

## Versuch ET 02 – Messinstrumente für Strom und Spannung

### 1 Versuchsziel

Kennenlernen der am häufigsten eingesetzten Messinstrumente für Strom und Spannung.

### 2 Grundlagen

#### 2.1 Messwerktypen

Die zur Messung von Strom und Spannung eingesetzten Geräte lassen sich in zwei Hauptgruppen – leistungsverbrauchende und leistungslose Messinstrumente – einteilen. Leistungsverbrauchende Instrumente nutzen im Wesentlichen die Kraftwirkung auf bewegte elektrische Ladungen sowie Grenzflächen im magnetischen Feld (Drehspul- und Weicheiseninstrumente, elektrodynamische Messwerke). Die leistungslosen Messinstrumente, z. B. statische Voltmeter, basieren auf der Kraftwirkung auf Ladungen im elektrischen Feld. Röhrenvoltmeter und digitale Voltmeter erlauben ebenfalls eine weitgehend leistungslose Messung.

Im vorliegenden Versuch werden ausschließlich die leistungsverbrauchenden Messinstrumente mit Drehspul- und Weicheisenmesswerk (bzw. Dreheisenmesswerk) behandelt. Sie eignen sich wegen des linearen Zusammenhangs zwischen Strom und Spannung (OHMSches Gesetz) sowohl zur Strom- als auch zur Spannungsmessung.

Drehspulmessgeräte zeigen den arithmetischen Mittelwert

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (1)$$

der Messgröße an, während Weicheiseninstrumente den Effektivwert (quadratischen Mittelwert)

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2)$$

messen. Drehspulmessgeräte müssen für Wechselstrommessungen mit einem Gleichrichter ausgerüstet sein. Sie sind dann meistens (wie z. B. Vielfachmesser) in Effektivwerten geeicht. (Es ist jedoch zu beachten, dass diese Effektivwertanzeige exakt nur bei sinusförmigen Messgrößen gilt!).

Die wichtigsten Daten für den Einsatz der Messgeräte (Stromart, Messwerk, Gebrauchslage, Genauigkeit u. ä.) sind durch Symbole auf der Skala angegeben.

## 2.2 Empfindlichkeit und Genauigkeit

Die Empfindlichkeit des Messgerätes ist definiert als Änderung des Zeigerausschlages  $\alpha$  bezogen auf die Änderung der Messgröße

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta I} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta\alpha}{\Delta U} \quad (3)$$

Die Genauigkeit gibt Aufschluss über den Anzeigefehler des Instrumentes. Sie wird durch das Klassenzeichen  $x$  ( $x = 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2,5; 5$ ) auf der Skala angegeben. Die Genauigkeitsklasse ist im Wesentlichen vom konstruktiven Aufbau des Messgerätes abhängig. Das Klassenzeichen  $x$  bedeutet beispielsweise für einen Strommesser: Der absolute Anzeigefehler  $\Delta I$  ist an jeder Stelle der Skala gleich  $x$  % vom Vollausschlag. Damit ist – lineare Skalenteilung vorausgesetzt – der relative Fehler

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100 \% \quad (4)$$

eines angezeigten Messwertes  $I$  dem Ausschlag umgekehrt proportional. Die Begriffe „Empfindlichkeit“ und „Genauigkeit“ werden häufig miteinander verwechselt!

## 2.3 Innenwiderstand und Eigenverbrauch

Drehspul- und Weicheiseninstrumente besitzen einen endlichen ohmschen Innenwiderstand  $R$ , so dass bei einem Strom  $I$  bzw. einer Spannung  $U$  eine Leistung

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} \quad (5)$$

im Instrument in Wärme umgesetzt wird. Diese Leistung wird dem Messkreis entzogen und kann die Messung teilweise erheblich verfälschen, wenn sie nicht gegenüber der im Messkreis umgesetzten Leistung zu vernachlässigen ist (vgl. 2.5). Drehspulinstrumente besitzen einen wesentlich geringeren Leistungsbedarf ( $\mu\text{W} \dots \text{mW}$ ) als Weicheiseninstrumente ( $W$ ). Der Eigenverbrauch der Instrumente wird stets für Vollausschlag angegeben. Da diese Leistungsaufnahme nicht beliebig gesenkt werden kann, haben Strommesser mit hoher Empfindlichkeit einen relativ hohen Innenwiderstand  $R_i$ .

