

Ein Experimentiergerät

Aus dem 1960 erschienenen Buch

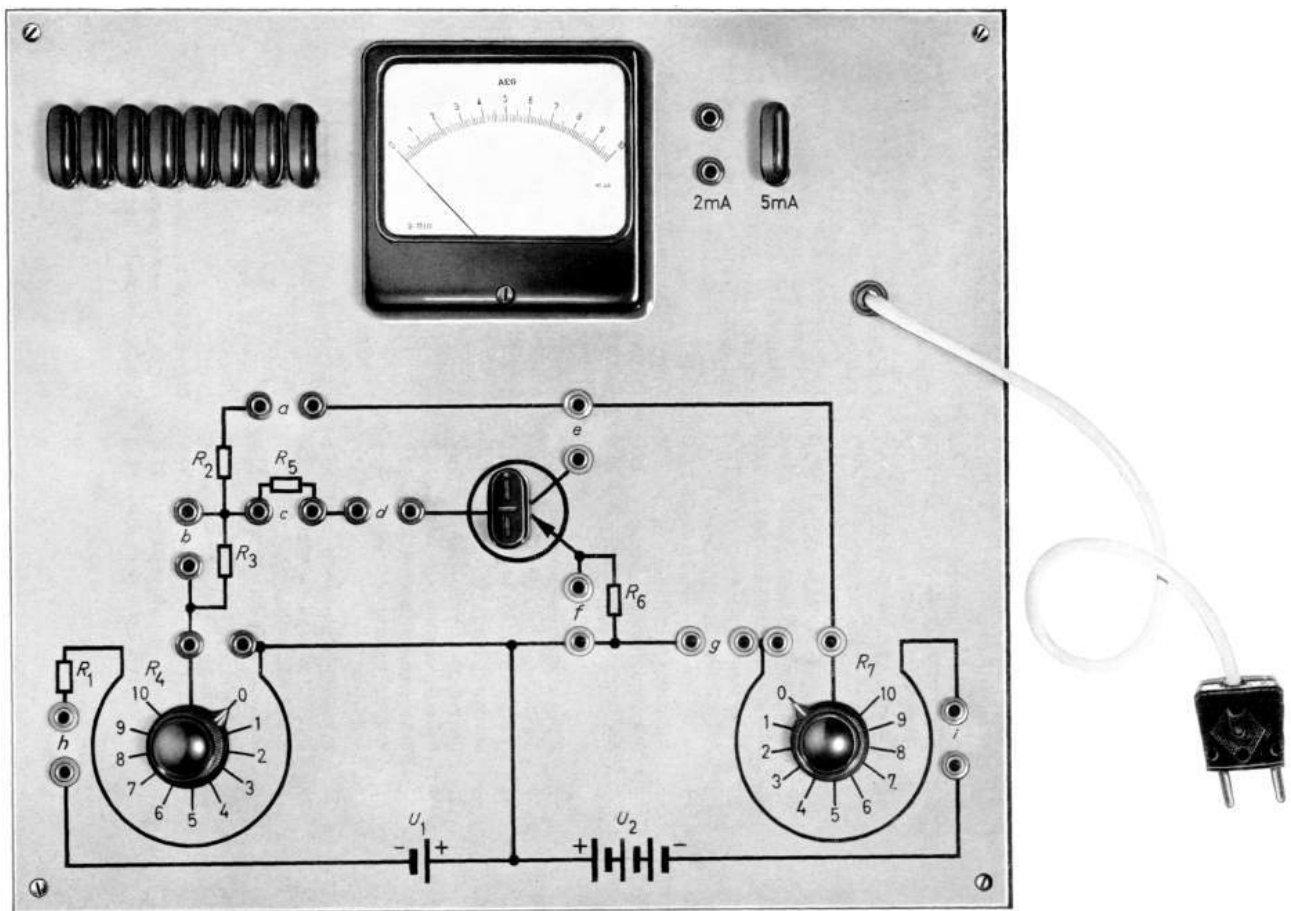
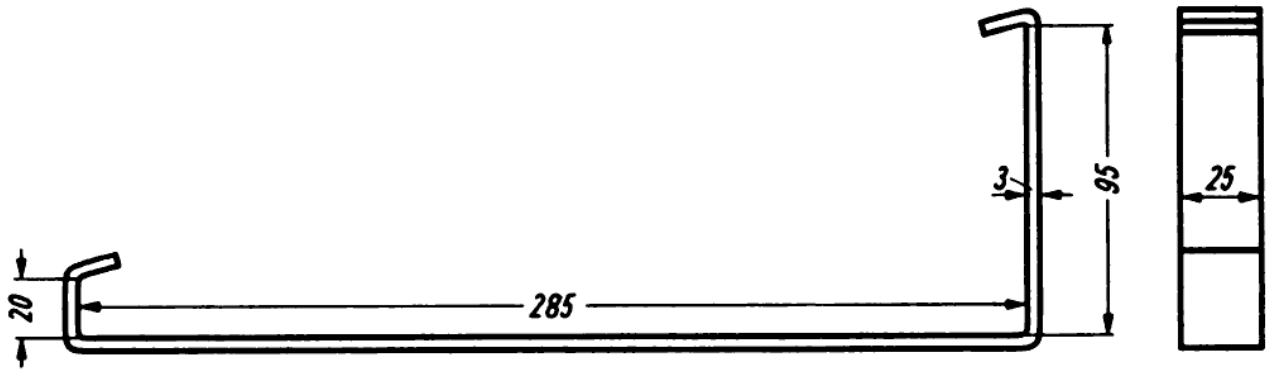


(ab Seite 187 digitalisiert) der Aufbau des Experimentiergerätes (ab Seite 217)

Ein Experimentiergerät

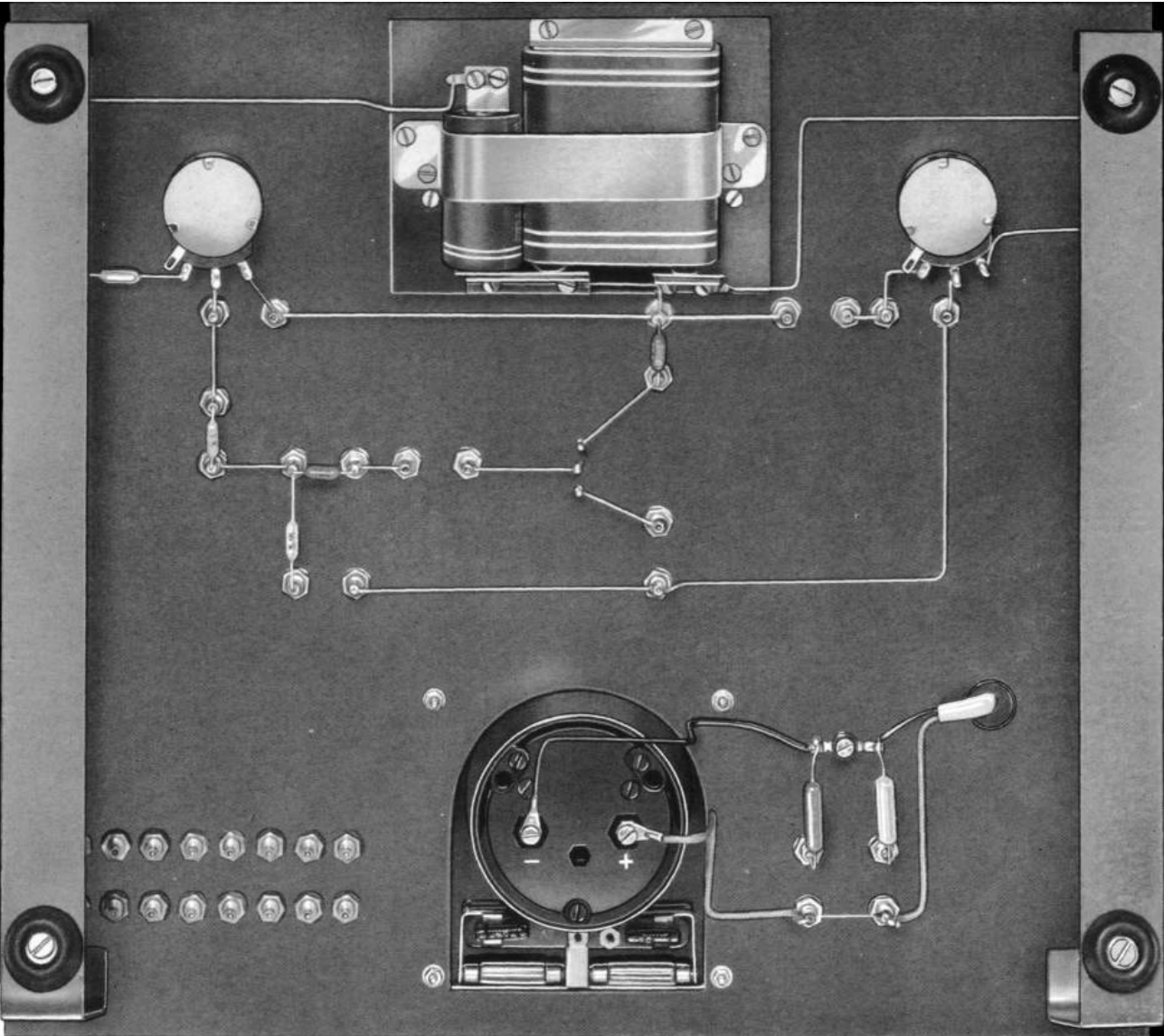
Abbildungen des Experimentiergerätes

Das auf den folgenden Seiten gezeigte Experimentiergerät ist auf einer 4 mm dicken Pertinaxplatte (320x360 mm) aufgebaut. Die Schaltung ist auf Zeichenpapier in Tusche eingetragen und mit einem 2 mm starken Plexiglas abgedeckt. Als FüÙe dienen zwei mit je zwei Gummipuffern versehene Bandeisen (**Bild E.44**).



