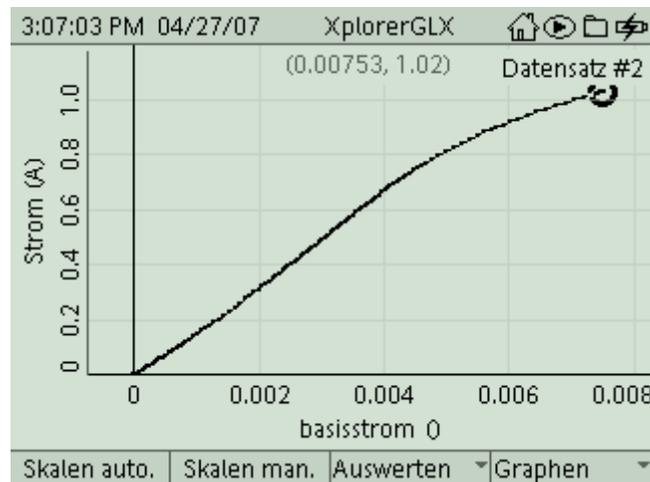


Kennlinien eines Transistors


Klassenstufe	Oberthemen	Unterthemen	Anforderungs-niveau	Durchführungs-niveau	Vorlauf Vorbereitung Durchführung
SI	Elektrizitätslehre	Halbleiter-Bauelemente	●●	■ ■	- 0 - 15 Min 45 Min

Lehrziele

- die Schüler untersuchen den Zusammenhang zwischen Basisstrom und Kollektor-Emitter-Strom an einem Transistor (fachlicher Inhalt)
- die Schüler nehmen eine $I_{\text{Basis}}-I_{\text{Kollektor}}$ -Kennlinie mit Hilfe eines Strom-/Spannungssensors und dem Messinterface Xplorer GLX durch, sie ermitteln den Basisstrom dabei über die Spannungsmessung am Basisvorwiderstand und verwenden das Tool **Rechner** (technische Kompetenz)
- die Schüler bestimmen den Verstärkungsfaktor des Transistors (Methodenkompetenz)

Einführung

Der Transistor ist das wichtigste Primärbauteil auf Halbleiterbasis. Er ist aus fast keiner diskreten Schaltung, vor allem aber aus keinem internen Aufbau eines integrierten Schaltkreises oder Mikrokontrollers wegzudenken. Dazu sind seine Eigenschaften mit typischen Schulmitteln gut zugänglich und mit den üblichen Modellen vom Halbleiter auch noch ganz gut erklärbar. Insbesondere das Steuerverhalten des Transistors steht im Vordergrund des Experiments.

Dieser Versuch kann natürlich auch gut mit analogen Messinstrumenten durchgeführt werden. Interessant wird der Einsatz der Messwerterfassung vor allem dann, wenn man mehrere Transistoren miteinander vergleichen will (spannend ist hierbei die Fertigungsstreuung von baugleichen Exemplaren) oder wenn man weitere Zusammenhänge untersucht. In der Anleitung wird erklärt, wie man eine Messkurve für den Verstärkungsfaktor gewinnt. Schnelle Gruppen können außerdem leicht die Abhängigkeit des Kollektorstroms von der Basis-Emitter-Spannung untersuchen. Der Aufwand bei der Einstellung der Messparameter relativiert sich dann schnell.

Notwendiges Material

Transistor (z.B. BD 137)
Widerstand, z.B. 470 Ohm
Stromversorgung: 4 V Gleichspannung
Potentiometer
Leitungen

Xplorer GLX
Strom-/Spannungssensor

Didaktische und methodische Hinweise

Im Anhang finden sich ein Handbuch sowie ein Schülerarbeitsblatt.

