

## Messung linearer und nichtlinearer Widerstände (passive Zweipole)

Studiengang/Set: ..... Praktikumsplatz-Nr.: ..... Datum: .....

Testat: .....

Teilnehmer 1: .....  
(Protokollant) (Blockschrift) (Unterschrift)

Datum: .....

Teilnehmer 2: .....  
(Blockschrift) (Unterschrift)

.....  
Unterschrift

## 1 Allgemeines

### 1.1 Erforderliche Grundlagen und Begriffe

Folgende Begriffe sollten inhaltlich verstanden sein: Potenzial, Spannung, Stromstärke, elektrischer Widerstand,  $I, I$ -Kennlinie, nichtlinearer Widerstand, absoluter (statischer, Gleichstrom-) und differentieller (dynamischer) Widerstand, Drehspulmessgerät, Wahl des optimalen Messbereichs, Messbereichserweiterung, absoluter und relativer Messfehler, Fehlertypen, Genauigkeitsklasse (Fehlerklasse) von Messgeräten, Parallaxenfehler, Grundgesamtheit, Stichprobe, Standardabweichung  $\sigma$ , Schätzung  $S$  der Standardabweichung, strom- und spannungsrichtige Messschaltung, Dioden

### Vorbetrachtungen

Der elektrische Widerstand  $R$  kennzeichnet die elektrische Leitfähigkeit eines Materials unter dem Einfluss einer elektrischen Spannung. Zuweilen ist es praktischer anstelle des Widerstands seinen Kehrwert, den Leitwert  $G$  zu benutzen. Definiert ist der Widerstand über das Verhältnis aus Spannung  $U$  und der dabei auftretenden elektrischen Stromstärke  $I$ , das sogenannte OHMsche Gesetz:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U_0}{I_0} \quad \text{OHMsches Gesetz}$$

Ist das Verhältnis unabhängig von der Spannung bzw. Stromstärke konstant, kennzeichnet dies einen **linearen** (OHMschen) Widerstand, ist es spannungsabhängig veränderlich, dann handelt es sich um einen **nichtlinearen** Widerstand.

Sehr anschaulich kommt dies in der sogenannten Strom-Spannungs-Kennlinie ( $I, U$ -Kennlinie) zum Ausdruck (Bilder 1 und 2). Ein Arbeitspunkt (AP) markiert dabei den aktuellen Betriebszustand eines Bauelements, im vorliegenden Fall welcher Strom  $I_0$  gerade bei der Spannung  $U_0$  fließt.

Der absolute Widerstand entpuppt sich somit als Kehrwert des Anstieges der  $I, U$ -Kennlinie! Zu beachten ist dabei, dass die unabhängige Variable die Spannung ist. (Wählt man die Stromstärke als unabhängige Variable, was zuweilen auch vorkommt, dann ist der Anstieg direkt proportional zum Widerstand!)

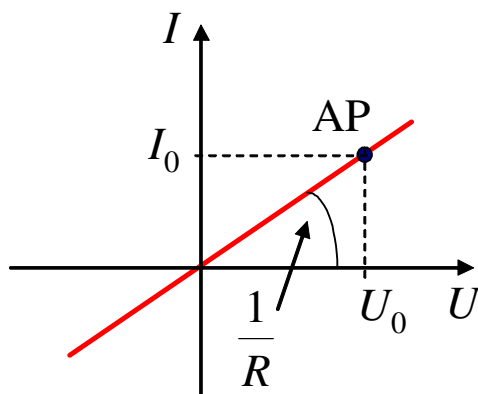


Bild 11  $U$ -Kennlinie eines linearen Widerstandes

Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm  $[R] = \Omega = \frac{V}{A}$ .