Anm.: Das Kabel mit dem Stecker dient zum Anschluss des Messinstrumentes - siehe Text und nächste Seite

Ein Experimentiergerät



Ein Experimentiergerät

Manche Elektrotechniker ziehen es vor, sich in ein neues Gebiet dadurch einzuarbeiten, daß sie auf diesem Gebiet grundlegende Versuche und Messungen selbst vornehmen und an Hand der so gewonnenen Ergebnisse die wesentlichen Zusammenhänge studieren. Für sie sind die folgenden Ausführungen gedacht. In ihnen wird gezeigt, wie man mit Hilfe einer verhältnismäßig einfachen Anordnung die wichtigsten Eigenschaften des Transistors feststellen kann.

Ein Experimentiergerät

Auf den Seiten 215 und 216 findet sich die Schalteilliste zu diesem Gerät. Photographien von diesem Gerät siehe Seiten 218 und 219.

Vorbemerkung

Um die Zusammenhänge der Praxis entsprechend deutlich zu zeigen, werden für Spannungen und Ströme Zahlenwerte ermittelt. Daraus darf man allerdings nicht den Schluß ziehen, es sei möglich, mit dem Experimentiergerät Kennlinien genau nachzumessen. Dieser Schluß wäre aus zwei Gründen abwegig:

1. Die in den Datenblättern enthaltenen Kennlinien sind Mittelwert-Angaben.
2. Diese Kennlinien mißt man nicht im Dauerzustand, sondern (mit Rücksicht auf sonst verfälschend zur Wirkung kommende Eigenerwärmung der Transistoren) mit kurzen Impulsen.

Als Stromquellen dienen eine Monozelle und eine Taschenlampenbatterie. Da die Taschenlampenbatterie nur für einen der vielen Versuche etwa 50 mA zu liefern hat, während sonst durchweg Ströme unter 5 mA fließen, reicht ein Batteriesatz für weit mehr als 100 Betriebsstunden aus.

Batteriesatz und Schaltung wurden so bemessen, daß der Transistor durch falsche Handhabung der Kurzschlußstecker und der Drehwiderstände nicht beschädigt wird, und daß außerdem auch Überlastungen des Strommessers leicht zu vermeiden sind.

Die zu den Versuchen angegebenen Zahlen und Kennlinien dürfen nur als Beispiele gewertet werden. Sie haben sich für ein bestimmtes Exemplar der Transistortype OC 602 ergeben. Auch wenn wir die Versuche mit einem gleichartigen Transistor ausführen, können wir, wegen der stets gegebenen Exemplarstreuungen, zu anderen Zahlenwerten kommen.

Beschreibung des Gerätes

Das Gerät ist auf einer Montageplatte aufgebaut. Auf deren Vorderseite befinden sich Buchsen, eine Transistorfassung und ein Meßinstrument mit einem Grundmeßbereich von 1 mA. Außerdem sind an der Vorderseite die Knöpfe und Skalen für zwei Drehwiderstände angeordnet.

Die Schaltung wurde so ausgelegt und ausgeführt, daß sie durch ein auf der Vorderseite der Montageplatte eingetragenes Schaltbild klar dargestellt werden konnte.

Die Batterien, die Widerstände und die später für den Betrieb des Gerätes als Verstärkerstufe benötigten Kondensatoren befinden sich mit den zugehörigen Verbindungsleitungen auf der Rückseite der Montageplatte.

Die Transistorfassung ist in den Basisstrich des Transistorschaltzeichens einbezogen, so daß sie das Bild der Schaltung nicht stört.

Mit Hilfe der Buchsen und der dazu passenden Kurzschlußstecker können wir die Schaltung variieren. Das Instrument läßt sich mit Hilfe eines Doppelsteckers an die Stelle eines Kurzschlußsteckers setzen, womit wir die Möglichkeit haben, Ströme zu messen. Auf den Einbau von Spannungsmessern wurde, der Übersichtlichkeit der Schaltung und der Einfachheit der Anordnung zuliebe, verzichtet. Damit wird die Verwendbarkeit des Gerätes im übrigen nicht beeinträchtigt: Die Batteriespannungen können jederzeit mit dem eingebauten Strommesser nachgemessen werden. Auf Grund des Wertes der Batteriespannung und der für die Drehwiderstände vorgesehenen Skalen läßt sich die jeweils abgegriffene Spannung mit einer hier durchaus befriedigenden Genauigkeit ermitteln.

Vor dem Drehwiderstand, der es gestattet, die Basisspannung an der zugehörigen Einzelzelle abzugreifen, liegt ein Festwiderstand, dessen Wert selbstverständlich beim Ermitteln der abgegriffenen Spannung berücksichtigt werden muß. Außerdem enthält die Schaltung noch einige weitere Widerstände: einen Widerstand in der Basisleitung, einen Widerstand in der Emitterleitung und zwei Widerstände, aus denen wir einen Spannungsteiler bilden können. An ihm ist die Spannung für die Basis gegen den Emitter als Teil der Collector-Speisespannung abzugreifen.

Für das Instrument, dessen Grundmeßbereich 1 mA beträgt, sind zwei zusätzliche Meßbereiche vorgesehen, nämlich 2 mA und 5 mA. Diese Meßbereiche erlauben insbesondere die Aufnahme von Kennlinien orientierenden Charakters (Ausführung siehe Seite 215 Bild E. 43).

Außer den Buchsenpaaren, die mittels Kurzschlußsteckern überbrückt werden können oder zum Einstecken der Stecker des Strommessers bzw. des als Mikrophon benutzten Lautsprechers und des Kopfhörers dienen, befinden sich auf der Frontplatte noch weitere Buchsen, die es gestatten, Spannungen mit einem äußeren Instrument nachzumessen.

Die zu überbrückenden Stellen der Schaltung tragen die Bezeichnungen a. .i. Zu jedem der nachstehend beschriebenen Versuche ist ein Steckschema angegeben, das besagt, ob bzw. womit diese Stellen zu bestücken sind. Die beiden, am

unteren Rand der Montageplatte angeordneten Buchsenpaare h und i dienen zum Schließen der Stromkreise der beiden Speisestromquellen (**Bild E.01**).

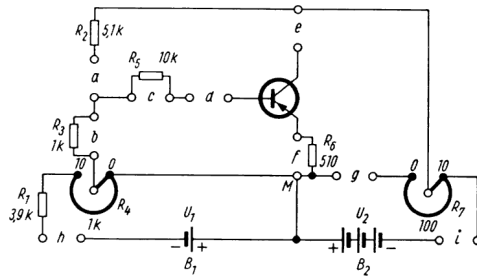


Bild E.01. Die Schaltung des Experimentiergerätes. Die durch Kurzschlußstecker wahlweise zu überbrückenden Strecken sind mit a...i bezeichnet. In das Schaltbild ist der mit dem Gerät zu untersuchende Transistor eingetragen. Als Speisestromquellen dienen eine Monozelle und eine dreizellige Taschenlampenbatterie.

Das Experimentiergerät enthält auf seiner Vorderplatte oben neben dem Strommesser mehrere zusätzliche Buchsen, die dazu dienen, die nicht benutzten Kurzschlußstecker aufzunehmen.

Grundsätzliches zum Verwenden des Experimentiergerätes

Solange das Gerät nicht in Gebrauch ist, müssen die beiden Buchsenpaare h und i am unteren Rand der Montageplatte frei sein. Dadurch wird ein unnötiger Verbrauch der Monozelle und der Batterie vermieden.

Der Drehwiderstand R_4 wird nach Abschluß eines jeden Versuches stets in die Stellung Null gedreht, so daß er zu Beginn des nächsten Versuches diese Stellung hat.

Den Drehwiderstand R_7 belassen wir in der Stellung 10. Er wird aus dieser Stellung nur dann herausgedreht, wenn die Verbindung g gesteckt ist.

Wollen wir besonders vorsichtig sein, so stecken wir nach Abschluß eines jeden Versuches den Meßbereich 5 mA, so daß das Instrument geschont wird. Diese Schonung bezieht sich auch auf die mechanische Beanspruchung beim Transport des Gerätes. Durch den zu 5 mA gehörenden Nebenwiderstand werden Drehbewegungen des Meßsystems gedämpft.

Übersicht über die hier beschriebenen Versuche

Das Experimentiergerät ist so ausgerüstet, daß sich mit ihm zahlreiche und sogar recht eingehende Untersuchungen anstellen lassen. Die Versuche und Messungen, die wir zweckmäßigerweise durchführen, um die Eigenschaften der Transistoren näher kennenzulernen, sind nachstehend beschrieben.

Hier eine Übersicht über die beschriebenen Untersuchungen und Messungen:

1. Verwenden des Transistors als elektronischer Schalter
2. Ausnutzen des Transistors als Stellwiderstand
3. Aufnahme einer Transistor-Steuerkennlinie
4. Aufnahme der Ausgangskennlinien des Transistors
5. Bestimmen des Stromverstärkungsfaktors für Emitterschaltung
6. Feststellen der Temperaturabhängigkeit des Collector-Emitter-Reststromes
7. Bestimmen der Temperaturabhängigkeit des Collector-Ruhestromes
8. Feststellen der Erwärmung der Collector-Sperrschicht auf Grund der Collector-Verlustleistung
9. Stabilisieren des Collector-Ruhestromes gegen Temperaturschwankungen
10. Studium der Arbeitsweise einer nicht stabilisierten Verstärkerstufe
11. Untersuchung der Verstärkerstufe, deren Collector-Ruhestrom gegen Temperaturschwankungen kompensiert ist.

Zu den zuletzt genannten beiden Versuchen benötigen wir zusätzlich einen Kopfhörer und ein Mikrofon mit Eingangübertrager. An Stelle des Mikrophons können wir auch einen Lautsprecher mit einem Anpassungstransformator verwenden. Die nachstehend beschriebenen Versuche wurden mit einem Lautsprecher durchgeführt.