Das Handbuch ist als Lehrsaalexemplar gedacht und sollte jeder Arbeitsgruppe in einem Schnellhefter oder Ordner zur Verfügung stehen, es führt die Schüler step-by-step durch den Versuch und erläutert insbesondere sehr ausführlich die Bedienung des Xplorer GLX. Das Schülerarbeitsblatt enthält eine Kurzfassung von Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung (zur häuslichen Wiederholung) sowie Fragen zur Auswertung der Versuchsergebnisse. Der Schaltplan im Handbuch und im Schülerarbeitsblatt sollte eigentlich universell verwendbar sein, lediglich die technischen Daten für Transistor, Basisvorwiderstand und Potentiometer wird man vermutlich an das vorhandene Praktikumsmaterial anpassen. Die Auswahl des Vorwiderstandes richtet sich insbesondere nach der eingesetzten Maximalspannung und der typischen Basisstromstärke für den eingesetzten Transistor. Die Belastbarkeit des Potentiometers (Spannungsteiler) stellt hier sicherlich keine Einschränkung dar. Als Stromquelle eignet sich ebenso eine zentrale Versorgung im Praktikumsraum (Restwelligkeit prüfen), dann muss man hier natürlich auch den Text ändern. Um das Potentiometer kommt man nicht herum, da man eine konstante Spannung für die Kollektor-Emitter-Strecke und gleichzeitig eine regelbare Spannung für die Basisstrecke anbieten muss. Transistor, Spannung und Basisvorwiderstand sollten so gewählt werden, dass man auch in den nicht-linearen Bereich der Transistorkennlinie gelangt. Allerdings war die Fertigungsstreuung der getesteten Exemplare so groß, dass keine einheitlichen Werte für alle (baugleichen!) Exemplare angegeben werden konnten. Deshalb wird im Handbuch an dieser Stelle auf die mögliche Streuung der Versuchsergebnisse eingegangen. Zudem kann man in Abhängigkeit vom verwendeten Transistortyp auch an die Grenze des Stromsensors (1 A) gelangen. Der Sensor ist zwar gegen Überlast geschützt und zeigt die Überschreitung des Messbereichs durch Piepsen an, dennoch sollte man die Überschreitung des Messbereichs natürlich schon durch die Auswahl des Transistors ausschließen. Auf der Kollektor-Emitter-Strecke wurde bewusst auf einen Verbraucher (Widerstand, Lampe) verzichtet, da dessen Kennlinie die Messung beeinflussen würde.

Die Schüler bauen zunächst die Schaltung entsprechend dem Schaltplan auf. Der korrekte Einbau des Stromsensors ist zu prüfen, allerdings ist er gegen Kurzschluss gesichert, so dass er auch bei fehlerhaftem Einsatz nicht beschädigt wird. Der Sensor wird automatisch erkannt, lediglich die Abtastrate muss den spezifischen Bedürfnissen angepasst werden (das wird in der Anleitung ausführlich erklärt). Da der Sensor nur einen Strommesseingang anbietet, muss die zweite Stromstärke über eine Spannungsmessung ermittelt werden. Dafür bietet sich der ohnehin schon vorhandene Basisvorwiderstand an. Dessen Wert kann man durch separate Messung bestimmen oder einfach den angegebenen Wert verwenden, eine Toleranz an dieser Stelle spielt für das grundsätzliche Versuchsergebnis keine Rolle. Nach Eingabe einer geeigneten

GLX 19: Kennlinien eines Transistors

Umrechnungsformel (Widerstandsdefinition) übernimmt dann das GLX die Umrechnung in Echtzeit. Zunächst muss allerdings in der graphischen Darstellung die x-Achse noch mit dem Datensatz für den Basisstrom belegt werden (Standardeinstellung ist hier immer Zeit). Auch das ist im Handbuch ausführlich erklärt. Beim Hochregeln der Basisstromstärke wird dann die Messreihe automatisch aufgenommen. Die Analyse erfolgt primär qualitativ und kann sowohl am Display des GLX als auch an Hand des ausgedruckten Messgraphen erfolgen. Dabei passt die Untersuchung von Graphen ausgezeichnet zu den derzeit aktuellen didaktischen Zielsetzungen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Bei der Berechnung der Stromverstärkung über die gesamte Messkurve zeigt sich dann die Stärke einer Messwerterfassung. Dass sich dabei dieselben Werte ergeben, die die Schüler zuvor bereits per Hand für einzelne Messpunkte berechnet haben, stärkt das Vertrauen in die Messtechnik.

Sofern Zeit bleibt, kann jetzt mit ganz geringem Aufwand noch die Abhängigkeit der Kollektorstromstärke von der Basis-Emitter-Spannung untersucht werden. Die Kennlinie zeigt schön die typische Form einer Diodenkennlinie (Basis-Emitter-Strecke).