#### Hinweis!

Anfänger machen gerne den Fehler, den Anstieg über den Tangens des Winkels zu bestimmen. Dabei "vergessen" Sie, dass es sich bei dem Diagramm um den Zusammenhang zwischen einheitenbehafteten physikalischen Größen handelt und der Winkel damit auch vom gerade verwendeten Maßstab abhängt. Outen Sie sich also nicht als Anfänger und ermitteln Sie den Anstieg korrekt über die Tangens-Definition im rechtwinkligen Dreieck als Verhältnis von Gegenkathete zu Ankathete! Wenn Sie dabei korrekterweise auch die Einheiten berücksichtigen, erhalten Sie automatisch die Einheit für den Widerstand (was über den Winkel natürlich gar nicht funktioniert hätte!)

Im Falle eines nichtlinearen Widerstandes (Bild 2) genügt nun offensichtlich zur eindeutigen Kennzeichnung des Widerstandsverhaltens alleine die Angabe des Verhältnisses von Spannung und Strom nicht mehr

Um dies zu verdeutlichen, sind in Bild 2 drei Arbeitspunkte (AP) markiert, die alle auf der gleichen Nullpunktgeraden liegen.

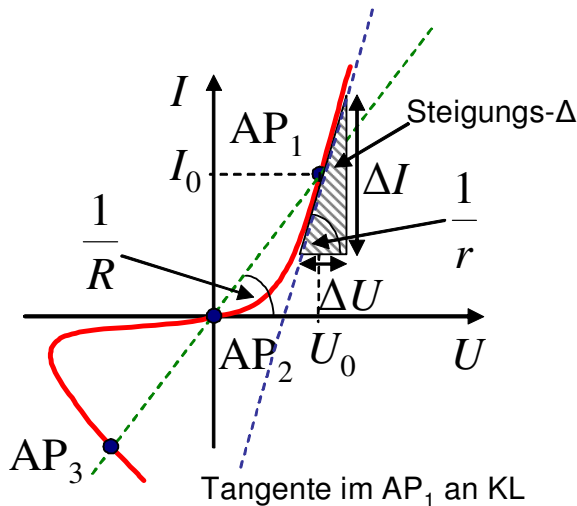


Bild 2 I,U-Kennlinie eines nichtlinearen Widerstandes

Damit ist allen drei APs der gleiche OHMsche Widerstand zugeordnet (der in diesem Zusammenhang auch als **absoluter** oder **statischer** Widerstand bezeichnet wird, zuweilen verwendet man auch die Bezeichnung **Gleichstromwiderstand**). Aber das Kennlinienverhalten in ihrer Umgebung ist völlig unterschiedlich voneinander. Damit lässt sich allein aus der Kenntnis des absoluten Widerstandes nicht voraussagen, wie sich die Stromstärke verändert, wenn sich die Spannung ändert.

Um dies mit zu erfassen, benötigt man eine weitere Widerstandskenngröße: den **differentiellen** Widerstand, der über das Verhältnis der Stromänderung  $dI$  bei einer Spannungsänderung  $dU$  in der Umgebung des Punktes Auskunft gibt. Dieser Kennwert wird häufig auch als **dynamischer** Widerstand bezeichnet und durch einen Kleinbuchstaben symbolisiert:

$$r = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I} \Bigg|_{\text{Tangente im AP}}$$

Die "Konstruktion" der Tangente erfolgt dabei nach Augenmaß!

In der Praxis erfolgt die Messung des Widerstandes üblicherweise mit einer kombinierten **Strom- und Spannungsmessung** (sogenanntes Ausschlagsverfahren) bzw. mit Hilfe der sogenannten WHEATSTONEschen Messbrücke (Nullindikationsverfahren). Die Eigenheit von Ausschlagsverfahren (gemeint ist der Zeigerausschlag von Zeigerinstrumenten) besteht in der Tatsache, dass die für den Ausschlag der Messgeräte benötigte elektrische Energie dem Messobjekt entzogen wird, was einen unvermeidbaren **Messfehler** zur Folge hat. Der Grund liegt in dem Widerstandsverhalten der Messgeräte selbst. Idealerweise sollte ein Spannungsmessern (Voltmeter) einen unendlich hohen und ein Strommesser (Amperemeter) einen unendlich kleinen Widerstand zwischen seinen Anschlussklemmen (**Messgeräteinnenwiderstand**) besitzen. Der real vorhandene Wert ist davon weit entfernt und leider auch noch von dem gerade verwendeten **Messbereich** abhängig. Die konkreten Werte sind der Gerätebeschreibung zu entnehmen! Mit Kenntnis des Messgeräteinnenwiderstandes im jeweils genutzten Messbereich kann der Fehler korrigiert werden, da es sich um einen **systematischen Fehler** handelt.