Schemas für die Einzelschaltungen

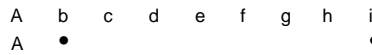
Die Schaltung des Experimentiergerätes läßt sich mit Hilfe von Kurzschlußsteckern variieren. Die damit zu überbrückenden Strecken sind in Bild E.01 mit a...i bezeichnet. An Stelle eines Kurzschlußsteckers kann der Instrumentenstecker eingesteckt werden, womit der Strommesser in den jeweiligen Stromweg eingefügt wird.

Für die Einzelschaltungen werden jeweils die Buchstaben aller möglicherweise zu überbrückenden Stellen aufgeführt und ein einzusteckender Kurzschlußstecker durch einen Punkt sowie der Instrumentenstecker durch ein A bezeichnet.

Nachmessen der Batterie-Spannungen

Zum Messen der Spannung U_1 stecken wir den Instrumentenstecker in h. Damit messen wir den Strom, der über $R_1 + R_4$ zustande kommt (**Bild E.02**). Dieser Gesamtwiderstand beträgt $(3,9 + 1) \text{ k}\Omega = 4,9 \text{ k}\Omega$. Das hier verwendete Instrument hat für den Grundmeßbereich 1 mA einen Widerstand von 70Ω . Insgesamt können wir daher mit einem Gesamtwiderstand von rund $5 \text{ k}\Omega$ rechnen. Also zeigt das Instrument für $U_1 = 1,5 \text{ V}$ einen Ausschlag von $1,5 \text{ V} : 5 \text{ k}\Omega = 0,3 \text{ mA}$.

Zum Bestimmen der Spannung U_2 stecken wir nach folgendem Schema (Bild E.03):



wobei wir R_4 auf 0 und R_7 auf 10 stellen. Der Gesamtwiderstand des so erhaltenen Stromkreises ist mit R_2 + Instrumentenwiderstand für 1 mA Meßbereich mit rund 5,1 k Ω gegeben. Demgemäß zeigt das Instrument für $U_2 = 4,5$ V einen Strom von 4,5 V : 5,1 k Ω = 0,88 mA an. Wir könnten auf den Gedanken kommen, es sei ebensogut, den Instrumentenstecker in i und den Kurzschlußstecker in a zu stecken. Das empfiehlt sich dann nicht, wenn Kondensatoren eingebaut sind.

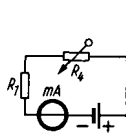


Bild E.02

Nachmessen der Monozellen-Klemmenspannung mit dem eingebauten Instrument.

Nachmessen der Klemmenspannung derdreizehigen Taschenlampenbatterie mit dem eingebauten Instrument.

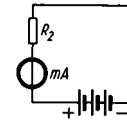


Bild E.03

Beim Stecken des Instrumentensteckers in a ginge über das Instrument der sich zu C_3 ergebende Ladestromstoß, dessen Spitzenwert immerhin $4,5$ V : 70 Ω \approx 64 mA beträgt. Würden wir statt des Meßbereiches 1 mA den Meßbereich 5 mA verwenden, so wäre damit nicht viel gebessert: der Spitzenstrom würde $4,5$ V : 14 Ω \approx 20 mA betragen, also im Verhältnis der Meßbereiche höher ausfallen.

Alleiniger Zweck des Nachmessens ist es, festzustellen, ob die Batterien noch brauchbar sind oder ausgetauscht werden müssen. Auf genaue Spannungswerte kommt es hier nicht an. Abweichungen bis zu $\pm 20\%$ von 1,5 V bzw. 4,5 V sind in bezug auf die hier beschriebenen Versuche belanglos, sofern die Spannungen während des Einzelversuchs einigermaßen konstant bleiben.

Die abgegriffenen Spannungen

Wie schon bemerkt, wurde für das Experimentiergerät auf eingebaute Spannungsmesser verzichtet. Statt dessen enthält es lineare, mit Skalen versehene Drehwiderstände. Diese sind mit 1 k Ω für die Basisspannung und 100 Ω für die Collectorspannung so bemessen, daß die abgegriffenen Spannungen hinreichend unabhängig von den hier in Betracht kommenden Belastungsströmen bleiben.

Unter den Voraussetzungen:

1. völlige Linearität der Drehwiderstände, also Proportionalität zwischen Drehwinkel und abgegriffenem Widerstandsanteil,
2. Übereinstimmung aller tatsächlichen Widerstandswerte mit den Nennwerten,
3. Spannung je Zelle genau 1,5 V

bestehen zwischen Stellung des Abgriffes und abgegriffener Spannung für die beiden Drehwiderstände die Beziehungen, die durch die **Bilder E.04** und **E.05** veranschaulicht sind. Diese Voraussetzungen, die den beiden Bildern zugrunde liegen, brauchen in Wirklichkeit nur ganz ungefähr erfüllt zu sein. Uns interessieren nämlich nur die prinzipiellen Zusammenhänge.

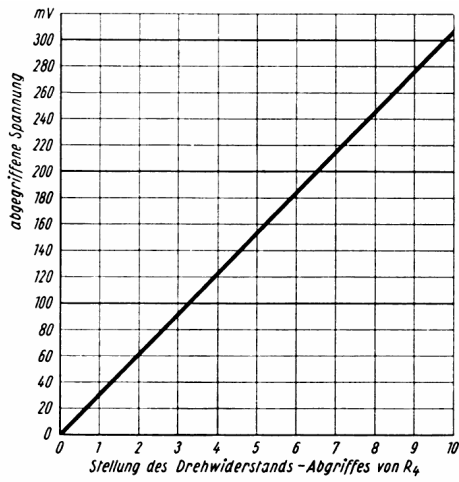
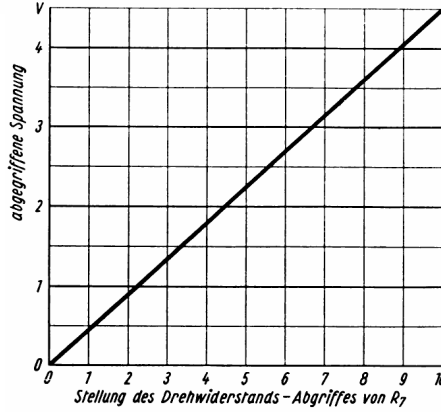


Bild E.04
Zusammenhang zwischen der an dem Widerstand R_4 abgegriffenen Spannung und der Stellung des Drehwiderstands-Abgriffes.

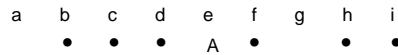
Bild E.05
An dem Widerstand R_1 abgegriffene Spannung abhängig von der Stellung des Drehwiderstands-Abgriffes dieses Widerstandes.



In den folgenden Prinzip-Schaltbildern ist der Widerstand R_1 der Übersichtlichkeit halber zu dem Widerstand R_4 zugeschlagen, also nicht als gesonderter Widerstand eingezeichnet.

Der Transistor als Schalter

Kurzschlußstecker und Instrumentenstecker stecken wir nach folgendem Schema:



Der Abgriff von R_7 bleibt in Stellung 10. Den Abgriff von R_4 stellen wir so ein, daß sich mit dem Meßbereich 1 mA am Strommesser ein großer Ausschlag ergibt (z. B. 0,8 mA).

Ziehen wir den Stecker h, was dem Öffnen des Schalters in **Bild E.06** gleichkommt, so geht der Strom praktisch auf Null zurück.

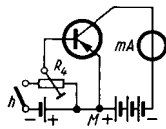


Bild E.06. Transistor als Schalter. Schließt man den Kontakt h, so gibt man damit dem Transistor eine negative Basis-Emitter-Spannung, infolgedessen fließt ein Collectorstrom. Öffnet man den Kontakt h, so ist die zwischen Basis und Emitter angelegte Spannung Null. Der Collectorstrom geht auf einen sehr kleinen Wert zurück.

Vor dem Ziehen dieses Steckers bekam die Basis des Transistors gegen den Emitter über den Abgriff des Widerstandes R_4 eine negative Spannung. Nach Ziehen des Steckers h fällt die negative Basis-Emitter-Spannung weg. Basis und Emitter sind lediglich über einen Teil von R_4 miteinander verbunden.

Der Versuch zeigt: Der Durchgang eines nennenswerten Stromes über die Emitter-Collector-Strecke des Transistors setzt eine negative Basis-Emitter-Spannung voraus. Die Collector-Emitter-Spannung ist ebenfalls negativ. Folglich müssen für Stromdurchgang Basis- und Collectorspannung gegen den Emitter betriebsmäßig dasselbe Vorzeichen haben.

Wirkung eines Widerstandes in der Emitterleitung

Wir stecken den Stecker h wieder ein und ziehen dafür den Stecker f. Dem entspricht in **Bild E.07** das Öffnen des dort eingetragenen Schalters. Auch hierbei

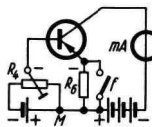


Bild E.07. Der Einfluß eines Emitter-Widerstandes. Wird der Kontakt f geöffnet, so nimmt der Emitter gegen Masse eine negative Spannung an. Dadurch wird die negative Basis-Emitter-Spannung vermindert und der Collectorstrom erheblich herabgesetzt.

sinkt der Collectorstrom, aber nicht so weit wie zuvor. Auf den Widerstand R_6 entfällt eine Spannung. Dadurch wird die negative Spannung der Basis gegen den Emitter herabgesetzt: Der Emitter, der vorher unmittelbar an dem Punkt M

lag, hat jetzt gegen diesen Punkt eine negative Spannung. Als Basis-Emitter-Spannung kommt jetzt nur der Überschuß des Betrages der an R_4 abgegriffenen Teilspannung über den Betrag der Spannung am Widerstand R_6 zur Geltung.

