



University of Applied Sciences

**HOCHSCHULE
EMDEN·LEER**



Labor

Grundlagen der Elektrotechnik

FB Technik, Abteilung Elektrotechnik und Informatik

Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik B

Versuch B-1

Nichtlineare Zweipole und Transistoren

Name, Vorname:

Matrikel-Nr.:

Gruppe:

WS / SS

Vorbereitung:

Durchführung:

Rücksprachen / Nachbesserungen:

Testat:

1 Versuchsanleitung

1.1 Allgemein

Ein Zweipol ist ein elektrisches Bauelement oder eine elektrische Schaltung mit zwei elektrischen Anschlusspunkten, den Polen oder Klemmen. Dabei wird er so betrieben, dass ein Strom, der von außen in einen Pol hineinfließt, aus dem anderen Pol herausfließt.

Nimmt ein Zweipol elektrische Energie auf, so wird er passiv wirkender Zweipol genannt; gibt er elektrische Energie ab, wird er als aktiv wirkender Zweipol bezeichnet. Manche Zweipole, z.B. der Akkumulator, können je nach Betriebszustand aktiv oder passiv wirken.

Zweipole, die ausschließlich als Verbraucher wirken können, sind passive Zweipole. Ihr Betriebsverhalten wird am besten mit der Strom-Spannungskennlinie (I-U-Kennlinie) dargestellt. Der Quotient

$$R = \frac{U}{I} = f\{U, I, T, B, f, p\} \quad (1)$$

aus Spannung und Strom in einem bestimmten Punkt der I-U-Kennlinie ist der Widerstand R .

Im allgemeinen Fall ist der Widerstand abhängig von den Betriebsgrößen U und I und von den äußeren Parametern wie der Temperatur T , der Flussdichte B , der Frequenz f , dem Druck p etc..

1.2 Definition des statischen und des differentiellen oder dynamischen Widerstands

Bei genauer Betrachtung ist die Beziehung $I = f\{U\}$ immer nichtlinear. Häufig kann man jedoch diese Nichtlinearität vernachlässigen und annehmen, dass zwischen Spannung und Strom der lineare Zusammenhang ("Ohm'sches Gesetz") besteht.

$$U = R \cdot I \text{ oder } R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

Dies ist z. B. für Metalle und homogen dotierte Halbleiter der Fall, sofern man den Temperatureffekt durch Eigenerwärmung vernachlässigt.

In anderen Fällen ist dagegen gerade die Nichtlinearität des Spannungs-Stromzusammenhangs entscheidend für einen erwünschten Effekt, etwa bei Elektrolyten, Elektronenröhren, Halbleiter mit unterschiedlich dotierten Bereichen etc. In diesen Fällen muss die "Kennlinie", d. h. der nichtlineare Zusammenhang zwischen U und I , quantitativ beschrieben werden.

Für Gleichstrom und Wechselströme niedriger Frequenzen reicht eine Beschreibung durch die sog. statische Kennlinie aus. Bild 1 zeigt ein Beispiel, an dem sich die verschiedenen Begriffe erklären lassen. Wird der Zweipol von einem Gleichstrom I_a durchflossen, so stellt sich ein Spannungsfall U_a ein. Der durch U_a und I_a eindeutig definierte Punkt auf der Kennlinie heißt Arbeitspunkt. Das Verhältnis

$$R = \frac{U_a}{I_a} \quad (3)$$

bildet den statischen Widerstand (oder Gleichstromwiderstand). Er ist im Allgemeinen arbeitspunktabhängig. Vom Gleichstromwiderstand zu unterscheiden ist der sog. dynamische oder differentielle Widerstand (manchmal auch als Wechselstromwiderstand bezeichnet).

Den differentiellen Widerstand erhält man bei kleinen Änderungen um den Arbeitspunkt herum. Näherungsweise wird die Beziehung zwischen diesen Änderungen durch die Tangente an die Kennlinie im Arbeitspunkt festgelegt, so dass für den differentielle Widerstand gilt.

$$r = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (\text{Vorzeichen berücksichtigen!}) \quad (4)$$

Der Kehrwert von (4) ist der differentielle Leitwert g . Der differentielle Widerstand bzw. Leitwert ist immer dann maßgebend, wenn kleine Änderungen von Strom und Spannung auftreten, also z. B. bei Aussteuerungen im Arbeitspunkt durch einen Wechselstrom.

Man erkennt aus Bild 1, dass der differentielle Widerstand vom Arbeitspunkt abhängt. Nur bei linearen Zweipolen ($dU/dI = \text{konst.}$) sind statischer und differentieller Widerstand unabhängig vom Arbeitspunkt und überall identisch.