Hinweis!

*Machen Sie es sich von Anfang an zur Gewohnheit, beim Aufbau von Messschaltungen zunächst den Hauptstromkreis zu verdrahten. Die Stromstärke als eine Flussgröße (Strom fließt **durch** das Messobjekt), ist dabei durch ein **in Reihe** zum Widerstand zu schaltendes **Amperemeter** zu erfassen (Polung beachten!). Anschließend werden dann zur Messung von Spannungen, die **über** den Messobjekten abfallen (Spannung als Potenzialunterschied ist eine **über** etwas anfallende Messgröße), die **Voltmeter** in die Schaltung eingebaut. Diese sind deshalb immer **parallel** zu den in Frage kommenden Messobjekten zu schalten. Auch hier ist die Polung zu beachten!*

Dioden sind ebenso wie Widerstände Zweipolbauelemente, Im Gegensatz zu diesen, zeigen Sie jedoch ein ausgeprägt stromrichtungsabhängiges Widerstandsverhalten. Ihre I,U-Kennlinie ist nicht mehr nullpunktsymmetrisch! Ist die Anode A gegenüber der Kathode K positiv gepolt (Bild 3), steigt der Strom schon bei relativ geringen Spannungen extrem an. Das Bauelement ist niederohmig. Man spricht vom **Durchlassbetrieb**! Wird das Potential an der Anode aber niedriger als das an der Kathode (die Anode wurde gegenüber der Kathode negativ gepolt), fließt so gut wie kein Strom. Das Bauelement ist hochohmig. Die Diode ist im **Sperrbetrieb**! Diese Tatsache wird in der Praxis vielfältig genutzt, indem Dioden als spannungsgesteuerte Schalter eingesetzt werden. Das Messen der I,U-Kennlinie von Dioden erfolgt nach den gleichen Regeln wie die der Widerstände! Charakteristische Merkmale dieser Kennlinie sind die **Schleusenspannung** im Durchlassbereich und der **Sperrstrom** im Sperrbereich der Kennlinie.

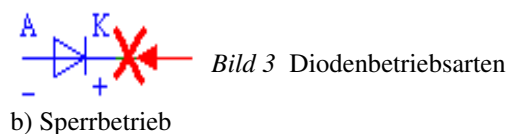
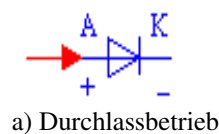


Bild 3 Diodenbetriebsarten

## 1.2 Vorbereitungsaufgaben

- Studieren Sie die Praktikumsordnung sowie die Arbeitsschutzhinweise!
- Wiederholen Sie die entsprechenden Kapitel aus der Vorlesung und machen Sie sich insbesondere mit dem Problem der spannungs- bzw. stromrichtigen Messung vertraut. Beschäftigen Sie sich in dem Zusammenhang nochmals mit der Problematik der Messbereichserweiterung von Drehspulinstrumenten (z.B. *Busch: Elektrotechnik und Elektronik, S. 118 u. 121* bzw. *Ose: Elektrotechnik für Ingenieure S. 43-47*). Sinngemäß treten die gleichen Effekte auch bei Digitalmultimetern auf! Stellen Sie insbesondere im Zusammenhang mit Messaufgabe 2.1.1 unter Berücksichtigung der Messgeräteinnenwiderstände die Korrekturformeln für den tatsächlichen Strom  $I$  bzw. die Spannung  $U$  durch das Messobjekt bei spannungs- bzw. stromrichtiger Messung auf und ergänzen Sie die Bildunterschriften der Messschaltungen zu Messaufgabe 2.1.
- Berechnen Sie den ohmschen Wicklungswiderstand  $R_{Cu}$  (Kupferwiderstand) der in der Messung verwendeten Spule, wenn Ihnen folgende Angaben bekannt sind:  
*Cu-Draht:  $\rho_{Cu} = 0,01786 \Omega mm^2 m^{-1}$ , 1000 Windungen, Drahtdurchmesser  $350 \mu m$ ; Wickelkörper mit quadratischem Querschnitt und den im Bild angegebenen lichten Abmessungen; Materialdicke des Wickelkörpers  $d = 1,5 mm$ , Außendurchmesser der Wicklung  $33 mm$  (Gehen Sie zunächst von einer quadratischen Form der Windungen aus, die mehr oder weniger dicht im Wickelraum liegen! Wie ändert sich der Widerstand, wenn Sie Annahme einer Kreisform der Windung annehmen?)*