Nachweis des Fließens eines Basisstromes

Nun stecken wir den Stecker f ein und ziehen den Stecker c (geöffneter Schalter in Bild E.08). Als Folge hiervon sinkt der Collectorstrom ab. Er geht aber nicht so weit zurück wie in den beiden vorangegangenen Fällen. Bei gezogenem Stecker c liegt der Widerstand R_5 in der Basiszuleitung. Das Absinken des Collectorstromes weist darauf hin, daß an dem Widerstand R_4 eine Spannung auftritt, die der Basis-Batteriespannung entgegenwirkt. Daraus ist zu entnehmen,

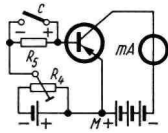


Bild E.08. Prüfung auf Basisstrom. Vor der Basis liegt ein Widerstand, der durch den Kontakt c überbrückt werden kann, öffnet man den Kontakt c, so sinkt der Collectorstrom. Das bedeutet, daß nun ein Teil der am Widerstand R_4 abgegriffenen Spannung auf den Widerstand R_5 entfällt, so daß an der Basis jetzt eine geringere negative Spannung zur Verfügung steht als vorher.

daß ein Basisstrom fließt. Infolge der Spannung an dem Widerstand R_5 fällt der Betrag der negativen Basis-Emitter-Spannung jetzt kleiner aus als vorher. Das basisseitige Ende des Widerstandes R_5 hat dabei gegen dessen linkes Ende eine positive Spannung. Das bedeutet: Der Basisstrom fließt von der Basis über den Widerstand R_5 nach dem Abgriff des Widerstandes R_4 , wie das der Polung der Spannung U_1 entspricht (siehe hierzu auch Seite 41).

Abgriff der Basisspannung als Teil der Collector-Speisespannung

Nun wollen wir auf die Basis-Speisestromquelle verzichten und die Basisspannung als Teil der Collector-Speisespannung abgreifen. Dazu gehört die Schaltung gemäß Bild E.09, also das nach folgendem Schema gesteckte Gerät:

a b c d e f g h i
 • • • • A • •

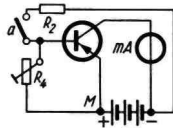


Bild E.09. Bei geschlossenem Kontakt a bekommt die Basis des Transistors von dem Spannungsteiler, der aus R_4 und dem abgegriffenen Teil von R_2 gebildet ist, gegen den Emitter eine negative Spannung, so daß bei geschlossenem Kontakt a ein Collectorstrom fließt. Ist der Kontakt a geöffnet, so ergibt sich ein nur sehr kleiner Collectorstrom, weil die Basisspannung fehlt.

Ausgehend von der Stellung Null verdrehen wir den Abgriff von R_4 so weit, daß das Instrument wieder einen Strom von etwa 0,8 mA anzeigt. Nach dem Ziehen

des Steckers a geht der Strom praktisch auf Null zurück. Durch das Ziehen dieses Steckers a haben wir die vorher an dem Spannungsteiler R_2 , R_4 abgegriffene negative Basis-Emitter-Spannung auf Null gebracht, (Basis und Emitter bleiben über einen Teil von R_4 miteinander verbunden).

Transistor als Stellwiderstand

Eingangs haben wir erfahren, daß man den Collectorstrom mit Hilfe der Basis-Emitterspannung ein- und ausschalten kann. Nun gehen wir zum Steuern dieses Stromes über. Wir steuern den über den Collector fließenden Strom mit Hilfe der Spannung, die zwischen Basis und Emitter angelegt wird. Ein solches Steuern des Collectorstromes ist nichts anderes als ein Beeinflussen des Transistor-Gleichstromwiderstandes, der zwischen Emitter und Collector auftritt, mit Hilfe der Basis-Emitter-Spannung.

Um mit diesem Beeinflussen des Collectorstromes vertraut zu werden, stecken wir die Kurzschlußstecker und den Instrumentenstecker gemäß folgendem Schema:

a b c d e f g h i
 • • A • • •

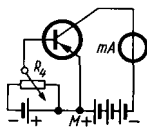


Bild E.10. Transistor als Stellwiderstand: Der (Gleichstrom-) Widerstand der Emitter-Collector-Strecke wird durch die Basis-Emitter-Spannung beeinflusst. Diese Spannung ist hier von der Basis-Speisestromquelle über den Drehwiderstand R_4 abgegriffen.

In der so erhaltenen Schaltung (**Bild E.10**) verstellen wir, ausgehend von der Stellung Null, den Abgriff des Widerstandes R_4 und beobachten dabei den Ausschlag an dem Instrument. Wir erkennen, daß der Collectorstrom umso höher wird, je größer der Betrag der negativen Spannung ist, die wir an R_4 für die Basis gegen den Emitter abgreifen.

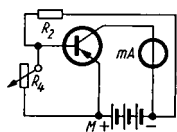


Bild E.11. Transistor wiederum als Stellwiderstand. Die zum Einstellen dienende Spannung wird in diesem Fall von einem an der Collector-Speisespannung liegenden Spannungsteiler (R_2 mit zwischen M und Abgriff liegendem Teil von R_4) abgenommen. Hier ist R_1 in R_4 nicht einbezogen!

Wir ziehen jetzt den Stecker h, stellen den Abgriff des Widerstandes R_4 auf Null und stecken den Stecker a, womit sich die in **Bild E.11** gezeigte Schaltung ergibt. Damit ändern wir an der Wirkungsweise der Schaltung im Prinzip nichts. Statt die negative Basis-Emitter-Spannung als Teil der Spannung der Basis-

Stromquelle abzugreifen, entnehmen wir sie jetzt dem Spannungsteiler, der an der Collector-Speisespannung liegt. Wir ändern die abgegriffene Spannung wieder mittels des Abgriffes des Widerstandes R_4 . Hierbei stellt der abgegriffene Teil dieses Widerstandes den einen Teilwiderstand des Spannungsteilers dar, für den der andere Teilwiderstand durch den Widerstand R_2 gebildet wird.

Wirkung des Emitterwiderstandes

Wir ziehen nun zusätzlich den Stecker f , wodurch gemäß **Bild E.12** der in der Emitterleitung liegende Widerstand R_6 zur Geltung kommt. Als Folge davon ändert sich der Collectorstrom beim Verstellen des Abgriffes von R_4 nicht mehr in dem Maß wie vorher.

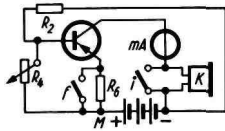


Bild E.12. Schaltung zum Untersuchen der Gleichstrom-Gegenkopplung, die mit Hilfe des Emitter-Widerstandes (R_6) zustande kommt. Vom Kopfhörer (K) wird hier nur dessen Gleichstromwiderstand wirksam. Die Gleichstrom-Gegenkopplung vermindert die steuernde Wirkung der an R_4 abgegriffenen Spannung.

Das könnten wir zunächst darauf zurückführen, daß nun der Widerstand R_6 in Reihe mit dem Widerstand der Collector-Emitter-Strecke liegt und hierdurch die prozentuale Änderung des Gesamtwiderstandes herabsetzt. Doch liegt darin nicht der eigentliche Grund für die verminderte Wirkung der an R_4 abgegriffenen Spannung. Dies läßt sich sofort beweisen: Wir ziehen den Stecker i und ersetzen ihn durch den Doppelstecker des Kopfhörers, dessen Widerstand etwa $k\Omega$ beträgt. Der Collectorstrom hat dabei praktisch denselben Wert wie vorher, als wir i mit dem Kurzschlußstecker überbrückt hatten, obwohl der Kopfhörer einen höheren Widerstand aufweist als R_6 .

Der Grund für das durch den Emitter-Vorwiderstand R_6 verringerte Auswirken der Änderungen der an R_4 abgegriffenen Spannung liegt darin, daß die Spannung, die an R_6 auftritt, mit der abgegriffenen Spannung zusammenwirkt:

Wir haben bereits erfahren, daß der Betrag der Spannung, die den Transistor beeinflusst, gleich dem Unterschied der Beträge der an R_4 abgegriffenen und der an R_6 auftretenden Spannung ist. Erhöhen wir die an R_4 abgegriffene Spannung, so wächst damit der den Transistor und damit auch den Widerstand R_6 durchfließende Strom. Demzufolge steigt die an R_6 auftretende Spannung, womit die Änderung der an R_4 abgegriffenen Spannung nurmehr zum Teil zur Geltung kommt. Ein solches selbsttätiges Gegenwirken gegen die steuernde Spannung bezeichnet man als **Gleichstromgegenkopplung**.

Diese Gegenkopplung verwendet man aus zwei Gründen: Damit vermindert man die Auswirkungen von Exemplarstreuungen der Transistoren und gleicht die Beeinflussung des Collector-Ruhestromes durch die Temperatur weitgehend aus.

Aufnahme einer Steuerkennlinie

Die Steuerkennlinie eines Transistors zeigt, wie der Collectorstrom I_C von der Spannung U_{BE} der Basis gegen den Emitter bei konstantem Wert der Collector-Emitter-Spannung U_{CE} abhängt.

Um eine Steuerkennlinie, also eine I_C / U_{BE} - Kennlinie aufzunehmen, stecken wir die Stecker auf dem Experimentiergerät nach folgendem Schema:

a b c d e f g h i
 • • • A • • •

Wir arbeiten also mit der Schaltung nach Bild **E.08** (Kontakt c geschlossen). Hierin stellen wir den Abgriff von R_4 auf die einzelnen Teilstriche (0,1,2.. .), wobei wir, soweit notwendig, den Strommeßbereich erhöhen. Das geschieht dadurch, daß wir oben einen Kurzschlußstecker zunächst in das mit 2 mA und dann, statt dessen, in das mit 5 mA bezeichnete Buchsenpaar stecken. Wir notieren die einzelnen Stellungen des Abgriffes von R_4 und dazu die am Strommesser abgelesenen Stromwerte. Die Spannungen, die den Stellungen des Abgriffes von R_4 entsprechen, erhalten wir daraus, daß wir die Spannung der Basis-Speisestromquelle (1,5 V) mit dem Verhältnis des abgegriffenen Teils von R_4 zur Summe aus R_4 und R_1 vervielfachen. Oder wir verwenden das Bild **E.04**.