Hinweis zum Zeitbedarf

Andere Versuche aus der Elektrizitätslehre sind für einen Ersteinsatz von GLX und Stromsensor sicherlich besser geeignet, dennoch ist auch hier ein Ersteinsatz prinzipiell möglich. Vielleicht hat man den Versuch ja bereits mit analoger Messtechnik durchgeführt und wiederholt ihn dann mit der Messwerterfassung, um die Schüler mit den Geräten vertraut zu machen. Die Bedienung ist (inklusive aller Einstellarbeiten) ausführlich erklärt. Aufgrund der gestaffelten Versuchsdurchführung lässt sich das Experiment in 45 min gut durchführen. Die Einstellungen der Mess- und Darstellungsparameter erscheint auf den ersten Blick recht kompliziert, gelingt aber schneller als erwartet. Langsamere Gruppen werden vielleicht nur die Aufnahme der ersten Kennlinie schaffen, womit das Hauptziel des Experiments aber erreicht ist. Schließlich wurde die Auswertung so gestaltet, dass sie an Hand des Schülerarbeitsblattes auch zu Hause durchgeführt werden kann. In diesem Fall arbeiten die Schüler mit der ausgedruckten Messkurve oder mit ihrem Datensatz, den sie per USB-Stick oder MP3-Player nach Hause nehmen und dort mit der entsprechenden Messsoftware Datastudio (Download unter www.pasco.com) bearbeiten. Die Besprechung und Ergebnissicherung erfolgt dann in der folgenden Unterrichtsstunde. Hier wird auch ein GLX-Simulator bereitgestellt, so dass die Schüler mit der aus dem Praktikum vertrauten Ansicht arbeiten können. Schnellere Gruppen können die Kennlinie für die Stromverstärkung mit dem Tool **Rechner** ermitteln und zudem noch eine U_{BE} - I_C -Kennlinie aufnehmen.

Erweiterung

Falls mehr Zeit zum Experimentieren zur Verfügung steht, können auch mehrere Transistoren gleichen Typs (Fertigungsstreuung) oder verschiedener Typen verglichen werden.

Arbeitsblatt (-blätter)

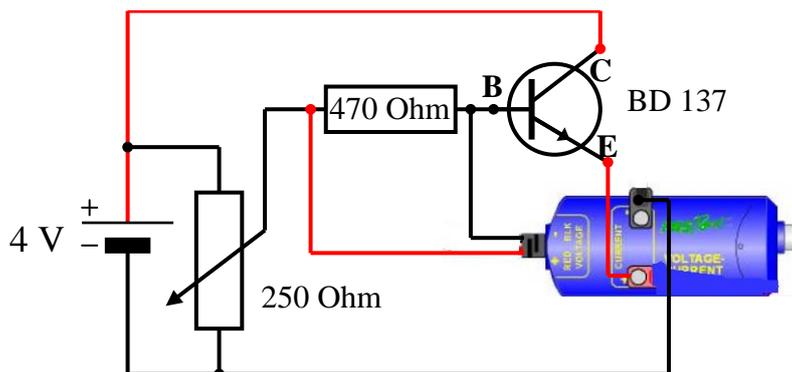
- Handbuch für den Experimentierraum (6 Seiten farbig, ein Exemplar pro Gruppe)
- Schülerarbeitsblatt (1 Seite s/w, zum Kopieren für je den Schüler)

Aufgabe:

Transistoren sind elektronische Schaltelemente, die als wichtiger Bestandteil in vielen diskreten Schaltungen aber auch als Komponente innerhalb von integrierten Schaltkreisen (IC's) und Computerchips unabdingbar sind. In diesem Experiment untersuchen wir an einem Transistor den Zusammenhang zwischen dem an der Basis eingespeisten „Steuerstrom“ und dem über die Kollektor-Emitter-Strecke fließenden „Arbeitsstrom“.

Versuchsaufbau:

1. Baue den Stromkreis gemäß Schaltplan auf. Setze dabei einen Transistor BD 137 ein. Der Widerstand (470 Ω) ist zur Strombegrenzung unabdingbar, sonst wird der Transistor durch einen zu hohen Basisstrom zerstört. Schalte das Netzgerät noch nicht ein. **Beachte insbesondere den korrekten Einbau des Potentiometers** (bei falschem Einbau kann es leicht zerstört werden).
2. Verwende den Spannungs-/Stromsensor (Voltage/Current). Die fest angebrachten Messleitungen, die zur Spannungsmessung dienen, schließt Du direkt an den Widerstand an. Die Strommessung erfolgt über separate Messleitungen an den Buchsen auf der Oberseite des Sensors (Current, beim Einstecken am Sensor gehalten). Füge damit den Sensor als Amperemeter in den Stromkreis ein (siehe Schaltplan). Beachte die Polung und vermeide Kurzschluss.