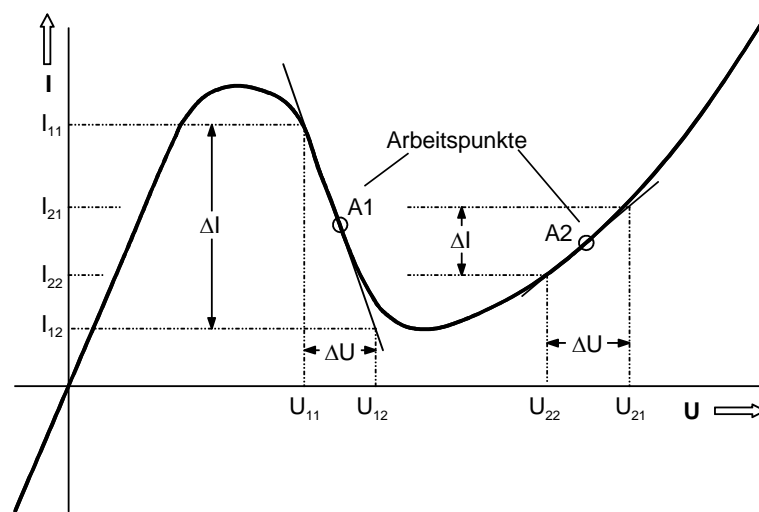


Bild 1: I-U-Kennlinie eines nichtlinearen Zweipols (Tunnel diode)

1.3 Ausführungsformen verschiedener nichtlinearer Zweipole

1.3.1 Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren)

VDR (Voltage-dependend-resistor)-Widerstände werden aus Siliziumkarbid oder Zinkoxyd hergestellt. Das Material wird zu Scheiben gepresst und bei hohen Temperaturen gesintert. Die Kennlinie eines Varistors ist in Bild 2 angegeben.

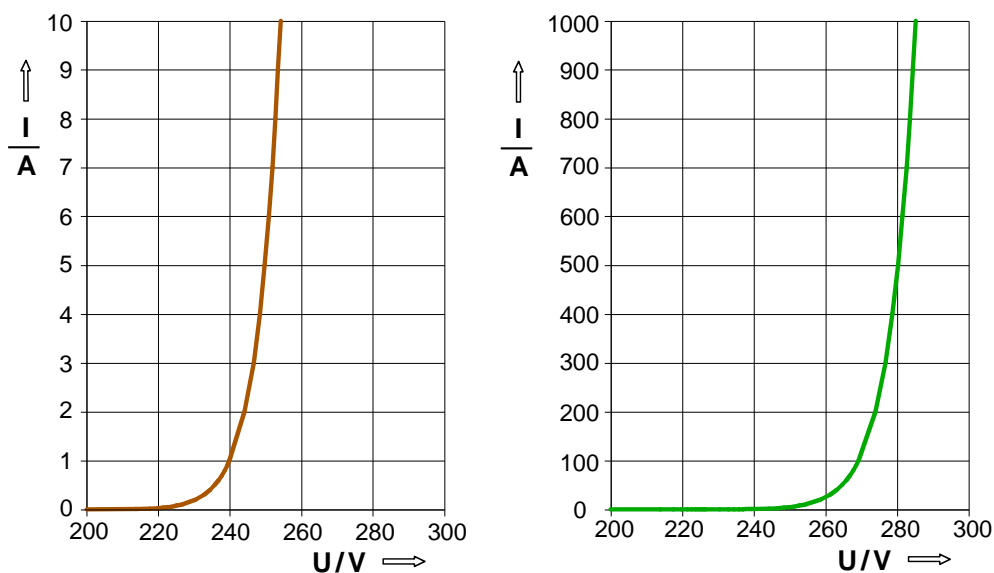


Bild 2: Kennlinien von Varistoren

Analytisch lässt sich der Zusammenhang zwischen U und I durch

$$U = C_R \cdot I^\beta \quad (5)$$

beschreiben. C_R ist eine Werkstoffkonstante (10 - 1000), β liegt zwischen 0,025 und 0,5, wenn die Spannung U in V und der Strom I in A angegeben werden.

Der Gleichstromwiderstand R und der differentielle Widerstand r ergeben sich damit im gewählten Arbeitspunkt zu:

$$R = C_R \cdot I^{\beta-1} \quad r = \frac{dU}{dI} = \beta \cdot R \quad (6)$$

VDR-Widerstände werden hauptsächlich zur Begrenzung von Stoßspannungen und Strömen und zur Spannungsstabilisierung verwendet.