Wir ermitteln also mehrere Wertepaare Basis-Emitter-Spannung/Collectorstrom.

Beispiel

Abgriff an R_4 Teilstrich	Abgegriffene Spannung (mV)	Am Strommesser abgelesene Skalenteile	Strommesser Meßbereich (mA)	Strom in (mA)
0	0	0	1	0
1	30	1	1	0,01
2	60	2,2	1	0,022
3	90	6,2	1	0,062
4	120	23	1	0,23
5	150	57	1	0,57
6	182	64	2	1,28
7	215	54	5	2,7
8	245	76	5	3,8
8,8	267	100	5	5

Die **Bilder E.13** und **E.14** zeigen den gemessenen Zusammenhang I_C/U_{BE} einmal für linearen und einmal für logarithmischen Strommaßstab.

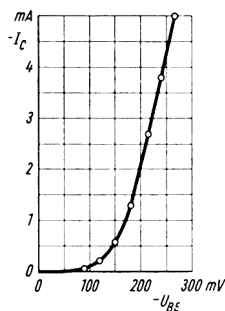


Bild E.13
Eingangskennlinie eines Transistors, wie sie sich auf Grund der in obestehender Tabelle enthaltenen Meßwerte ergibt.

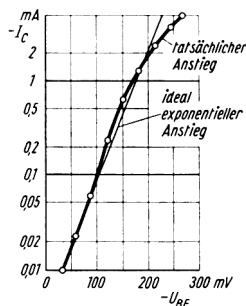


Bild E.14
Derselbe Zusammenhang wie in Bild E.13 mit logarithmischem Strommaßstab dargestellt. Die beiden Spannungsmaßstäbe stimmen überein.

Die Zahlenwerte sind dort mit positivem Vorzeichen eingetragen. Tatsächlich aber handelt es sich, wie **Bild E.15** zeigt, um negative Zahlenwerte. Folglich muß an den Kennlinienachsen **entweder** $|U_{BE}|$ und $|I_C|$ stehen, womit die Beträge dieser Größen, also ihre — ohne Rücksicht auf die tatsächlichen Verhältnisse — positiven Zahlenwerte gemeint sind, **oder**, wie hier in den Bildern E.13 und E.14, $-U_{BE}$ und $-I_C$ eingetragen werden, was auf die negativen Zahlenwerte aufmerksam macht. ($+I_C = -5\text{mA}$ bedeutet nämlich dasselbe wie $-I_C = +5\text{mA}$) Siehe hierzu auch die Seiten 42 und 43.

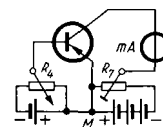
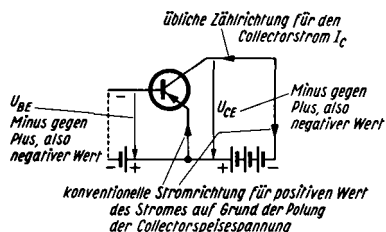


Bild E.16. Schaltung zur Aufnahme der Eingangskennlinie des Transistors für verschiedene feste Werte der Collector-Emitter-Gleichspannung.

Bild E.15. Grundlage für die Erörterung der Zählrichtungen und der Vorzeichen der Zahlenwerte der für den Transistor geltenden Ströme und Spannungen. Es ergeben sich somit negative Zahlenwerte für U_{CE} , U_{BE} und I_C .

Die Meßreihe I_C / U_{BE} können wir für mehrere Werte der Collector-Emitter-Spannung aufnehmen. Dazu müssen wir die Verbindung g stecken und die jeweilige Collectorspannung an R_7 wählen, wie **Bild E.16** das zu erkennen gibt. Wir werden feststellen, daß, abgesehen von sehr kleinen Werten der Collectorspannung (unter 0,5V), der Wert der Collectorspannung auf den Verlauf und auf die Lage der Steuerkennlinie keinen ausschlaggebenden Einfluß hat.

Der Verlauf der Steuerkennlinie in Bild E.13 zeigt uns, daß der Collectorstrom mit wachsender Basis-Emitter-Spannung immer steiler ansteigt: Über einen weiten Bereich des Collectorstromes I_C wächst dessen Betrag für gleichen Betrag der Zunahme von U_{BE} um jeweils denselben Faktor (im Fall des Bildes E.14 für ein Erhöhen des Betrages von U_{BE} um etwa 21 mV jeweils auf das Doppelte).

In prinzipiell gleichem Maß wird die Steuerkennlinien-Steigung, die durch das Verhältnis der Collectorstromänderung zur zugehörigen Basis-Emitter-Spannungs-Änderung dargestellt ist, für höheren Betrag des Collectorstromes größer.

Bestimmen der Steilheit

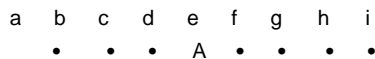
Die Steuerkennliniensteigung, ausgedrückt in mA Collectorstrom-Änderung je 1 V Basis-Emitterspannungs-Änderung, ist die Steilheit des Transistors. Wir entnehmen dem Bild E.17 die Steilheit für $-I_C = 1 \text{ mA}$ und $-I_C = 5 \text{ mA}$. Es ist die Steilheit für

$$\begin{array}{l}
 -I_C = 1 \text{ mA} \qquad 4,3 \text{ mA} : 165 \text{ mV} = \frac{4300 \text{ mA}}{165 \text{ V}} \approx 26 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \\
 -I_C = 5 \text{ mA} \qquad 5 \text{ mA} : 85 \text{ mV} = \frac{5000 \text{ mA}}{85 \text{ V}} \approx 59 \frac{\text{mA}}{\text{V}}
 \end{array}$$

Ausgangskennlinienfelder

Das Ausgangskennlinienfeld zeigt, wie der Collectorstrom I_C von der Collector-Emitter-Spannung U_{CE} für konstante Werte der Eingangsgrößen abhängt. Als konstante Eingangsgröße dient dabei häufig die Basis-Emitter-Spannung U_{BE} .

Zur Aufnahme der I_C/U_{CE} - Kennlinien für **konstante Basisspannung** gilt folgendes Steckschema:



Dem entspricht die in **Bild E.17** dargestellte Schaltung. Wir stellen jeweils einen festen Wert der Basis-Emitter-Spannung ein und ändern dann die Collectorspannung von Null bis zum höchsten Wert, der hier 4,5 V beträgt.

Um von vornherein glatte Zahlenwerte der Basis-Emitter-Spannung zu bekommen, wählen wir die Abgriff-Stellungen des Widerstandes R_4 auf Grundlage des Bildes E.04 aus.

Nachdem wir also an R_4 eine bestimmte Basis-Emitter-Spannung eingestellt haben, ändern wir durch Verstellen des Abgriffes von R_7 , von Null ausgehend, den Wert der Collectorspannung stufenweise und lesen zu jeder Stellung des Ab-

griffes den Strommesser-Ausschlag ab. So erhalten wir die Wertepaare, die zum Aufzeichnen der Kennlinie notwendig sind. Das Ergebnis einer solchen Kennlinienaufnahme wird durch **Bild E.18** veranschaulicht.

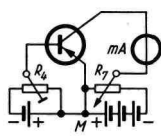


Bild E.17
Schaltung zur Aufnahme der Collectorstrom / Collectorspannungs-Kennlinien, wobei jeder dieser Kennlinien ein fester Wert der Spannung der Basis gegen den Emitter zugrunde liegt.

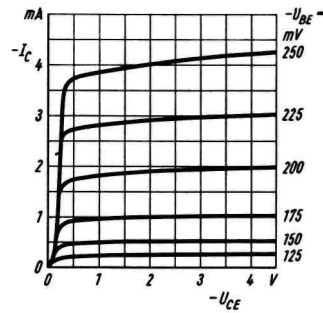
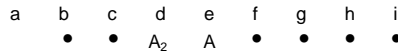


Bild E.18
Mit einer Schaltung nach Bild E.17 mit jeweils konstanter Basis-Emitter-Spannung aufgenommene Transistor-Ausgangs-Kennlinienschar. Jede dieser Kennlinien zeigt, wie der Collectorstrom für eine konstante Basis-Emitter-Spannung von der Collector-Emitter-Spannung abhängt.

Zum Aufnehmen der Ausgangskennlinien für konstanten Basisstrom benötigt man zusätzlich zu dem im Experimentiergerät enthaltenen Strommesser einen zweiten Strommesser A_2 gemäß folgendem Steckschema:



Der zweite Strommesser dient zum Messen des Basisstromes, dessen Werte auf $10 \dots 70 \mu\text{A}$ gehalten werden. **Bild E.19** veranschaulicht die Meßschaltung. An R_4 wird der Basisstrom auf den zu jeder Kennlinie konstanten Wert eingestellt und auf diesem Wert gehalten. Will man mit der gegebenen Schaltung auskommen, so muß man für den Basisstrom einen umschaltbaren Strommesser

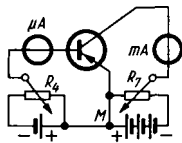


Bild E.19. Schaltung zur Aufnahme der Collectorstrom/Collectorspannungs-Kennlinien, wobei jeder dieser Kennlinien ein fester Wert des Basisstromes zugrunde liegt.

wählen und sich im allgemeinen mit kleinen Ausschlägen begnügen, also höhere Meßbereiche verwenden. Andernfalls entfällt auf den Strommesser eine zu hohe Teilspannung, so daß höhere Basisstromwerte nicht zu erreichen sind. Wenn nur ein Strommesser mit einem einzigen Meßbereich (z. B. $100 \mu\text{A}$) verfügbar ist, muß man für diese Messung dem Widerstand R_1 einen passenden Widerstand

parallelschalten. **Bild E.20** zeigt das Ergebnis einer in der Schaltung nach Bild E.19 durchgeführten Kennlinienaufnahme.