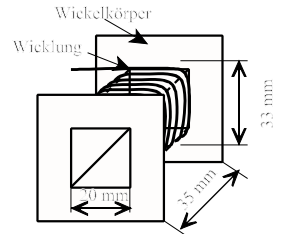


Bild 4 Spulengeometrie

- Geben Sie die Formel zur Berechnung der Schätzung der Standardabweichung einer Stichprobe aus  $n$  Messwerten  $X_i$  an!
- Aus den Messgeräteunterlagen sind bezüglich der Messgeräteinnenwiderstände folgende Angaben zu entnehmen:

### Drehspulinstrument MX 230

Spannungsmessung: in allen Messbereichen  $20 k\Omega/V$   
 (100 V, 30 V, 10 V, 3 V, 1 V, 0,3 V)

Strommessung: (in allen Bereichen  $< 0,4 V$ )

Messbereich 100 mA:  $3,4 \Omega$

Messbereich 10 mA:  $26 \Omega$

Messbereich 1 mA:  $240 \Omega$

Messbereich 0,1 mA:  $1,25 k\Omega$

### Digitalmultimeter MX 54c

Spannungsmessung:

5 V/50 V-Messbereich  $11 M\Omega$

500 mV-Messbereich  $10 M\Omega$

Strommessung:

Messbereich 10 A:  $0,05 \Omega$

Messbereich 500 mA:  $1,55 \Omega$  / 50 mA:  $11,5 \Omega$

Messbereich 5 mA:  $112 \Omega$  / 500  $\mu A$ :  $1020 \Omega$

**Aufgabe: Ermitteln Sie die Messgeräteinnenwiderstände in den Spannungsmessbereichen des Drehspulinstruments!**



Bild 5  
Analogmessgerät MX230  
(Drehspulinstrument)



Bild 6  
Digitalmessgerät MX54c

- Pol für I- und U-Messung

## 2 Versuchsaufgaben

Verwendete Geräte: DC-Konstanter (einstellbare Gleichspannungsquelle) in Konsole; Digitalmultimeter MX 54c; Drehspulinstrument MX 230

### 2.1 Lineare (OHMsche) Widerstände

**Aufgabe:** Bestimmen Sie unter Angabe der Genauigkeit die Werte von zwei an Ihrem Versuchsort vorhandenen elektrischen Widerständen durch Strom-Spannungs-Messung (Bild 4 bzw. 5) und ermitteln sie deren  $I,U$ -Kennlinie!

Als **Messobjekte** verwenden sie den unbekanntenen Widerstand  $R_3$  sowie die **Spule** mit 1000 Windungen, von der der Wicklungswiderstand  $R_{Cu}$  zu bestimmen ist.

Beginnen Sie die Messungen mit dem **Widerstand  $R_3$**  unter Verwendung der **analogen Messgeräte** (Polung beachten!). Messen Sie erst **spannungsrichtig** und wechseln danach zur **stromrichtigen** Schaltung (je 3 Wertepaare!). Danach ersetzen Sie die analogen Instrumente durch die **Digitalmultimeter** und wiederholen die Messungen sinngemäß für die **Spule**.