Versuchsdurchführung (Bedienung des GLX):

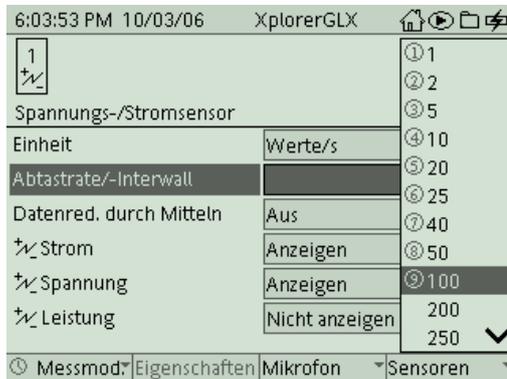
1. Schließe den Netzadapter am GLX an oder schalte es mit  ein.
2. Stecke den Spannungs-/Stromsensor (Voltage/Current) vorsichtig (**ohne zu verkanten**) am GLX im Port 1 ein. Dabei öffnet automatisch folgendes Messfenster:



3. In der Digitalanzeige werden bereits laufend die aktuellen Messwerte dargestellt. Wir passen zuerst noch unseren Sensor an die spezifischen Anforderungen dieses Versuches an. Wechsle dazu mit  ins Hauptmenü und dann mit  in das

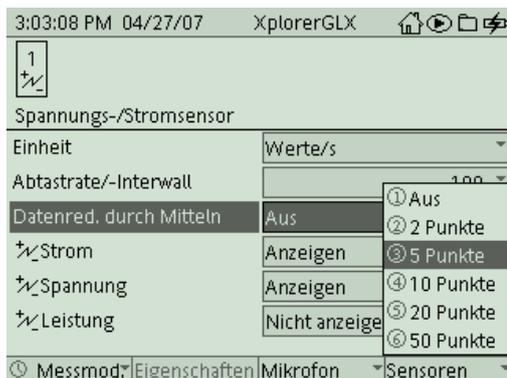


Menü **Sensoren** :



Wähle das Feld *Abtaste-/Interwall* mit  und aktiviere es mit . Wähle dann mit  und  den Wert 100 (das bedeutet, dass das GLX während der Messung 100 Messwerte pro Sekunde aufnehmen wird).

4. Wähle das Feld *Datenreduktion durch Mitteln* mit  und aktiviere es mit . Wähle dann mit  und  den Wert 5 (das bedeutet, dass das GLX jeweils 5 Messwerte zusammenfasst und aus diesen einen Wert durch Mittelung bestimmt, das führt zu einer Glättung der Messkurve).

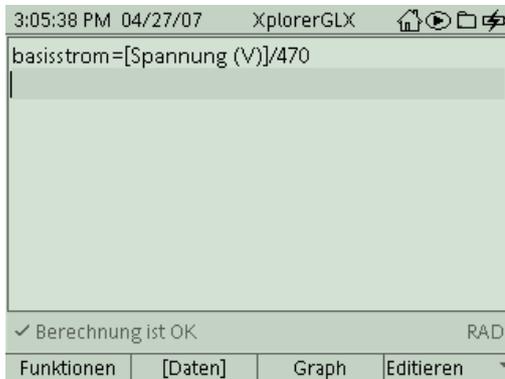


5. In unserem Experiment wollen wir gleichzeitig zwei verschiedene Ströme messen, den an der Basis und den am Emitter des Transistors. Allerdings bietet der Strom-/Spannungssensor nur einen Messeingang für Strom an. Die am (bekannten) Basisvorwiderstand abgegriffene Spannung kann allerdings leicht zur Ermittlung des