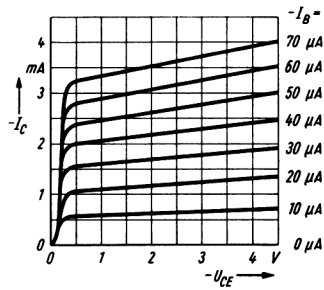


Bild E.20. Mit einer Schaltung nach Bild E.19 mit jeweils konstantem Basisstrom aufgenommene Transistor-Ausgangs-Kennlinienschar. Jede dieser Kennlinien zeigt, wie der Collectorstrom für einen konstanten Wert des Basisstromes von der Collectorspannung abhängt.

Der Stromverstärkungsfaktor

Der Stromverstärkungsfaktor ist das Verhältnis des Ausgangs-Signalstromes zum zugehörigen Eingangs-Signalstrom für den in bezug auf das Signal kurzgeschlossenen Ausgang, also die **Kurzschluß-Stromverstärkung**.

Bei Emitterschaltung ist der Eingangsstrom der Basisstrom und der Ausgangsstrom der Collectorstrom.

Bei Basisschaltung ist der Eingangsstrom der Emitterstrom und der Ausgangsstrom ebenfalls der Collectorstrom.

Bei Collectorschaltung ist der Eingangsstrom der Basisstrom und der Ausgangsstrom der Emitterstrom.

Da der Basisstrom einen wesentlich kleineren Wert hat als Collector- sowie Emitterstrom und da die beiden letztgenannten Ströme einander ähnliche Werte aufweisen, ist der Stromverstärkungsfaktor für Emitter- und Collectorschaltung ungefähr gleich und hat hierfür einen hohen Wert (z. B. 20 ... 80), während er für die Basisschaltung rund gerechnet den Wert 1 annimmt. Meistens meint man mit dem Stromverstärkungsfaktor das für die Emitterschaltung geltende Stromverhältnis.

Wir arbeiten im Zusammenhang mit dem Experimentiergerät mit Gleichströmen

So ist es uns möglich, den Basisgleichstrom (für konstante Werte der Collectorgleichspannung und Basisgleichspannung) in Abhängigkeit von dem Collectorgleichstrom ggggleichstrom

So ist es uns möglich, den Basisgleichstrom (für konstante Werte der Collectorgleichspannung und Basisgleichspannung) in Abhängigkeit von dem Collectorgleichstrom zu messen. Aus einem Collectorgleichstrom und dem zugehörigen Basisgleichstrom läßt sich der **Gleichstromverstärkungsfaktor** bilden, nämlich das Verhältnis des Collectorgleichstromes zum Basisgleichstrom.

Wir können das Verhältnis der Gleichströme in der Weise bestimmen, daß wir den Strommesser einmal in den Collectorstromweg einfügen, also den Strommesserstecker in e stecken, und dann, ohne an der Schaltung etwas zu ändern, die Verbindung e mit einem Kurzschlußstecker herstellen und den Strommesser bei d einfügen, nachdem wir dort den Kurzschlußstecker gezogen haben (**Bild E.21**).

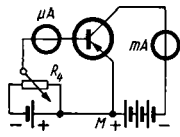


Bild E.21. Schaltung zum Bestimmen des Transistor-Stromverstärkungsfaktors für Emitterschaltung. Gemessen werden hier der Basis-Gleichstrom und der Collector-Gleichstrom. Es handelt sich somit um das Verhältnis der Gleichströme, also um den Gleichstromverstärkungsfaktor.

Leider hat der Strommesser einen gewissen Widerstand. Somit wird durch das Einfügen des Strommessers bei d die Basis-Emitterspannung geändert. Das müssen wir später korrigieren. Zunächst stellen wir den Collectorstrom mit Hilfe von R_4 z. B. auf 5 mA ein. Dann stecken wir, wie beschrieben, den Strommesser (Meßbereich jetzt 1 mA) von e nach d um und stellen einen Basisstrom von z. B. 0,085 mA = 85 µA fest. Nun haben wir nachzurechnen, inwieweit die Basis-Emitter-Spannung durch das Einfügen des Strommessers verfälscht wird. An unserem Instrument tritt bei Vollausschlag eine Spannung von 70 mV auf. Zu einem Ausschlag von 0,085 mA gehört dabei eine Spannung von

$$70\text{mV} \cdot \frac{0,085\text{ mA}}{1\text{ mA}} \approx 6\text{mV}$$

Wir zeichnen den für die Korrektur des Collectorstromes interessierenden Teil unserer Steuerkennlinie (Bild E.13) mit vergrößertem Spannungsmaßstab heraus (**Bild E.22**) und stellen fest, daß zu 267 mV —6 mV = 261 mV statt 5 mA nurmehr 4,65 mA gehören. Damit erhalten wir:

$$\text{Gleichstromverstärkungsfaktor für Emitterschaltung} = \frac{4,65\text{ mA}}{0,085\text{ mA}} \approx 55.$$

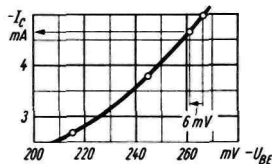


Bild E.22. Kennlinie, mit deren Hilfe wir den Fehler ausmerzen, der sich beim Bestimmen des Stromverstärkungsfaktors dadurch ergibt, daß der in die Basisleitung eingefügte Strommesser einen Widerstand aufweist.

Eine zweite Möglichkeit, den Basisstrom und damit den Stromverstärkungsfaktor

Wir stellen also jeweils einen Wert des Collectorstromes mit Hilfe des Widerstandes R_4 ein und ziehen dann den Stecker c, was dem Öffnen des in **Bild E.23** eingetragenen Schalters entspricht. Nun bekommen wir einen geringeren Collectorstrom. Wir ändern daraufhin die Stellung des Abgriffes von R_4 so weit, bis der ursprüngliche Collectorstrom erreicht ist. Der Basisstrom ergibt sich, wenn wir den Unterschied der zu den beiden Stellungen des Abgriffes von R_4 gehörenden Beträge der Basisspannung durch den Wert des Widerstandes R_5 teilen. Wir erhalten nun als Stromverstärkungsfaktor das Verhältnis des Collectorstromes zu dem auf diese Weise ermittelten Basisstrom.

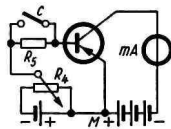


Bild E.23. Schaltung zum Ermitteln des Stromverstärkungsfaktors für Emitterschaltung ohne Verwendung eines Strommessers, mit dem der Basisstrom gemessen wird. An Stelle dieses Strommessers benutzen wir den Widerstand R_5 , wobei wir die jeweils auf ihn entfallende Teilspannung mit Hilfe der Änderung des Abgriffes vom Widerstand R_4 ausgleichen.

Das Experimentiergerät ist so ausgelegt, daß in der Schaltung nach Bild E.23 Stromverstärkungsfaktoren nur für Collectorströme bis etwa 0,8 mA ermittelt werden können. Der Betrag der Basisspannung läßt sich nämlich in dieser Schaltung nicht über etwa 300 mV erhöhen. Um den Stromverstärkungsfaktor für höhere Collectorströme, nämlich z. B. für 1, 2 und 5 mA zu erhalten, müssen wir die Basisspannung von dem an die Collector-Speisespannung gelegten Spannungsteiler abgreifen. Dazu benutzen wir die Schaltung gemäß **Bild E.24** und das zugehörige Steckschema

- a b c d e f g h i
 • (•) (•) • A • •

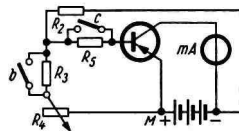


Bild E.24. Variante der Schaltung nach Bild E.23 für das Ermitteln von Stromverstärkungsfaktoren für höhere Collectorströme.

Die hier eingeklammerten Punkte besagen, daß die zugehörigen Verbindungen nicht immer gesteckt sind. Zum Ermitteln der abgegriffenen Spannung aus der Stellung des Abgriffes von R_4 bei gestecktem bzw. gezogenem Stecker b können wir uns des **Bildes E.25** bedienen.

Ein Beispiel für das Ergebnis einer Meßreihe bringt **Bild E.26** (Collector-Emitter-Reststrom berücksichtigt, siehe oben).

Für die Verwendung der Transistoren spielt das Wechselstromverhältnis, kurz **Stromverstärkungsfaktor** genannt, eine große Rolle.

Der Stromverstärkungsfaktor ist mit Gleichströmen nicht zu ermitteln. Doch gilt das Verhältnis des Collectorstromes zum Basisstrom, so wie wir es hier als Gleichstromverhältnis feststellen können, in erster Näherung auch für den Wechselstrom. Genauer wird das Ergebnis, wenn wir berücksichtigen, daß der Collector-Emitter-Reststrom zum Stromverstärkungsfaktor nicht beiträgt und wir deshalb so rechnen:

$$\text{Stromverstärkungsfaktor} \approx \frac{\text{Collector-Gleichstrom} - \text{Collector-Emitter-Reststrom}}{\text{Basisgleichstrom}}$$

Den Collector-Emitter-Reststrom stellen wir in der Schaltung nach Bild E.27 mit dem dafür dort angegebenen Steckschema fest. Wir erhalten etwa 0,13 mA. Das Verhältnis des Collector-Wechselstromes zum Basis-Wechselstrom nennt man den Stromverstärkungsfaktor für Emitterschaltung. Statt Stromverstärkungsfaktor sagt man auch Kurzschluß-Stromverstärkung.

