition ein, wenn das mechanische und das elektromagnetische Drehmoment gleich sind. Es folgt mit einem Proportionalitätsfaktor p:

$$M_{el} = M_F \rightarrow \alpha = p \cdot I^2$$

Die Spule ist mit einem Zeiger verbunden, der auf einer Skala die Stellung der Spule anzeigt. Die feststehende Spule ermöglicht eine einfache Stromzufuhr und die Verwendung dickerer Drähte. Die

Messwerke sind nicht so empfindlich wie Drehspulinstrumente.



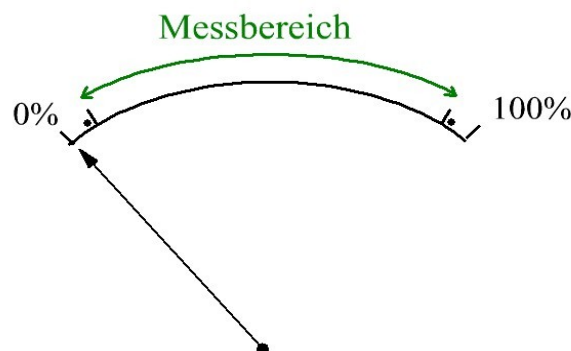
Prinzip und Symbol

Durch besondere Formgebung der Eisenplättchen wird in einem großen Teil des Anzeigebereiches eine weitgehende Linearisierung der Skala erreicht. Anfang und Ende des Anzeigebereiches sind jedoch stark nicht linear skaliert und enthalten meist keine Skalenstriche.

Das Messwerk besitzt folgende Eigenschaften:

- nichtlineare Skala
- Anzeige unabhängig von Stromrichtung, daher für AC und DC geeignet
- robuste Messwerke realisierbar
- bei AC wird der echte Effektivwert angezeigt
- bei Mischgrößen AC + DC wird der Gesamteffektivwert (trms) richtig angezeigt.

Der Zeiger ist in Ruhestellung am linken Rand positioniert, da negative Ausschläge nicht möglich sind. Der Messbereich der Skala ist wegen der Nichtlinearität mit Punkten gekennzeichnet, zwischen denen die Messwerkspezifikation eingehalten wird. Außerhalb der Punktmarken ist eine Messung nicht sinnvoll. Eine informative Ablesung ist jedoch möglich.



4 Einsatz und Anwendung

Die elektromechanischen Messwerke sind immer noch in vielfältigsten Bauformen erhältlich. Sie können als relativ billige Betriebsanzeigeeinstrumente und Messgeräte im Schalttafelbau eingesetzt werden. Ihr wesentlicher Vorteil ist, dass keine zusätzliche Versorgungsspannung für den Betrieb erforderlich ist. Die Messwerke beziehen die Energie aus dem Messobjekt. Die Zeigeranzeige bietet den Vorteil der Übersichtlichkeit und raschen Ablesbarkeit von groben Werten und Trends der Messwerte.



Besondere Ausführungsformen des Dreheisen- Messprinzips findet man auch in Spannungsprüfern für die Elektroinstallationstechnik. Die Anzeige ist unabhängig von der Stromart und erfordert einen geringen Strom aus dem Messobjekt, wodurch kapazitiv eingekoppelte Streuspannungen in den Installationsleitungen nicht angezeigt werden. Diese Geräte zeichnen sich durch robusten Aufbau und weitgehende Wartungsfreiheit aus.

5 Messbereichserweiterung

Die elektromechanischen Messwerke sind elektrisch durch ihren Spulenwiderstand R_S und den maximalen Strom $I_{\max}$, der für 100% Vollausschlag erforderlich ist, gekennzeichnet. Für den praktischen Messeinsatz muss meist eine zusätzliche Beschaltung berechnet werden. Die erforderlichen Ströme liegen für

Drehspulmesswerk $I_{\max} \ 10 \ \mu\text{A} \dots 1 \ \text{mA} \ (10 \ \text{mA})$

Dreheisenmesswerk $I_{\max} \ 100 \ \mu\text{A} \dots 10 \ \text{mA} \ (100 \ \text{mA})$

5.1 Voltmeter

Ein Voltmeter liegt parallel an der zu messenden Spannung. Es entnimmt dabei einen Strom I_{VM} . Dieser Strom muss mit einem Vorwiderstand R_V begrenzt werden. Dieser wird berechnet, indem man die Verhältnisse bei maximalem Zeigerausschlag am Ende des Messbereiches (Vollausschlag) betrachtet. Bei der gewünschten maximalen Messbereichsspannung U_{MB} muss der Strom $I_{\max}$ fließen. Zur Dimensionierung von R_V berechnet man dessen Wert und die Leistung P_V .