## 2.4 Messbereichserweiterung

Durch Zuschalten von Widerständen  $R_V$  in Reihe (Spannungsmesser) oder  $R_P$ , parallel (Strommesser) zum Messwerk kann der Messbereich eines Instrumentes erweitert werden; die Empfindlichkeit wird dabei jedoch verringert. Die notwendigen Zusatzwiderstände  $R_V$  und  $R_P$  lassen sich nach Gleichung (6) berechnen.

$$R_V = R_U \left( \frac{U}{U_0} - 1 \right) = R_U (p - 1) \quad R_P = \frac{R_I}{\frac{I}{I_0} - 1} = \frac{R_I}{p - 1} \quad (6)$$

Spannungsmesser

Strommesser

Dabei gibt der Faktor  $p$  das Verhältnis von neuem zu altem Vollausschlag und  $R_{U,I}$  den Widerstand des Messwerkes an. Der Leistungsbedarf eines erweiterten Instrumentes (einschließlich Zusatzwiderstand) steigt auf das  $p$ -fache.

Vielfachinstrumente enthalten ein Drehspulmesswerk hoher Empfindlichkeit sowie umschaltbare Vorwiderstände  $R_V$ , und Parallelwiderstände (Shunts)  $R_P$ .

Bei Wechselstrommessungen führt der eingebaute Gleichrichter zur Nichtlinearität im unteren Skalenbereich. Weicheiseninstrumente sind vor allem auf Grund ihrer geringen Empfindlichkeit und des hohen Eigenverbrauchs für eine Messbereichserweiterung ungeeignet.

## 2.5 Messinstrumente in der Schaltung

Das Einbringen leistungsverbrauchender Messinstrumente in eine Schaltung bedeutet das Einfügen eines zusätzlichen Widerstandes. Dadurch ändern sich die Strom- und Spannungswerte. Für den praktischen Einsatz ist es daher notwendig, den entstehenden Fehler vernachlässigbar klein zu halten oder zu korrigieren. Entscheidend für die Größe des Fehlers ist das Verhältnis zwischen dem Innenwiderstand  $R_{i,ers}$  der zu messenden Schaltung und dem Messgerätewiderstand  $R_I$  bzw.  $R_U$ . Der Fehler ist vernachlässigbar, wenn Gleichung (7) gilt (vgl. Abbildung 2).

$$R_U \gg R_{i,ers} \qquad R_I \ll R_{i,ers} \qquad (7)$$

Spannungsmesser

Strommesser

Daraus resultiert der Grundsatz: Strommesser sollen einen möglichst niedrigen, Spannungsmesser einen möglichst hohen Innenwiderstand besitzen. Ist Gleichung (7) nicht erfüllt, muss das Messergebnis durch Berücksichtigung des Instrumentenwiderstandes  $R_I$  bzw.  $R_U$  korrigiert werden.

Für die gleichzeitige Messung von Strom und Spannung an einem Widerstand  $R_x$  sind zwei Schaltungen möglich. In der stromrichtigen Schaltung (Abbildung 1a) werden die Spannung am Widerstand  $R_x$  um  $\Delta U = I \cdot R_I$  und in der spannungsrichtigen Schaltung (Abbildung 1b) der Strom durch  $R_x$  um  $\Delta I = U/R_U$  zu hoch gemessen.