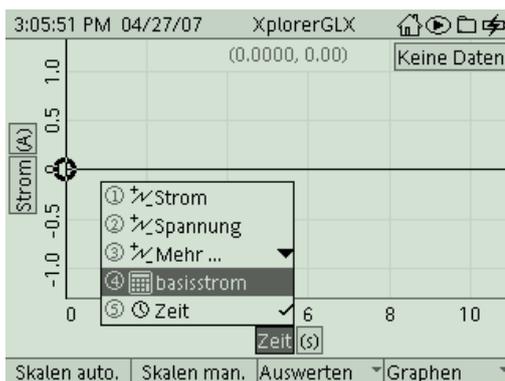
Basisstromes dienen. Wechsle hierzu mit  und  ins Menü **Rechner** und gib über die Zifferntasten eine passende Umrechnungsformel ein (falls sich über die Tasten keine Buchstaben generieren lassen, musst Du zunächst über *Editieren* die Zifferntastensperre deaktivieren). Für die Formel darfst Du den auf dem Widerstand angegebenen Wert Widerstand verwenden. Einheiten werden im Formelrechner nicht

verwendet. Bezeichnungen von neuen Größen und Rechenzeichen gibst Du direkt mit den Tasten ein, Bezeichnungen von Datensätzen (Strom, Spannung) wählst Du im Untermenü *[Daten]* () aus. (Im Untermenü *Funktionen* gibt's übrigens noch eine ganze Menge an zusätzlichen mathematischen Operationen, die wir für diese Versuchsauswertung allerdings nicht benötigen).



Die Eingabe wird mit  abgeschlossen. Wenn der Rechner mit Deiner Eingabe auch etwas anfangen kann, zeigt er dies unten links an (das verhindert eine falsche Rechensyntax, zum Beispiel durch Tippfehler). Mit  kehrst Du wieder ins Hauptmenü zurück und wechselst mit  ins Menü *Graph*.

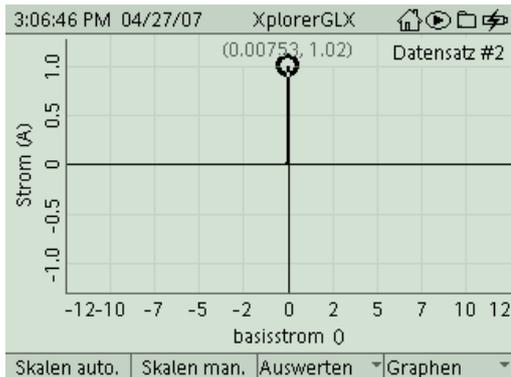
- Es erscheint ein Messfenster, in dem der Strom gegen die Zeit aufgetragen wird. Um auf der x-Achse den Basisstrom anzutragen, müssen wir die Belegung der x-Achse ändern. Durch die Tastenkombination ,  und  kannst Du die Achsenbelegung *Zeit* invertieren und ein Pulldown-Menü öffnen, aus dem Du die Rechengröße *Basisstrom* auswählst (Bestätigung mit ).



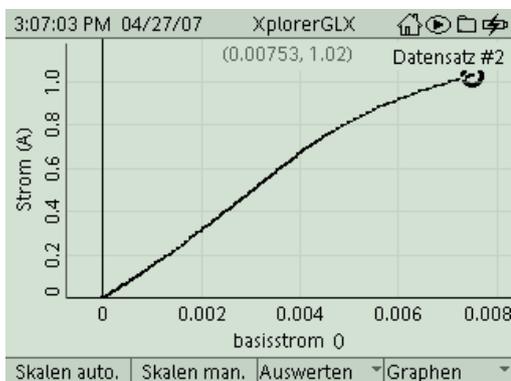
Die Skalierung der Achsen zu Beginn richtet sich einfach nach den Maximalwerten des Sensors (10 V, 1 A). Nach der Messung werden wir diese noch anpassen.

- Drehe den Regler am Potentiometer ganz nach links. Vergewissere Dich, dass der Einstellregler am Netzgerät auf 0 V gedreht ist (ganz links). Schalte das Netzgerät ein und regle die Spannung auf **ungefähr 4 V** ein (**Einbauinstrument am Gerät beachten, diese Einstellung bleibt während des gesamten Experiment fest**). Nun kannst Du mit dem Regler am Potentiometer die Spannung von 0 V bis 4 V durchregeln (von links nach rechts).