1.3.2 Dioden

Eine große Gruppe nichtlinearer Bauelemente bilden die Richtleiter oder Dioden. Ihr Verhalten in einem Stromkreis wird nicht nur durch die Beträge von U und I bestimmt, sondern auch noch durch deren Richtung.

Die heute eingesetzten Dioden sind fast ausschließlich Halbleiterbauelemente mit dem Grundmaterial Silizium. Ihre Eigenschaften werden durch das Verhalten des sog. p-n-Übergangs im Innern dieser Zweipole bestimmt. Den Zusammenhang zwischen U und I beschreibt angenähert die Gleichung:

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{m \cdot U_T}} - 1 \right) \quad \text{mit } U_T = \frac{k \cdot T}{e} \quad (7)$$

mit Boltzmann-Konstante:	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$
Temperatur	T in K,
Elementarladung:	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} As$
Emissionskoeffizient	$m \quad (1 < m < 2)$
Temperaturspannung:	U_T
theoretischer Sperrstrom der Diode:	I_S

Bei einer Raumtemperatur von $20^\circ C$ beträgt die Temperaturspannung $U_T = 25,3 mV$. Dioden werden vielfältig eingesetzt, z. B. als Gleichrichter, Schalter, Vervielfacher, Kapazitätsdioden etc.. Bild 3 zeigt typische Kennlinien im halb- bzw. doppeltlogarithmischen Maßstab.

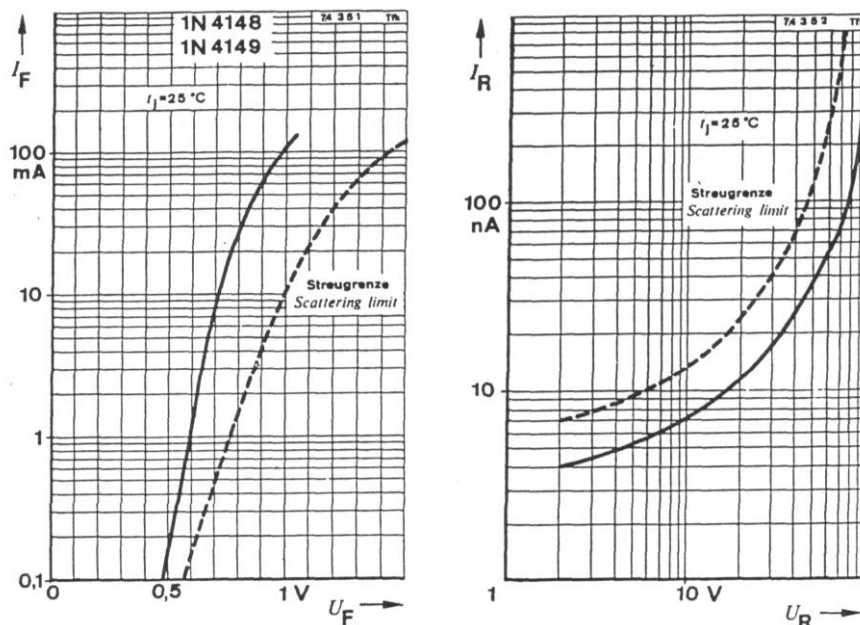


Bild 3: Kennlinien von Siliziumdioden

1.3.3 Z-Dioden

Z-Dioden sind in Sperrichtung betriebene Si-Dioden mit ausgeprägtem Durchbruchverhalten. Der Sperrstrom, der bei einer bestimmten Spannung, der sog. Z-Spannung, steil ansteigt, verteilt sich gleichmäßig über den ganzen Diodenquerschnitt. Daher wird die Diode nicht zerstört, solange eine bestimmte Verlustleistung nicht überschritten wird (siehe Bild 4). Der Durchbruch ist reversibel. Z-Dioden werden zur Spannungsstabilisierung und als Begrenzer eingesetzt.