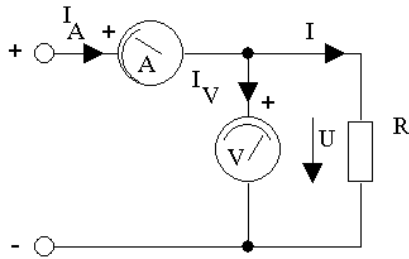


Bild 4  
.....richtig

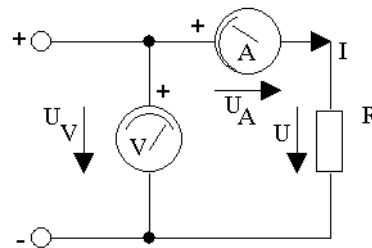


Bild 7  
.....richtig

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass Sie **jede** einzelne Messung gegenüber der vorhergehenden mit **verändertem Messbereich(en)** vornehmen! Die Messbereiche sind Ihnen hier vorgegeben! Generell sind sie so zu wählen, dass der Zeigerausschlag bei den Zeigerinstrumenten möglichst maximal ist (Zeiger im **letzten Drittel des Anzeigebereichs**) und in den Digitalmultimetern möglichst **viele Digits** zur Anzeige kommen! Messen Sie sorgfältig (drei **Ziffern** Genauigkeit!). **Überprüfen Sie bei jeder Messung den vorgegebenen Messbereich! Am Voltmeter sollten Sie möglichst die in der Tabelle empfohlenen Werte einstellen.**

Tragen Sie die Messwerte in nachfolgende Tabelle ein!

Messen Sie **anschließend** noch beide Widerstände mit der **Widerstandsmessfunktion** der Digitalmultimeter!

$R_3$ (analog)	$U$ am Voltmeter ca.	$U_V/V$	MB	$I_A/\mu A$	MB	$R'/\Omega$	$U/V$	$I/\mu A$	$R/\Omega$
U-richtig	9,00 V		10 V		1 mA				
	2,90 V		3 V		1 mA				
	600 mV		1 V		0,1 mA				
I-richtig	9,00 V		10 V		1 mA				
	3,00 V		3 V		1 mA				
	900 mV		1 V		0,1 mA				
mit Ohm-Meter gemessen:					Mittelwert:			Mittelwert:	
					S:			S:	

Spule (digital)	$U$ am Voltmeter ca.	$U_V/V$	MB	$I_A/mA$	MB	$R'/\Omega$	$U/V$	$I/mA$	$R/\Omega$
U-richtig	1,60 V		5 V		500 mA				
	700 mV		5 V		50 mA				
	800 mV		0,5 V		5 mA				
I-richtig	2,00 V		5 V		500 mA				
	500 mV		5 V		5 mA				
	100 mV		0,5 V		500 $\mu A$				
mit Ohm-Meter gemessen:					Mittelwert:			Mittelwert:	
					S:			S:	

( $U_V$  bzw.  $I_A$  Messwerte;  $U$  bzw.  $I$  korrigierte Messwerte; MB - Messbereich; S - Schätzung der Standardabweichung  $\sigma$ )

### Auswertung:

- Korrigieren Sie die durch die verwendete Messschaltung verursachten systematischen Messfehler (Beispielrechnungen dazu in das Protokoll!). Ermitteln Sie den Mittelwert und die Schätzung der Standardabweichung  $S$  des Widerstandes vor und nach der Korrektur und interpretieren Sie kurz und prägnant unter Angabe von Fehlern das Ergebnis! Vergleichen Sie dazu die durch Strom-Spannungs-Messung ermittelten Werte mit den Werten der Widerstandsmessfunktion der MX54c! Geben Sie die Abweichungen an!
- Erstellen Sie zunächst für **jedes** Messobjekt **ein** sorgfältig skaliertes und bemaßtes Diagramm auf **Millimeterpapier**, welches die  $I,U$ -Kennlinien enthält, die sich aus den unkorrigierten Messwerten ergeben (d.h. je eine Kennlinie für die stromrichtige und eine Kennlinie für die spannungsrichtige Messung). Anschließend machen Sie das gleiche für die korrigierten Messwerte! Insgesamt entstehen so 4 Diagramme! Diskutieren Sie auch hier das Ergebnis, indem Sie den Anstieg der korrigierten Kennlinien auswerten!
- Welche Regel lässt sich für die Verwendung der jeweiligen Messschaltung unter Beachtung der stark unterschiedlichen Widerstandswerte aus den Messergebnissen ableiten?