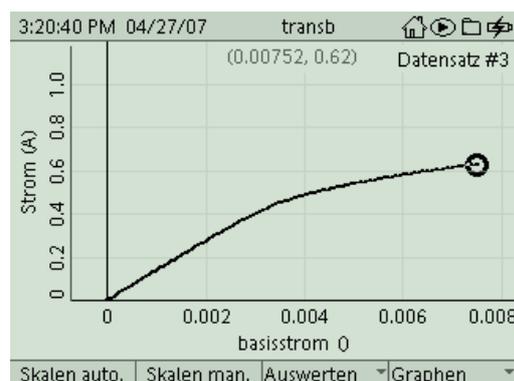
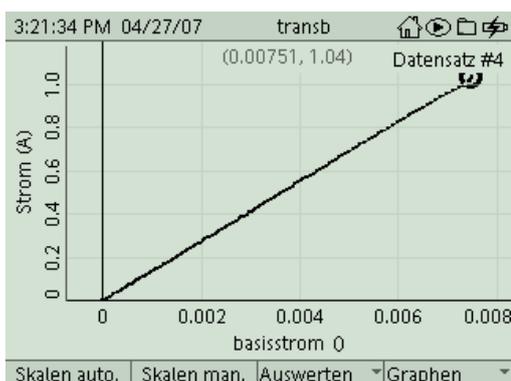
8. Beginne die Messaufzeichnung mit , drehe den Regler am Potentiometer zügig und gleichmäßig von links nach rechts und beende die Messung sofort wieder mit  (die gesamte Aufzeichnung sollte nur einige Sekunden dauern). **Sollte der Sensor während der Messung piepsen, dann beende die Messung und drehe den Regler am Potentiometer sofort wieder zurück** (in diesem Fall hat der Überlastungsschutz des Stromsensors angesprochen, wir betreiben den Sensor hier in seinem Grenzbereich). Die Messung erscheint zunächst sehr unscheinbar, da die Änderung des Basisstroms minimal ist (bezogen auf die Skalierung der x-Achse).



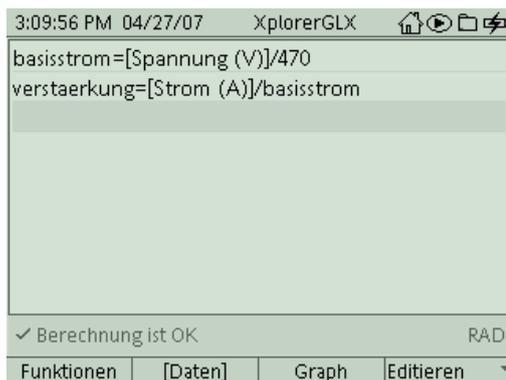
9. Drehe zunächst den Regler am Potentiometer wieder zurück (der Transistor überhitzt im längeren Betrieb). Aktiviere dann mit  die Funktion **Skalieren automatisch**, um das Graphikfenster optimal an die Messkurve anzupassen (falls Du mit der Messreihe nicht zufrieden bist, kannst Du die Messung jederzeit wiederholen).



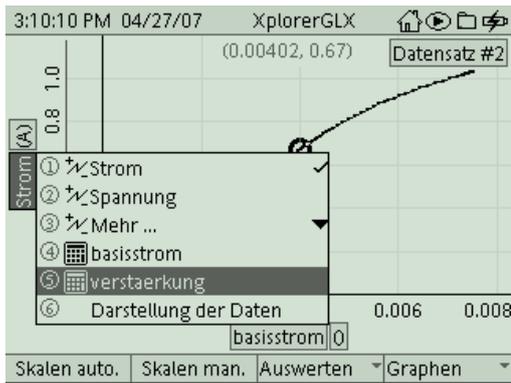
Unter Umständen zeigt deine Messkurve qualitativ eine andere Form (siehe Beispiele unten), das hängt mit der Streuung der Transistoren bei der Fertigung zusammen.