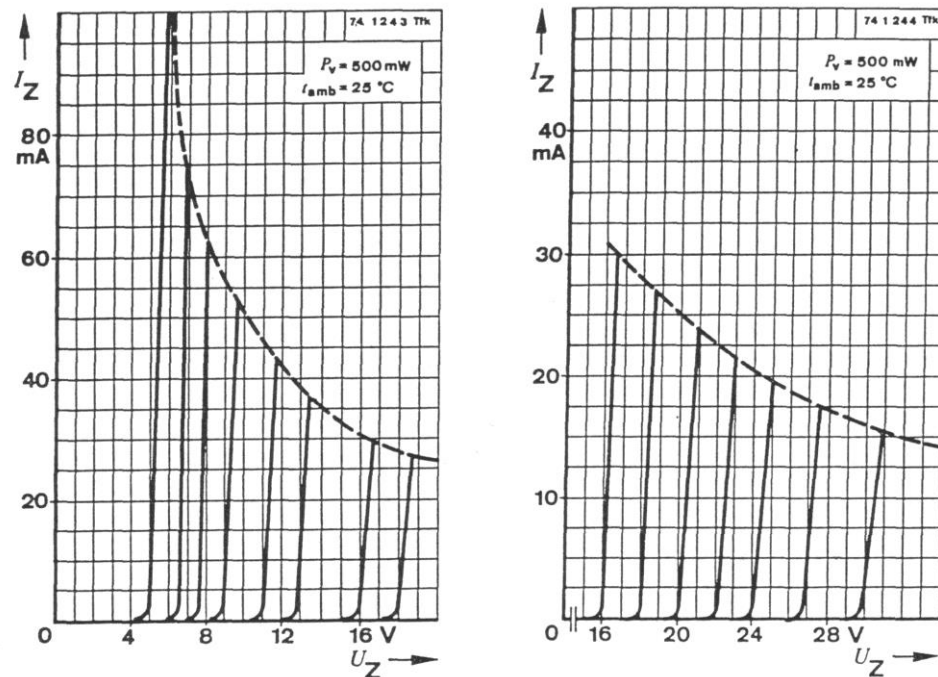


Bild 4: Kennlinien von Z-Dioden

1.3.4 Lumineszenzdioden

Lumineszenz- oder Leuchtdioden sind Halbleiterdioden, die bei Stromzufuhr in Flussrichtung elektromagnetische Strahlung bei Lichtfrequenzen emittieren. Im Gegensatz zu einer Glühlampe ist das Spektrum der Strahlung auf einen schmalen Wellenlängenbereich begrenzt. Die Wellenlänge der emittierenden Strahlung wird im Wesentlichen durch das verwendete Halbleitermaterial begrenzt. Meist wird Galliumarsenid (GaAs) benutzt, was zur Emission im nahen infraroten Bereich des Spektrums führt. Diese Dioden werden in Lichtschranken, in Optokopplern, zur Fernsteuerung, zur Entfernungsmessung usw. benutzt. Für den sichtbaren Spektralbereich werden ebenfalls Leuchtdioden angeboten, sie finden Anwendung als Leuchtmittel, Indikatorlämpchen, Anzeigen usw..

1.3.5 Thermistoren

Thermistoren sind Widerstände mit einer ausgeprägten Temperaturabhängigkeit. Man unterscheidet zwischen Heißleitern, die im warmen Zustand besser als im kalten Zustand leiten, und Kaltleiter, die im kalten Zustand eine höhere Leitfähigkeit besitzen. Heißleiter werden auch als NTC-Widerstände (negativer Temperaturkoeffizient), Kaltleiter auch als PTC-Widerstände (positiver Temperaturkoeffizient) bezeichnet. Heißleiter bestehen aus gepresstem Granulat verschiedener Schwermetalloxide. Der Widerstand wird durch die Beziehung

$$R(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (8)$$

beschrieben. A und B sind Werkstoffkonstanten. Bild 5 zeigt für verschiedene B-Werte den Verlauf des Widerstands in Abhängigkeit von der Temperatur T.

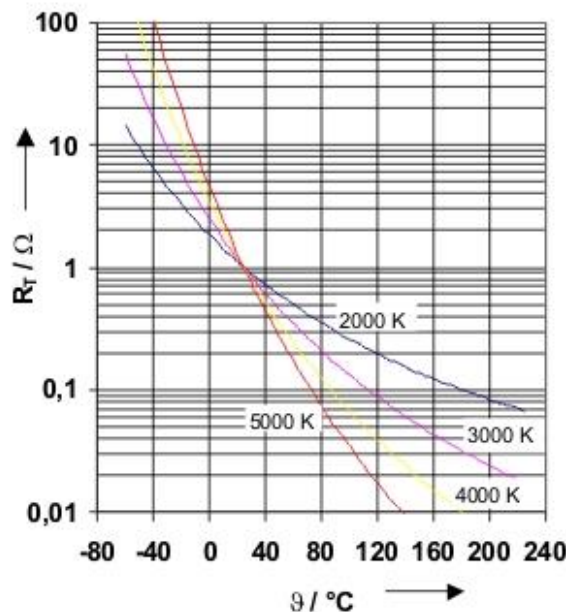


Bild 5: Widerstandskennlinien von NTC-Widerständen mit B als Parameter

Heißleiter werden zur Temperaturmessung, Temperaturkompensation anderer Bauelemente und als sog. Anlassheißleiter eingesetzt. Im letzten Fall dienen sie z. B. zum zeitverzögerten Einschalten von Relais.