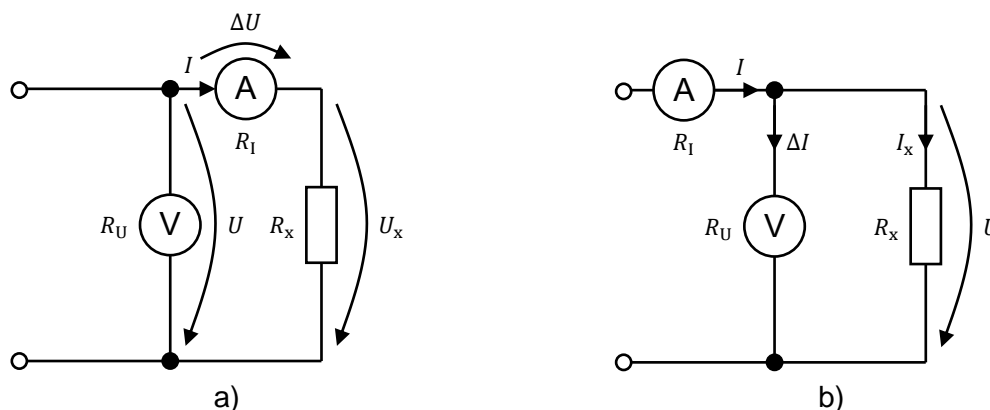


Abbildung 1: Gleichzeitige Messung von Strom und Spannung an  $R$

Für die Genauigkeit der Messung ist das Verhältnis

$$\frac{R_x}{R_I} \quad (\text{Abbildung 1a}) \quad \text{bzw.} \quad \frac{R_U}{R_x} \quad (\text{Abbildung 1b})$$

entscheidend.

### 3 Versuchsvorbereitung

#### 3.1 Aufbau und Wirkungsweise der Messwerke von Drehspul- und Weicheiseninstrumenten

Skizzieren Sie den Aufbau der Messwerke von Drehspul- und Weicheiseninstrumenten und erläutern Sie die Wirkungsweise beider Instrumententypen!

Weisen Sie durch Anwendung physikalischer Gesetze (Kräfte im Magnetfeld) rechnerisch nach, dass beim Drehspulinstrument  $\alpha \sim I$  gilt!

#### 3.2 Aufschriftsymbole von Messinstrumenten

Skizzieren und erläutern Sie die Aufschriftsymbole von Messinstrumenten (Messwerk, Stromart, Betriebslage, Messgenauigkeit und Prüfspannung)!

#### 3.3 Erweiterung der Messbereiche zur Strom- und Spannungsmessung

Entwerfen Sie die Messschaltungen zur Erweiterung der Messbereiche für die Messaufgaben 4.4 und 4.5!

#### 3.4 Zweckmäßigkeit bei Strom- und Spannungsmessungen

Ein unbekannter Widerstand  $R_x$  soll durch gleichzeitige Strom- und Spannungsmessung nach dem OHMSchen Gesetz bestimmt werden (Schaltung: Abbildung 1). Erläutern Sie, welche der beiden möglichen Schaltungen für die Bestimmung eines hochohmigen bzw. niederohmigen  $R_x$  zweckmäßig ist! Geben Sie sowohl für die zweckmäßige als auch für die unzulässige Schaltung die Beziehungen zur Ermittlung von  $R_x$  aus den angezeigten Messwerten  $U$  und  $I$  an (bei unzulässiger Schaltung sind die Instrumentenwiderstände  $R_U$  bzw.  $R_I$  als bekannt vorauszusetzen und zu berücksichtigen)!

#### 3.5 Leistungsbedarf bei einer Messbereichserweiterung

Leiten Sie die Beziehungen zur Berechnung der Zusatzwiderstände  $R_v$  und  $R_p$  für die Messbereichserweiterung (Gleichung (6)) her! Weisen Sie rechnerisch nach, dass der Leistungsbedarf eines erweiterten Instrumentes bei äußerer Messbereichserweiterung auf das  $p$ -fache ansteigt!

#### 3.6 Verhältnis für fehlerbehaftete Strom- und Spannungsmessung

Mit den in Abbildung 2 dargestellten Schaltungen sollen der Strom  $I$  bzw. die Spannung  $U$  mit einem Fehler  $\delta \leq 5\%$  gemessen werden.

Welches Verhältnis  $\frac{R_I}{R_{i,ers}}$  bzw.  $\frac{R_U}{R_{i,ers}}$  ist dafür notwendig?