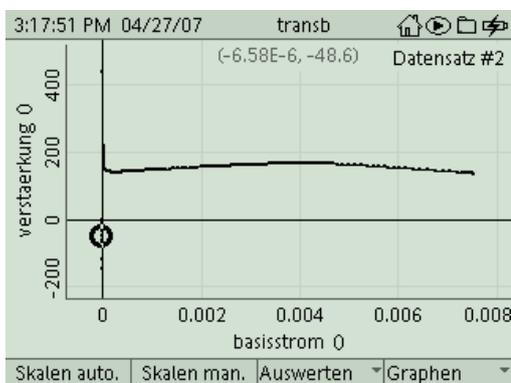
10. Jetzt kannst Du Deine Messkurve ausdrucken. Hierzu musst Du aber die Steckverbindungen am GLX lösen und es per USB am Drucker anschließen. Mit **F4** gelangst Du in das Untermenü *Graphen* und druckst dann mit dem Befehl **Drucken** und **OK** (**F1**).
11. Schau Dir die Messkurve einmal genau an. Wie hängen Basisstrom und (Kollektor-)Strom miteinander zusammen? Ändert sich dieses Verhalten unter Umständen im Verlauf der Messreihe? (Bei der ersten und dritten der abgebildeten Messkurven sprechen wir von einer Nicht-Linearität. Diese tritt insbesondere dann auf, wenn der Transistor die Grenze seiner Leistungsfähigkeit erreicht).
Vergleiche vor allem auch die Größenordnung von Basisstrom und (Kollektor-)Strom. Welcher von beiden ist größer? Wie groß ist der Unterschied?
Dieses Verhalten ist ganz typisch für Transistoren und kennzeichnet auch deren typischen Einsatzzweck.
Berechne an Hand eines Messpunktes das Verhältnis von (Kollektor-)Strom und Basisstrom (dieses Verhältnis nennt man Verstärkung oder Verstärkungsfaktor).
Notiere Deine Erkenntnisse zunächst auf Deinem Arbeitsblatt. (Auswertung 1.-4.)
12. Das Verhältnis von (Kollektor-)Strom und Basisstrom können wir auch vom GLX für alle Messwerte automatisch berechnen lassen. Wechsle dazu wieder in das Tool *Rechner* (**F3**) und gib eine passende Berechnungsformel an. Bezeichnungen von neuen Größen und Rechenzeichen gibst Du direkt mit den Tasten ein, Bezeichnungen von Datensätzen (Strom, Basisstrom) wählst Du im Untermenü *[Daten]* (**F2**) aus. Die eckigen Klammern werden automatisch generiert und zeigen, dass es sich hier um einen Messdatensatz handelt (beim Basisstrom handelt es sich ja um berechnete Daten, deshalb erscheinen hier keine Klammern). Du schließt die Eingabe wieder mit  ab.



Mit  kehrst Du wieder ins Hauptmenü zurück und wechselst mit **F1** ins Menü *Graph*. Dort musst Du noch die y-Achse mit der neuen Größe „verstaerkung“ belegen (falls Du nicht mehr weisst, wie das geht, dann schau noch mal in Schritt 6. nach).

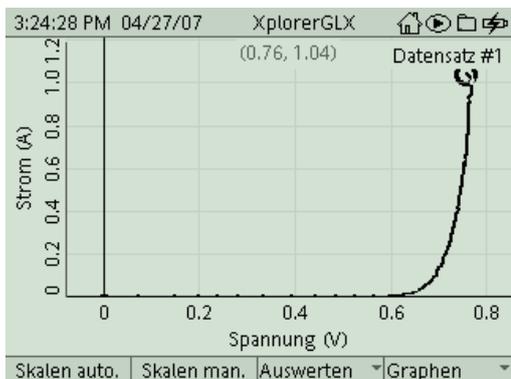


13. Im Diagramm für den Verstärkungsfaktor solltest Du den Wert, den Du in Schritt 10. von Hand berechnet hast, ungefähr wieder finden. Im abgebildeten Diagramm zeigt sich aber auch, dass dieser Wert über die gesamte Messkurve nicht konstant ist.



Weitere Auswertemöglichkeiten

14. Wenn Du noch Zeit hast, kannst Du noch eine andere Kennlinie am gleichen Transistor ausmessen. Hier geht es um den Zusammenhang zwischen der Spannung, die man zwischen der Basis und dem Emitter des Transistors abgreifen kann (Basis-Emitter-Spannung) und dem (Kollektor-)Strom. Schließe die Messleitungen, die am Sensor fest angebracht sind, an der Basis (B) und am Emitter (E) an (Polungrichtung wie vorher, also + an B und – an E). Zeichne nun wieder eine Messkurve genauso wie in Schritt 8. auf. **Drehe auch hier das Potentiometer nach der Messaufzeichnung wieder ganz nach links, um den Transistor wieder abzuschalten.** Auch bei diesem Versuch zeigt sich das Messergebnis erst nach **automatisch skalieren** () deutlich. Kommt Dir diese Messkurve bekannt vor?