1.4 Transistoren

Die Arbeitsweise von bipolaren Transistoren beruht auf der Wirkung von zwei PN-Übergängen innerhalb eines Germanium- oder Silizium-Einkristalls. Transistoren aus Mischkristallen (z.B. Galliumarsenid) sind in der Entwicklung und Erprobung. An den inneren Leitungsvorgängen sind Ladungsträger beider Polarität beteiligt (bipolar). Das Kristall eines NPN-Transistors besteht aus zwei N-leitenden Zonen, zwischen denen sich eine sehr schmale, niedrigdotierte P-leitende Zone (Basis) befindet. Die eine hochdotierte N-Zone wird Emitter genannt, die andere N-Zone heißt Kollektor.

Die Verstärkereigenschaften des Transistors beruhen auf der Ladungsträgerinjektion vom Emitter in den Basisraum. Diese erfordert nur einen kleinen Spannungsbetrag U_{BE} . Der größte Anteil des injizierten Stromes I_E wird von der Kollektorelektrode aufgenommen. Der jetzt genannte Strom I_C lässt sich vom wesentlich kleineren Basisstrom I_B steuern. Mit dem Transistor ist demnach eine Stromverstärkung erreichbar. Der Strom I_C lässt sich gegen die relativ hohe Spannung U_{CB} durch den Lastwiderstand treiben. Da zur Steuerung die kleine Spannung U_{BE} dient, ist eine gewisse Spannungsverstärkung mit dem Transistor möglich. Kleine Basisstromänderungen gehören zu großen Kollektorstromänderungen. Kleine Basisspannungsänderungen führen zu großen Kollektorspannungsänderungen (bez. auf den Emitter).

Die drei Grundschaltungen, in denen sich ein Transistor betreiben lässt, sind die Basisschaltung (Basis an Masse), die Emitterschaltung (Emitter an Masse) und die Kollektorschaltung (Kollektor an Masse). Die häufigste Schaltung ist die Emitterschaltung, mit der sich gleichzeitig eine Strom- und Spannungsverstärkung erzielen lässt. Der Emitter liegt am gemeinsamen Pol des Eingangs- und Ausgangskreises. Die Basis dient dabei als Eingangs-, der Kollektor als Ausgangselektrode. Da Transistorschaltungen üblicherweise mit der Vierpoltheorie berechnet werden, benötigt man für diese Berechnungen die so genannten Vierpolparameter, die das Signalverhalten eines Transistors kennzeichnen.

Um den Arbeitspunkt (Gleichstrom-/Gleichspannungswerte) des Transistors festzulegen, müssen die Eingangskennlinie $I_B = f\{U_{BE}\}$ bei $U_{CE} = \text{konst.}$ und das Ausgangskennlinienfeld $I_C = f\{U_{CE}\}$ mit I_B als Parameter bekannt sein.

2 Vorbereitung

Die Versuchsvorbereitung ist Bestandteil des Versuchs. Sie erhalten dafür ein gesondertes Testat. Ohne testierte Vorbereitung können Sie den Versuch nicht durchführen.

2.1 Dioden

- Skizzieren Sie die Strom-Spannungskennlinie einer idealen Diode.
- Skizzieren Sie die Strom-Spannungskennlinie einer Leuchtdiode (LED 8MM RT von reichelt).
- Diese Diode soll in Reihe mit einem Vorwiderstand an einer Spannungsquelle mit 3 V betrieben werden. Geben Sie das zugehörige Schaltbild an und bestimmen Sie grafisch den benötigten Widerstandswert.
- „3 Werte je Dekade im logarithmisch konstanten Abstand“ Was heißt das? Fertigen Sie dazu eine Skizze an.
- Warum unterscheidet sich die Spannung an der Diode bei der Spannungsfehlerschaltung bei gleichem Strom in den unterschiedlichen Strommessbereichen?
- Wie müssen Sie den Strom bei der Stromfehlerschaltung korrigieren? Leiten Sie her!
- Bereiten Sie mit Excel oder einem vergleichbaren Programm Ihrer Wahl die Tabellen zur Aufnahme der Messwerte vor, so dass nach Eingabe der Messwerte die geforderten Diagramme **automatisch** erstellt werden. Werden nur Messwerte dargestellt, erfolgt die Darstellung als Linie mit Markierung (Kreuz, Dreieck, Quadrat) der Messwerte. Sollen in einem Diagramm der theoretische Verlauf **und** die Messwerte dargestellt werden, so wird der theoretische Verlauf als Linie mit mindestens 100 Stützwerten und die Messwerte mit Kreuz, Dreieck oder Quadrat markiert.