## 2.2 $I,U$ -Kennlinie nichtlinearer Widerstände

### Aufgabe: Aufnahme der $I,U$ -Kennlinie von Dioden und Bestimmung wichtiger Kenngrößen dieser Bauelemente!

Bauen Sie dazu die Messschaltung gemäß Bild 6 auf ( $R = 100 \Omega$ ) und messen Sie für folgende elektrische Größen  $-10 \text{ V}$ ;  $-5 \text{ V}$ ;  $-1,5 \text{ V}$ ;  $-0,5 \text{ V}$ ;  $-0,2 \text{ V}$ ;  $0,5 \text{ mA}$ ;  $1 \text{ mA}$ ;  $2 \text{ mA}$ ;  $5 \text{ mA}$ ;  $10 \text{ mA}$ ;  $15 \text{ mA}$ ;  $20 \text{ mA}$  die jeweils andere Größe.

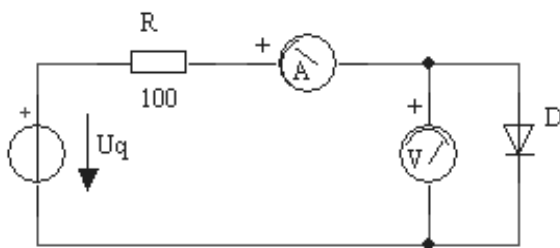


Bild 8  
Messschaltung zur Aufnahme einer Dioden-Kennlinie

Halten Sie die Messwerte zunächst in einer Tabelle fest. Tragen Sie die Messwerte aber möglichst auch schon während des Versuchs in Diagrammform ab (**Millimeterpapier**) um Ausreißer zu erkennen und ggf. noch einmal nachzumessen! Skalieren Sie dabei den Sperrstrom passend zu den Messwerten anders als den Durchlassstrom!

Als Messobjekte verwenden Sie zunächst die **Diode AA 118**. Anschließend ist die Messung für die **Diode 1N4007** zu wiederholen !

*Hinweise!*

Als Spannungsquelle ist wiederum der einstellbare DC-Constanter zu nutzen. Als Messgeräte kommen die **Digitalmultimeter MX54c** zum Einsatz. Achten Sie auf korrekte Polung! Die negativen Spannungswerte realisieren Sie durch **Umpolen** lediglich der Spannungsquelle!

### Auswertung:

- Welcher **Typ Messschaltung** in Bezug auf das Messobjekt wurde hier verwendet? Diskutieren Sie daraufhin die Ergebnisse und korrigieren Sie ggf. die Messwerte!
- Zeichnen Sie die  $I,U$ -Kennlinien in ein gemeinsames Diagramm (Messpunkte dabei deutlich markieren und Kurvenlineal verwenden!)
- Bestimmen Sie an der Kennlinie der Diode 1N4007 den **differenziellen** und den **absoluten** Widerstand bei  $U = -5 \text{ V}$  bzw.  $I = +10 \text{ mA}$  bestimmen. Tragen Sie dazu die erforderlichen Konstruktionen in das Diagramm ein!
- Markieren Sie die **Schleusenspannung**  $U_S$  und den **Sättigungsstrom**  $I_S$  der jeweiligen Diode im Diagramm! Welches Halbleitermaterial kann demnach den Dioden jeweils zugeordnet werden?