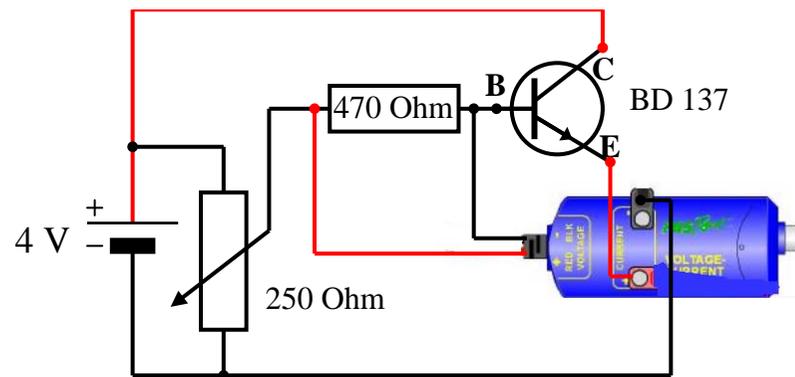


Aufgabe:

Transistoren sind elektronische Schaltelemente, die als wichtiger Bestandteil in vielen diskreten Schaltungen aber auch als Komponente innerhalb von integrierten Schaltkreisen (IC's) und Computerchips unabdingbar sind. In diesem Experiment untersuchen wir an einem Transistor den Zusammenhang zwischen dem an der Basis eingespeisten „Steuerstrom“ und dem über die Kollektor-Emitter-Strecke fließenden „Arbeitsstrom“.

Sicherheitshinweise:

Der Widerstand (470 Ω) begrenzt den Basisstrom und muss unbedingt eingebaut werden. Um eine vollständige Kennlinie aufzunehmen wird der Transistor im Grenzbereich betrieben, der Strom sollte nach Aufnahme der Kennlinie deshalb sofort wieder herunter geregelt werden.



Aufbau und Durchführung:

Eine ausführliche Anleitung findest Du im „Experimentierhandbuch Explorer GLX“ unter der Nummer 19.

1. Baue den Stromkreis gemäß Schaltplan auf. Achte dabei auf die Anschlüsse **B**asis, **C**ollektor und **E**mitter am Transistor.
2. Verwende den Datenlogger Explorer GLX zur Messung des Basisstroms (indirekt über Spannungsmessung) und des Kollektor-Emitter-Stroms.
3. Starte die Messung und erhöhe den Basisstrom mit Hilfe des Potentiometers. Der Kollektor-Emitter-Strom wird in Abhängigkeit vom Basisstrom aufgezeichnet.

Auswertung:

1. Gib mit Hilfe einer Formel an, wie Du aus der Spannung am Basis-Vorwiderstand die Basisstromstärke berechnen kannst!
2. Welche Kurvenform zeigt das I_{Basis} - $I_{Kollektor}$ -Diagramm zunächst?
 o Ursprungsgerade o Parabel o konstante Funktion
3. Bei kleinen Basisströmen ...
 o lässt der Transistor den Strom fast ungehindert durch
 o unterbindet der Transistor den Strom
 o sind Basisstrom und Kollektorstrom proportional
4. Unter Umständen zeigt Deine Kennlinie gegen Ende ein davon abweichendes Verhalten. Im Gegensatz zum Beginn steigt der Kollektorstrom gegen Ende
 o langsamer o schneller
 Diese Nicht-Linearität sorgt beim Ausregeln von Audioverstärkern für Verzerrungen bei der Wiedergabe.
5. Vergleiche die Größenordnungen von Basisstrom und Kollektorstrom!
 o der Basisstrom ist größer als der Kollektorstrom
 o Basisstrom und Kollektorstrom sind ungefähr gleich
 o der Kollektorstrom ist erheblich größer als der Basisstrom
 o der Kollektorstrom ist etwas größer als der Basisstrom
6. Berechne den Verstärkungsfaktor des Transistors für verschiedene Stromstärken!

I_{Basis} in mA			
$I_{Kollektor}$ in mA			
$I_{Kollektor} / I_{Basis}$			

Ergebnis:

Ein Transistor kann mit einem kleinen Basisstrom einen Kollektorstrom steuern. Diese Fähigkeit macht ihn zum wichtigsten Steuerelement in elektronischen Schaltungen. Insbesondere für kleine Ströme erfolgt dabei die Steuerung des Kollektorstromszum Basisstrom. Das Verhältnis von Kollektorstrom und Basisstrom (Proportionalitätsfaktor) heißt Verstärkungsfaktor (kurz Verstärkung) des Transistors.