2.2 Transistor

- Skizzieren Sie die Eingangskennlinie eines Transistors (BCY 59-8).
- Skizzieren Sie das Ausgangskennlinienfeld eines Transistors (BCY 59-8).
- Welche Stromverstärkung hat dieser Transistor in etwa und wie kann sie aus den Messwerten ermittelt werden?
- Bereiten Sie mit Excel oder einem vergleichbaren Programm Ihrer Wahl die Tabellen zur Aufnahme der Messwerte vor, so dass nach Eingabe der Messwerte die geforderten Diagramme automatisch erstellt werden. Werden nur Messwerte dargestellt, erfolgt die Darstellung als Linie mit Markierung (Kreuz, Dreieck, Quadrat) der Messwerte. Sollen in einem Diagramm der theoretische Verlauf **und** die Messwerte dargestellt werden, so wird der theoretische Verlauf als Linie mit mindestens 100 Stützwerten und die Messwerte mit Kreuz, Dreieck oder Quadrat markiert.

3 Aufgabenstellung

3.1 Dioden

3.1.1 Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien

Nehmen Sie mit der Schaltung nach Bild 6 die Strom-Spannungs-Kennlinien verschiedener Dioden (Silizium-, Germanium-, Z-Diode) auf (zulässige Grenzwerte bei der Messung beachten!).

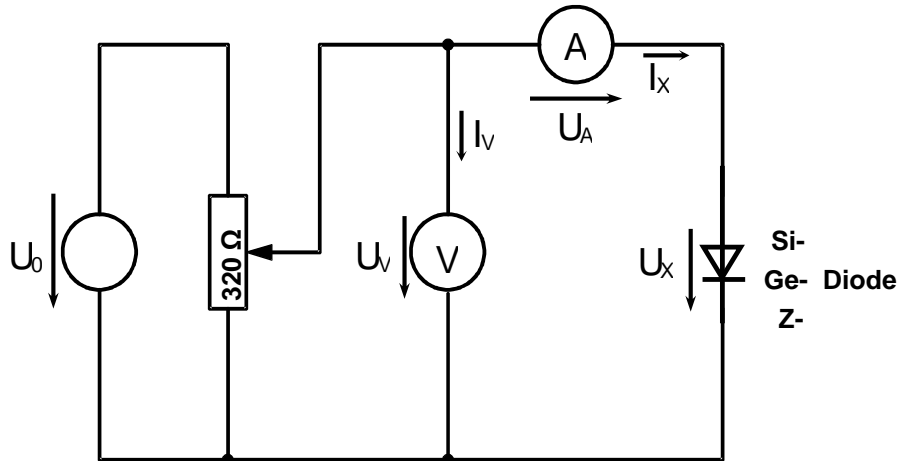


Bild 6: Versuchsaufbau zur Kennlinienaufnahme (Eigenverbrauch der Messinstrumente beachten!)

Die Messung von Spannung und Strom erfolgt mit den analogen Multimetern vom Typ BBC.

a) Silizium Diode

Si-Diode in Sperr- und Durchlassrichtung messen (max. Sperrspannung $U_{SS} = 20 \text{ V}$, max. Durchlassstrom $I_{Dmax} = 1000 \text{ mA}$); 3 Werte je Dekade ab $1 \mu\text{A}$ (logarithmisch konstanter Abstand!) (beim Umschalten der Strommessbereiche bei gleichem Strom in den unterschiedlichen Messbereichen die Spannung messen!).

Wiederholen Sie die Messung in Durchlassrichtung mit der Stromfehlerschaltung!

b) Germanium Diode

Ge-Diode in Sperr- und Durchlassrichtung messen (max. Sperrspannung $U_{SS} = 20 \text{ V}$, max. Durchlassstrom $I_{Dmax} = 30 \text{ mA}$).

Messungen wie in a) aber nur mit der Spannungsfehlerschaltung durchführen.

c) Z-Diode

Z-Diode in Sperr- und Durchlassrichtung messen (max. Strom $I_z = 30 \text{ mA}$). Messungen wie in b) durchführen.

3.2 Darstellung der Zweipol-Kennlinien auf einem Oszilloskop

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 7 auf.