$$U_{MB} = (R_V + R_S) \cdot I_{\max} \rightarrow R_V = \frac{U_{MB}}{I_{\max}} - R_S \quad \text{und} \quad P_V = U_{MB} \cdot I_{\max}$$

Wenn der Spulenwiderstand kleiner 1% von R_V ist, kann man diesen vernachlässigen. R_V und R_S bilden den Innenwiderstand R_{VM} des Voltmeters. Mit dem Messbereich U_{MB} lässt sich daraus der Kennwert k des Voltmeters berechnen.

$$k = \frac{R_{iVM} [k\Omega]}{U_{MB} [V]} \quad \text{mit Einheit } \frac{k\Omega}{V}$$

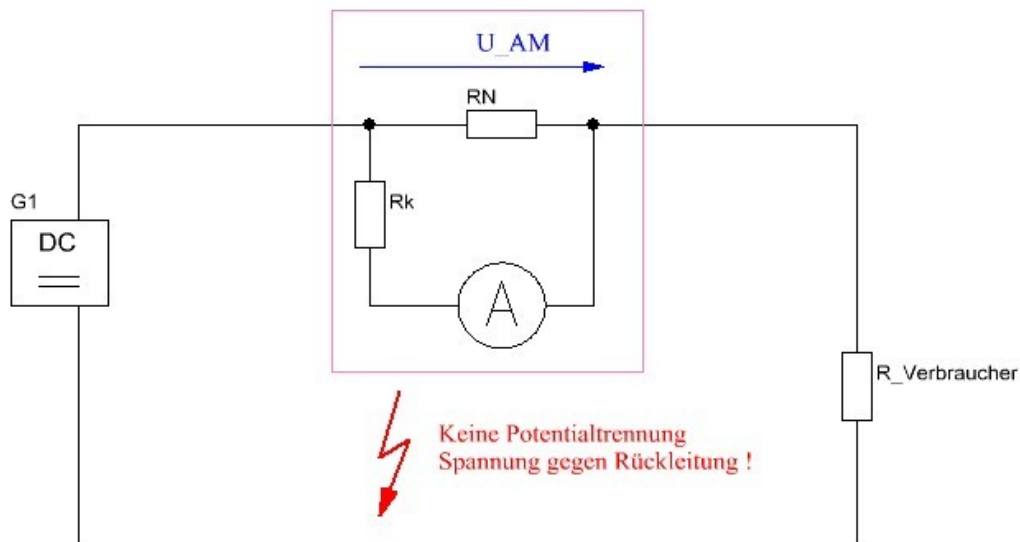
5.2 Amperemeter

Ein Amperemeter liegt in Serie zum zu messenden Strom. Es entsteht dabei ein Spannungsabfall U_{AM} . Ist der zu messende Strom I_M größer als der durch das Messwerk zulässige Strom I_{max} , so muss ein Parallel- oder Nebenwiderstand R_N eingesetzt werden. Dieser wird berechnet, indem man die Verhältnisse bei maximalem Zeigerausschlag am Ende des Messbereiches (Vollausschlag) betrachtet. Beim gewünschten maximalen Messbereichsstrom I_{MB} muss der Strom I_{max} fließen. Zur Dimensionierung des Nebenwiderstandes berechnet man dessen Wert R_N und die Leistung P_V .

$$\frac{I_{MB} - I_{max}}{I_{max}} = \frac{R_S}{R_N} \rightarrow R_N = R_S \cdot \frac{I_{max}}{I_{MB} - I_{max}} \quad \text{und} \quad P_V = I_{MB}^2 \cdot R_N$$

Wenn der Nebenwiderstand kleiner 1% von R_S ist, kann man diesen vernachlässigen. Zu beachten ist, dass der Kupferwiderstand R_S eine erhebliche Temperaturabhängigkeit hat ($\alpha_{20} 0,0039 \text{ K}^{-1}$). Deswegen sollte man einen Kompensationswiderstand R_K , der etwa 10 mal so groß wie R_S sein sollte, zum Messwerk in Serie schalten. Dadurch erhöht sich jedoch der Spannungsabfall U_{AM} .

$$U_{AM} = (R_K + R_S) \cdot I_{max} = (I_{MB} - I_{max}) \cdot R_N$$



Zu beachten ist unbedingt, dass das Messgerät mit dem Potential der gemessenen Leitung galvanisch verbunden ist und somit Spannungen gegen andere Anlagenteile und gegen Erde auftreten können.

Konstruktiv ist zu beachten, dass der Nebenwiderstand vierpolig kontaktiert wird, um die Übergangswiderstände des Hauptstromkreises nicht im Messwerkkreis mitzumessen.