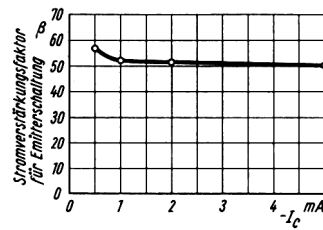
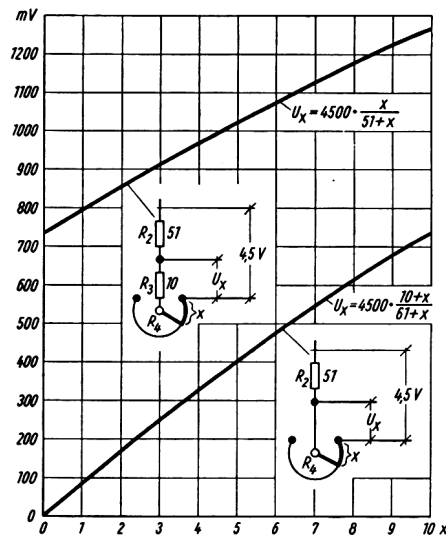


Bild E.26

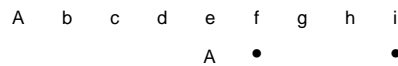
Das Ergebnis der Bestimmung des Stromverstärkungsfaktors für Emitterschaltung.

Bild E.25

Das Ermitteln der Spannung, die mit Hilfe des Widerstandes R_4 im Fall der Schaltung nach Bild E.24 abgegriffen wird.

Temperaturabhängigkeit des Collector-Emitter-Reststromes

Der Collector-Emitter-Reststrom ist der Strom, der zwischen Emitter und Collector fließt, wenn der Basisstrom den Wert Null hat. Das Experimentiergerät wird also dem **Schaltbild E.27** entsprechend nach folgendem Schema gesteckt:



Wir erhalten für den Strom am Strommesser einen bestimmten Ausschlag — z. B. 0,13 mA. Dann fassen wir den Transistor an, so daß sich die Fingerwärme auf ihn überträgt. Fast unmittelbar danach beginnt der Collector-Emitter-Reststrom anzusteigen. Die kurze Verzögerung des Anstieg-Beginns folgt daraus, daß die Wärme vom Gehäuse auf das Transistorsystem übergehen muß. Der Anstieg ist erst steiler und wird dann immer flacher. Er erreicht z. B. einen Endwert von 0,36 mA.

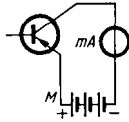


Bild E.27. Schaltung zum Bestimmen des Collector/Emitter-Reststromes und seiner Temperaturabhängigkeit.

Bild E.28 zeigt, wie der Stromanstieg vor sich geht. Aus dem Stromanstieg läßt sich eine Erwärmungs-Zeitkonstante von z. B. etwa 18 s ableiten.

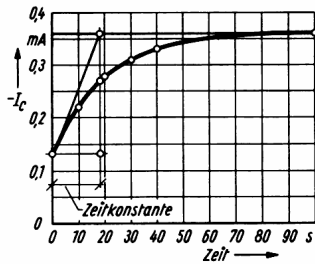


Bild E.28. Anstieg des Emitter/Collector-Reststromes bei Erwärmen des Transistors durch Anfassen.

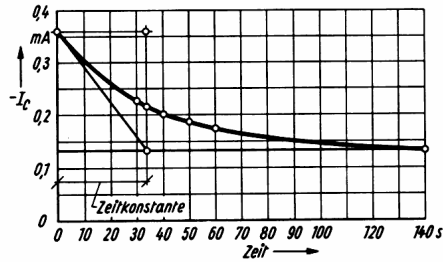


Bild E.29. Absinken des Collectorstromes bei der Abkühlung, die sich ergibt, wenn man den Transistor wieder losläßt.

Wichtiger für unsere Versuche ist der Fall der Abkühlung, also der zeitliche Verlauf des Collector-Reststromes nach Aufhören der Erwärmung (**Bild E.29**). Die Zeitkonstante beträgt dafür rund 34 s. Das bedeutet, daß wir nach einer Erwärmung wenigstens zwei Minuten warten müßten, bevor wir wieder etwa die vor der Erwärmung vorhandene Transistortemperatur voraussetzen dürfen.

Die Temperatur sinkt langsamer ab, als sie angestiegen ist, weil beim Absinken der Wärmewiderstand einen höheren Wert hat. Hierbei findet nämlich der Wärmeübergang nicht zwischen Transistor-Oberfläche und einem diese Oberfläche umschließenden festen Körper (hier Fingerspitzen), sondern zwischen Transistor-Oberfläche und Luft statt.

Temperaturabhängigkeit des Collectorstromes

Wir verwenden die Schaltung nach **Bild E.30**, wozu das Steckschema

a b c d e f g h i
 • • • A • •

gehört. Wir stellen mit Hilfe des Abgriffes von \ddot{A}_4 bei der Zimmertemperatur von z. B. 20 °C einen Collectorstrom von 1 mA ein. Dann erwärmen wir den Transistor durch Anfassen auf z. B. 32 °C (kontrolliert durch Anfassen der die Thermometerflüssigkeit enthaltenden Kugel eines Thermometers) und erhalten nun 1,94 mA. Schließlich kühlen wir den Transistor mit einem Eiswürfel aus dem Kühlschrank und bekommen beispielsweise für ± 0 °C einen Strom von 0,22 mA (**Bild E.31**).

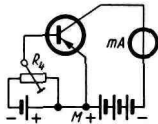
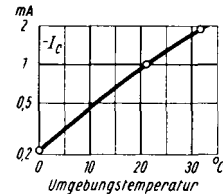


Bild E.30
Schaltung zum Bestimmen der Temperaturabhängigkeit des Collectorstromes.

Bild E.31

Beispiel für ein Ergebnis, wie man es mit einer Schaltung nach Bild E.30 erhalten kann.



Erwärmung aufgrund der Collector-Verlustleistung

Wie eben gezeigt, nimmt der Collectorstrom bei gleichgehaltenen Werten der Speisespannungen mit wachsender Temperatur zu. Maßgebend ist dabei offensichtlich die Temperatur im Innern des Halbleiterelementes, und zwar vor allem die Collector-Sperrschicht-Temperatur. Fließt ein Collectorstrom, so setzt sich in der Collector-Sperrschicht elektrische Leistung in Wärmeleistung um. Die Folge ist ein Ansteigen der Sperrschicht-Temperatur und damit eine Zunahme des Collectorstromes. Die **Bilder E.32 und E.33** geben Beispiele für das

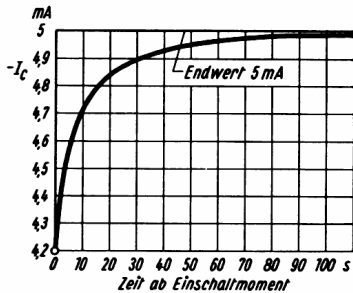


Bild E.32. Stromanstieg infolge Eigen-
erwärmung des Transistors.

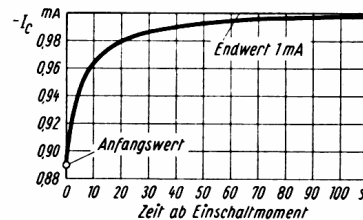


Bild E.33. Stromanstieg für den Fall eines
geringer eingestellten Anfangswertes.

Anwachsen des Collectorstromes nach dem Einschalten. Den Kennlinien liegen Messungen mit dem Experimentiergerät und einer Armbanduhr zugrunde. Um die einzelnen Wertepaare zum ersten, raschen Anstieg zu erhalten, müssen wir jeweils nur einen Zusammenhang beachten. Wir müssen also das Einschalten für jeden einzelnen Meßpunkt von neuem vornehmen und natürlich zwischen zwei Einschaltungen jeweils wenigstens 2 min verstreichen lassen, damit sich der Transistor abkühlen kann.

Der Strom-Anstieg geht erst sehr rasch vor sich. Dann nimmt die Anstieggeschwindigkeit ab. Der Endwert, den wir zweckmäßigerweise vorher im Dauerzustand mittels des Abgriffes von R_4 wählen, wird erst nach einiger Zeit erreicht.

Der Temperaturdurchgriff

Hierunter versteht man, um wieviel der Betrag der Basis-Emitter-Spannung gesenkt werden muß, damit der sonst durch 1°C Temperaturerhöhung bedingte Anstieg des Collectorstromes vermieden wird.

Den Temperaturdurchgriff muß man kennen, wenn die Aufgabe besteht, den Collector-Ruhestrom gegen Temperaturschwankungen zu stabilisieren.

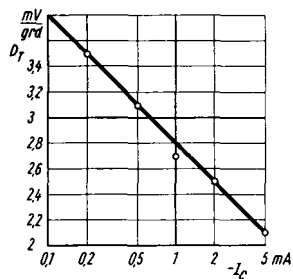


Bild E.34. Das Ergebnis der Ermittlung des Temperaturdurchgriffs eines Transistors. Der Temperaturdurchgriff ist hier abhängig vom Collectorstrom aufgetragen. Die einzelnen durch kleine Kreise markierten Punkte entsprechen den gewonnenen Meßwertpaaren.

Mit Hilfe des Experimentiergerätes läßt sich der Temperaturdurchgriff annähernd ermitteln. Dabei haben wir zu beachten, daß dieser von dem Wert des Collectorstromes abhängt. Er muß also für mehrere Collectorstromwerte bestimmt werden. Wir benutzen hierzu die in Bild E.10 gezeigte Schaltung, wobei wir als eine Temperatur die Zimmertemperatur und als zweite Temperatur z. B. die durch Anfassen des Transistors sich ergebende Temperatur zugrundelegen. Letztere stellen wir fest, indem wir die Kugel eines Thermometers in gleicher Weise anfassen wie nachher oder vorher den Transistor. Das Anfassen muß sich stets auf so lange Zeit ausdehnen, daß wirklich der Dauerzustand erreicht wird!