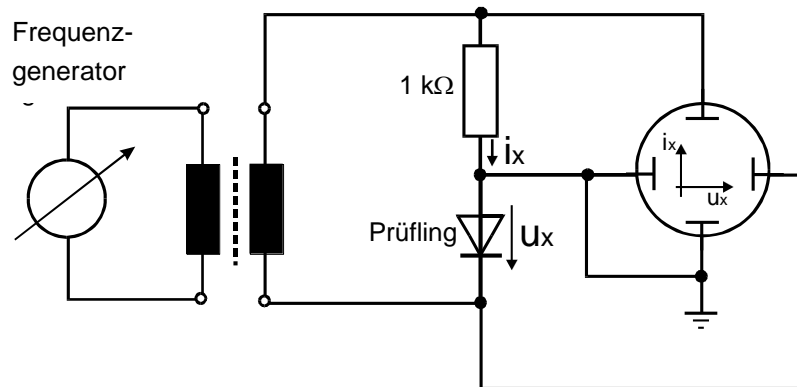


Bild 7: Schaltung zur oszilloskopischen Kennlinienaufnahme

Stellen Sie einen Ohmschen Widerstand, die Si-Diode, die Ge-Diode, die Z-Diode und eine Leuchtdiode auf dem Oszilloskop dar und übernehmen Sie die Kennlinien in die Ausarbeitung. Verwenden Sie die Maßstäbe 2 mA/DIV für den Strom und 1 V/DIV für die Spannung (Mitte des Oszillogramms entspricht Null).

3.3 Temperaturabhängiger Widerstand

3.3.1 Strom-Temperatur-Kennlinie

Nehmen Sie die Strom-Temperatur-Kennlinie eines NTC-Widerstandes auf.

Schaltung nach Bild 6, konstante Spannung $U = 2\text{ V}$, maximale Temperatur 100°C , Temperaturmessung mit einem Digitalthermometer, Heißluftföhn

Beginnen Sie die Messung bei Raumtemperatur.

Erhitzen Sie nun den NTC (Kühlkörper) auf 100°C und nehmen Sie während des Abkühlens die restlichen Messwerte auf, achten Sie dabei auf die Spannung, die während der Messung konstant bei 2 V bleiben soll.

3.3.2 Diode als Ersatz?

Kann eine Diode als Ersatz für einen NTC-Widerstand verwendet werden? Weisen Sie Ihre Aussage durch ein Experiment nach!

3.4 Transistorkennlinien des BD 141

ACHTUNG: Verwenden Sie **kurze verdrehte** Messleitungen und beachten Sie immer **alle** zulässigen Grenzwerte!

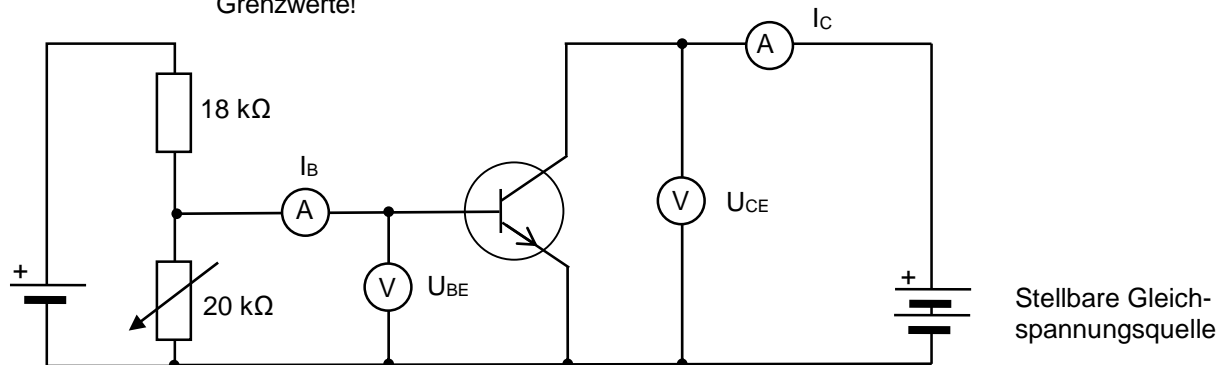


Bild 8: Schaltung zur Aufnahme der Transistorkennlinien

3.4.1 Eingangskennlinie

Nehmen Sie die Eingangskennlinie $I_B = f\{U_{BE}\}$ bei konstanter Kollektor-Emitter-Spannung bei $U_{CE} = 1$ V bis 1 mA nach Bild 8 auf. 3 Werte je Dekade ab 1 μ A im etwa logarithmisch konstanten Abstand.

unbedingt beachten: $P_{tot} \approx U_{CE} \cdot I_C < 0,65$ W und $I_C < 1$ A.