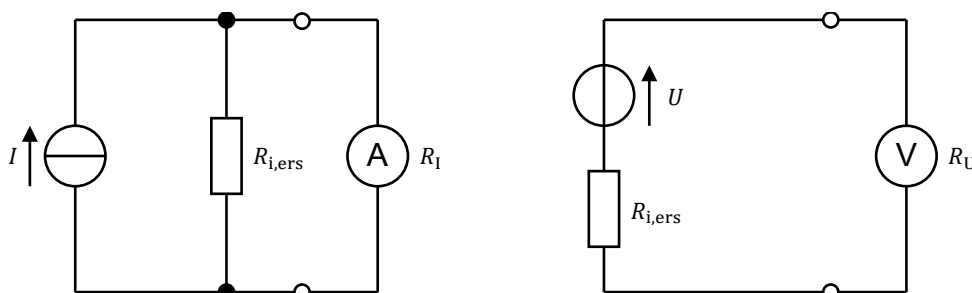


Abbildung 2: Schaltungen zu Strom- und Spannungsmessung

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Innenwiderstände $R_i$ der vorgelegten Messinstrumente

Bestimmen Sie die Innenwiderstände  $R_i$  der vorgelegten Messinstrumente durch Strom- und Spannungsmessungen (Zweibereichs-Messinstrument) bzw. direkte Messung (Weicheisen-Messinstrument) und berechnen Sie den Leistungsbedarf bei Vollausschlag!

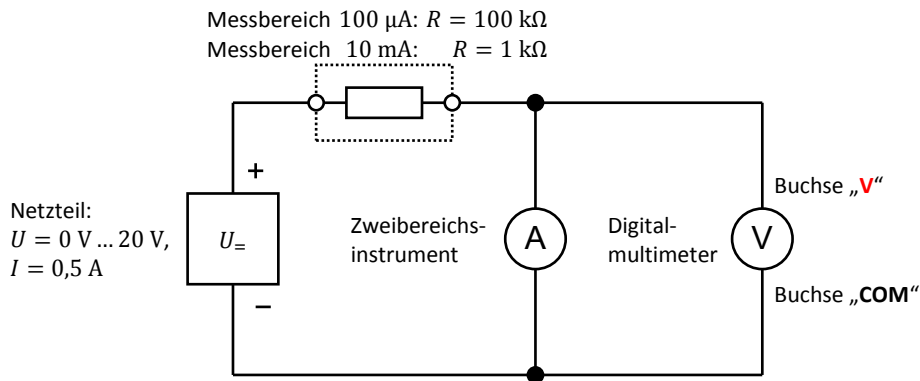


Abbildung 3: Messschaltung (Zweibereichs-Messinstrument)

**Hinweise:** Die Messung erfolgt jeweils bei Vollausschlag!

Für die Messung des Innenwiderstandes des Weicheisen-Messinstrumentes kann die Widerstands-Messfunktion des DMM genutzt werden!

Zur Bestimmung des Leistungsbedarfs des Weicheisen-Messinstrumentes ist die Maximalspannung des regelbaren Netzgerätes EA-3048 bei Wechselspannung (gemäß Aufgabe 4.2) zu verwenden!

### 4.2 Messung der Spannung in Abhängigkeit vom Ausschlagwinkel des Zeigers

Nehmen Sie den Graphen der Messfunktion  $U = f(\alpha)$  bei Wechselspannung für das Weicheiseninstrument auf ( $\alpha$ : Winkel des Zeigerausschlags)!

Ermitteln Sie aus den Daten des Instrumentes den absoluten ( $\Delta U$ ) sowie den relativen ( $\delta_i$ ) Fehler und tragen Sie diese in Abhängigkeit vom Ausschlag  $\alpha$  auf!

Spannungsquelle: regelbares Netzgerät EA-3048, Wechselspannung verwenden!

Spannungsmesser: Digital-Multimeter HM8012

### 4.3 Daten der untersuchten Drehspul- und Weicheiseninstrumente

Stellen Sie die ermittelten Daten der untersuchten Drehspul- und Weicheiseninstrumente tabellarisch zusammen!

#### 4.4 Realisierung einer Messbereichserweiterung zur Strommessung

Erweitern Sie den leistungsärmsten Bereich der Versuchsinstrumente mit Hilfe eines Zusatzwiderstandes zu einem Strommesser. Berechnen Sie den Zusatzwiderstand und nehmen Sie den Graphen der Messfunktion  $I = f(\alpha)$  auf.

Verwenden Sie das Digital-Multimeter als Vergleichsmessgerät!

Ermitteln Sie den Leistungsbedarf des erweiterten Instrumentes!