3.4.2 Ausgangskennlinien

Nehmen Sie das Ausgangskennlinienfeld $I_C = f\{U_{CE}\}$ mit dem Basisstrom als Parameter für die Basisströme $I_B = 150 \mu$ A und 300μ A ($0 \leq U_{CE} \leq 10$ V) nach Bild 8 auf; je Parameter ca. 6 Messwerte, z.B. $U_{CE} = 0; 0,2$ V; $0,5$ V; 1 V; 2 V; 5 V und evt. 10 V (Maximalleistung beachten!).

unbedingt beachten: $P_{tot} \approx U_{CE} \cdot I_C < 0,65$ W und $I_C < 1$ A

3.4.3 Ausgangskennlinien auf dem Oszilloskop

Stellen Sie mit Hilfe der Schaltung nach Bild 9 das Ausgangskennlinienfeld auf einem Oszilloskop dar. Strommaßstab 20 mA / DIV und Spannungsmaßstab 1 V / DIV. (Der untere linke Punkt im Oszillogramm entspricht dem Bezugspotential).

Das Oszillogramm ist in die Ausarbeitung aufzunehmen.

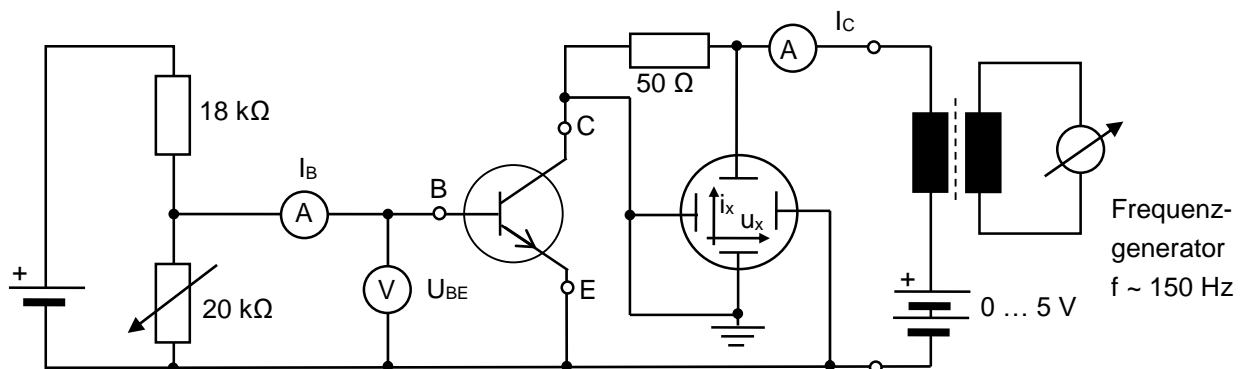


Bild 9: Schaltung zur Aufnahme des Transistorausgangskennlinienfeldes mit dem Oszilloskop (Nullpunkt des Oszilloskops auf unteren linken Koordinatenpunkt)

4 Auswertung

4.1 Dioden

- a) Stellen Sie die Kennlinien im linearen Maßstab dar, benutzen Sie dazu die korrigierten Messwerte (Spannungsfehlerschaltung beachten, Durchlassrichtung und Sperrrichtung unterschiedliche Maßstäbe, ggf. je zwei Diagramme).
- b) Berechnen Sie die Kennlinie der Si-Diode nach Gleichung 7, ermitteln Sie den Sperrstrom I_s und den Emissionskoeffizienten m aus den Messungen. (Tipp: Den Emissionskoeffizienten bestimmen Sie, indem Sie zwei Messwerte in Gleichung 7 einsetzen und beide Gleichungen dividieren, so dass der Sperrstrom gekürzt werden kann. Diese Gleichung kann nun nach m umgestellt werden.)
- c) Stellen Sie die gemessene und berechnete Kennlinie der Si-Diode im halblogarithmischen Maßstab dar (berechnete Kennlinie als Linie, Messwerte als Punkte).
- d) Beschriften Sie die fünf aufgenommenen Oszillogramme eindeutig.

4.2 Temperaturabhängiger Widerstand

- a) Ermitteln Sie für jeden Messwert den Widerstand (Spannungsfehlerschaltung beachten!)
- b) Berechnen Sie die Widerstandskennlinie näherungsweise nach Gleichung 8. Die Werkstoffkonstanten A und B sind aus den Messwerten bei minimaler und maximaler Temperatur zu ermitteln.
- c) Stellen Sie beide Kennlinien in einem Diagramm da (berechnete Kennlinie als Linie, Messwerte als Punkte).
- d) Vergleichen Sie die Kennlinien.

4.3 Transistor

- a) Stellen Sie die Eingangskennlinien nach 3.4.1 im linearen Maßstab in einem Diagramm dar.
- b) Stellen Sie das Ausgangskennlinienfeld nach 3.4.2 im linearen Maßstab in einem Diagramm dar.
- c) Beschriften Sie das aufgenommene Oszillogramm eindeutig.