**Hinweis:** erweiterter Messbereich: 0 mA ... 10 mA

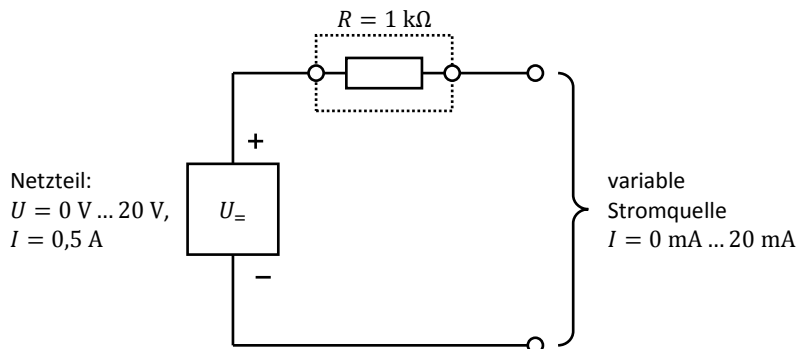


Abbildung 4: Messschaltung zur Realisierung einer variablen Messstromquelle

#### 4.5 Realisierung einer Messbereichserweiterung zur Spannungsmessung

Erweitern Sie das gleiche Versuchsinstrument zu einem Spannungsmesser! Berechnen Sie den Zusatzwiderstand und nehmen Sie den Graphen der Messfunktion  $U = f(\alpha)$  auf.

Verwenden Sie das Digital-Multimeter als Vergleichsmessgerät!

**Hinweis:** erweiterter Messbereich: 0 V ... 0,5 V

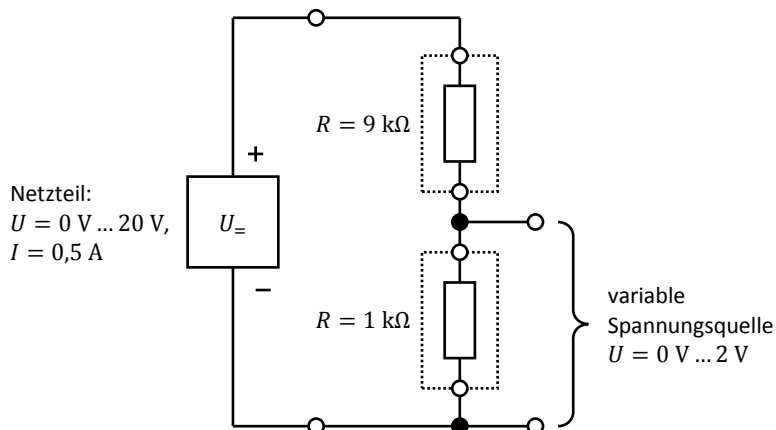


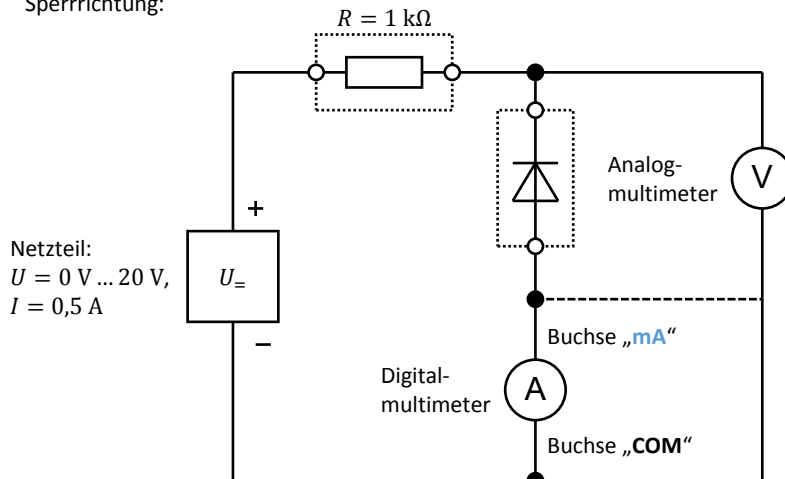
Abbildung 5: Messschaltung zur Realisierung einer variablen Messspannungsquelle

#### 4.6 Statische Kennlinie $I = f(U)$ der vorgelegten Gleichrichterdiode

Nehmen Sie die statische Kennlinie  $I = f(U)$  der vorgelegten Gleichrichterdiode (Durchlass- und Sperrrichtung) sowohl in zweckmäßiger als auch in unzweckmäßiger Schaltung auf!

Messschaltungen:

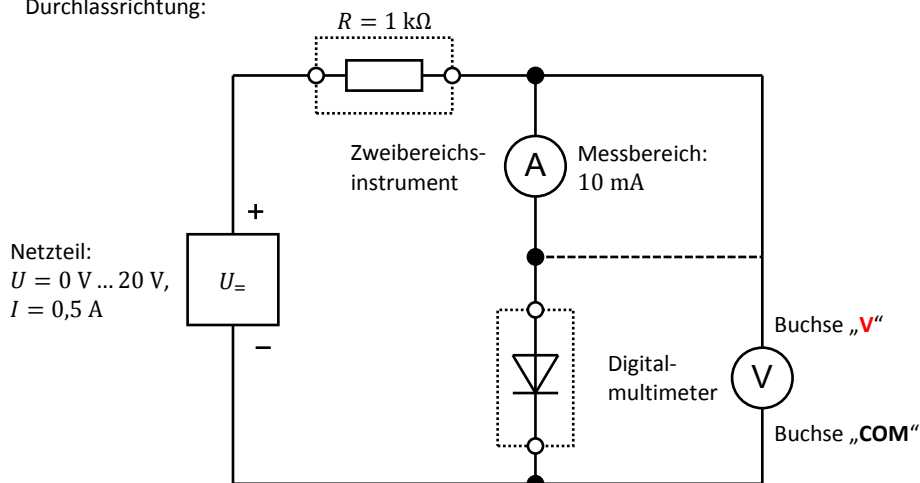
Sperrrichtung:



Bereich der Messspannung: 0 V ... 15 V

Abbildung 6: Messschaltung bei Sperrrichtung

Durchlassrichtung:



Bereich des Messstromes: 0 mA ... 10 mA

Abbildung 7: Messschaltung bei Durchlassrichtung

#### 4.7 Widerstand des Gleichrichters in Durchlass- und Sperrrichtung

Ermitteln Sie aus den Gleichrichtercharakteristiken (Aufgabe 4.6, zweckmäßige Schaltung!) den Widerstand des Gleichrichters in Durchlass- und Sperrrichtung und tragen Sie diesen als Funktion der Spannung auf!

#### 4.8 Bestimmung der Innenwiderstände der Messgeräte

Bestimmen Sie aus dem Diagramm der Aufgabe 4.6 die Innenwiderstände des Zweibereichs-Messinstrumentes und des Analog-Multimeters und vergleichen Sie das Ergebnis für das Zweibereichs-Messinstrument mit dem in Aufgabe 4.1 ermittelten Wert für  $R_1$ !

## 5 Literatur

- [1] S. Altmann, D. Schlayer, Lehr- und Übungsbuch Elektrotechnik, Fachbuchverlag Leipzig - Köln, 1995.
- [2] W.-E. Büttner, Grundlagen der Elektrotechnik 1, Oldenbourg Verlag München - Wien, 2004.
- [3] T. Harriehausen, D. Schwarzenau, Moeller Grundlagen der Elektrotechnik, Springer Vieweg – Wiesbaden, 2013

## 6 Anhang

### 6.1 Geräteliste

- 1 Dreifach-Gleichspannungs-Netzgerät HM8040-3 (2 x 0...20 V/0,5 A, 1 x 5 V/1 A)
- 1 Regelbares Netzgerät EA-3048
- 1 Digital-Multimeter (DMM) HM8012
- 1 Analog-Multimeter MA 2H
- 1 Zweibereichs-Messinstrument
- 1 Weicheisen-Messinstrument
- 1 Widerstandsdekade MA 2115 S
- 1 Experimentierplatine
- 1 Widerstand  $R = 1 \text{ k}\Omega$
- 1 Widerstand  $R = 9 \text{ k}\Omega$
- 1 Widerstand  $R = 100 \text{ k}\Omega$
- 1 Germanium-Gleichrichterdiode AA 116