Wir müssen z. B. für $I_C = 2 \text{ mA}$ bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Basis-Emitter-Spannung von $-U_{BE} = 200 \text{ mV}$ (Einstellung an R_4 auf 6,5) und bei $32 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Basis-Emitter-Spannung von $-U_{BE} = 168 \text{ mV}$ (Einstellung an R_4 auf 5,5) wählen. Das bedeutet für die $12 \text{ }^\circ\text{C}$ Temperaturunterschied einen Unterschied der Basis-Spannung von 42 mV . Bezogen auf $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ergibt sich so ein Temperaturdurchgriff von $42 \text{ mV} : 12^\circ\text{C} = 3,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ **Bild E.34** zeigt den gesamten gemessenen Zusammenhang.

Stabilisieren des Collector-Ruhestromes gegen Temperatur-Schwankungen

Stabilisieren des Collector-Ruhestromes gegen Temperaturschwankungen heißt: die Verhältnisse so wählen, daß der Collector-Ruhestrom durch die Temperatur in weit geringerem Maß beeinflusst wird als sonst. Stecken wir nach dem Schema:

a b c d e f g h i
 • • • A •

so ergibt sich zu einer Temperaturerhöhung des Transistors von 20°C auf 32°C (z. B. durch Anfassen des Transistors erreicht) ein Ansteigen des Collectorgleichstromes von z. B. $0,8 \text{ mA}$ auf ungefähr $1,6 \text{ mA}$.

Zum Stabilisieren haben wir drei Möglichkeiten: Gleichstrom-Gegenkopplung mit Hilfe des Emitterwiderstandes R_6 , Gleichspannungsgegenkopplung und gemischte Gegenkopplung.

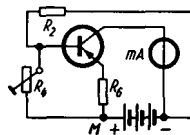


Bild E.35. Schaltung mit der man feststellt, daß mit Hilfe eines Emitter-Widerstandes die Temperaturabhängigkeit des Collectorstromes erheblich herabgesetzt werden kann. Es handelt sich dabei um eine Gleichstrom-Gegenkopplung.

Gleichstrom-Gegenkopplung erhalten wir mit Ziehen des Steckers f,

also
 mit dem Schema

a b c d e f g h i
 • • • A •

(Bild E.35). Da die an R_6 auftretende Spannung der am Spannungsteiler abgegriffenen Basisgleichspannung entgegenwirkt, müssen wir an R_4 eine höhere Spannung abgreifen, um wieder auf $0,8 \text{ mA}$ zu kommen. Der Collectorgleichstrom steigt bei Erwärmen des Transistors von 20°C auf 32°C nur noch um etwa $0,04 \text{ mA}$ an.

Gleichspannungs-Gegenkopplung setzt in dem Collector-Stromkreis einen Gleichstromwiderstand voraus, auf den wenigstens ungefähr $\frac{1}{5}$ der Collector-Speisespannung entfällt. Als solchen Widerstand verwenden wir den Kopfhörer. Wir stecken also

a b c d e f g h i
 • • • A • K

und erhalten damit die in **Bild E.36** gezeigte Schaltung. Wenn der Collector-Gleichstrom bei ansteigender Temperatur zunimmt, wächst die auf K entfallende Gleichspannung. Damit sinken Collector- und Basis-Gleichspannung ab, was dem Stromanstieg entgegenwirkt. In unserem Fall ergibt sich ein Stromanstieg beispielsweise von 0,8 mA auf 1,1 mA, also weniger als ohne Stabilisierung.

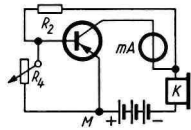


Bild E.36. Schaltung zum Stabilisieren des Collector-Gleichstromes gegenüber Schwankungen der Umgebungstemperatur durch eine Gleichspannungs-Gegenkopplung. Vom Kopfhörer wird hier nur der Gleichstromwiderstand ausgenutzt.

Nun kombinieren wir beide Gegenkopplungen. Wir stecken also gemäß

a b c d e f g h i
 • • • A K

was die Schaltung nach **Bild E.37** ergibt. Der Collector-Gleichstrom steigt hierbei nur noch von 0,8 mA auf etwa 0,83 mA an.

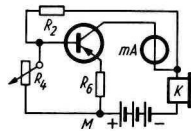


Bild E.37. Kombination aus Gleichstrom- und Gleichspannungs-Gegenkopplung zum Stabilisieren des Collector-Gleichstromes gegenüber Schwankungen der Umgebungstemperatur. Auch hier wird vom Kopfhörer nur dessen Gleichstromwiderstand ausgenutzt.

Lichtempfindlichkeit

Sofern wir die Möglichkeit haben, unseren Transistor nachher wieder schwarz zu lackieren, können wir den Lack abschaben und die Lichtempfindlichkeit des Transistorsystems studieren. Dazu stecken wir nach dem Schema:

a b c d e f g h i
 • • • A • • •

und stellen mit Hilfe von R_4 einen Collectorstrom von z. B. 0,4 mA ein. Dann beleuchten wir den Transistor beispielsweise mit einer 100 W-Glühlampe unter

Verwendung einer Leselupe. Zuvor stellen wir fest, daß das damit erreichbare helle Abbild des Glühfadens zu keiner nennenswerten Erwärmung führt, indem wir dieses Bild auf dem Handrücken erscheinen lassen.

Beleuchten wir die Collectorseite des Transistors, so erhöht sich der Collectorstrom nur wenig, z. B. um 0,03 mA. Diese Stromerhöhung findet sofort statt. Auch durch länger andauernde Beleuchtung wird kein weiterer Stromanstieg von merklichem Ausmaß erreicht. Das beweist, daß hier nicht die Wärme, sondern nur das Licht von Einfluß ist.

Weit bedeutendere Stromerhöhung ergibt ein Beleuchten der Transistor-Emitterseite. Der Collectorstrom kann dabei von 0,4 mA bis weit über 1 mA hinausgetrieben werden.

Das Licht wirkt sich auf den Rand der Emittersperrschicht aus. Es macht dort Ladungsträger frei.

Das geringe Ansteigen des Collectorstromes bei Beleuchten der Collectorseite hängt mit Lichtspiegelungen zusammen, die dabei indirekt auch etwas Licht auf die Emitterseite werfen.

Experimentiergerät als Verstärker, ein Überblick

Mit den Zeichen K für den Kopfhörer und L für den als Mikrofon benutzten Lautsprecher gelten folgende Steckschemas

a b c d e f g h i
 • • L K (•) • A bzw.

a b c d e f g h i
 • (•) • L K (•) A und damit

die **Schaltbilder E.38** sowie **E.39**. In diesen Schaltbildern sind die Kondensatoren eingetragen, die bisher außer acht gelassen wurden, sich aber, wie **Bild E.40** zeigt, im Experimentiergerät befinden.

Der Punkt für die Verbindung f ist eingeklammert. Der Versuch wird demgemäß einmal mit und einmal ohne diese Verbindung durchgeführt.

Ebenfalls eingeklammert ist der Punkt für die Verbindung b im zweiten Schema. Wir müssen nämlich bei gezogenem Stecker f für höhere Collector-Ruheströme den Stecker b ziehen.

Der Strommesser zeigt nur in der Schaltung nach Bild E.38 den Collectorstrom allein an. In der Schaltung nach Bild E.39 wird der Spannungsteilerstrom mitgemessen. Der Wert dieses Stromes hängt davon ab, in welcher Stellung der Abgriff von R_4 steht und ob R_3 zur Wirkung kommt oder nicht. Die Schaltung nach Bild E.38 eignet sich demgemäß zu Untersuchungen besser als die Schaltung nach Bild E.39.

Als Schallquelle benutzen wir entweder ein in einem anderen Raum betriebenes Rundfunkgerät, wobei unser Lautsprecher mit einer hinreichend langen Litze versehen sein muß, oder aber einen laut tickenden Wecker, den wir auf den Lautsprecher stellen.

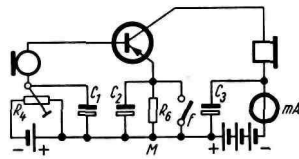


Bild E.38. Experimentiergerät als Nf-Verstärkerstufe benutzt.

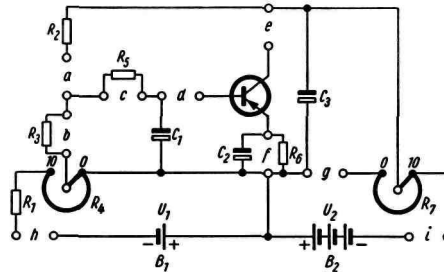
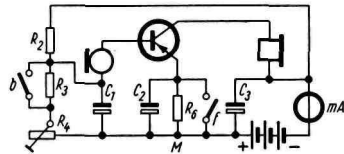


Bild E.40. Das Experimentiergerät durch Elektrolyt-Kondensatoren ergänzt, so wie es schon in den Schaltbildern E.38 und E.39 angedeutet ist.

Bild E.39. Variante zu der Schaltung nach Bild E.38.

Verstärkerstufe ohne Widerstand in der Emitterleitung

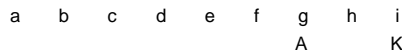
Bei gesteckter Verbindung f ist der in der Emitterleitung liegende Widerstand R_6 kurzgeschlossen und damit wirkungslos. Somit fehlt die sonst durch ihn bewirkte Stabilisierung. In der Praxis könnte man auf diese Stabilisierung verzichten, wenn es sich nur um einen verhältnismäßig kleinen Arbeitstemperaturbereich und um eine wirkliche Kleinsignalverstärkung handelt.

Für uns ist es richtig, diese Schaltung zu studieren, weil sich die dafür geltenden Ausgangskennlinien mit dem Experimentiergerät unmittelbar messen lassen (siehe Bild E.18, Seite 201) und weil wir die Basis-Emitter-Spannung leicht direkt feststellen können.

Es läßt sich zeigen, daß bei gesteckter Verbindung f erstens einmal die Einstellung der Vorspannung Basis gegen Emitter bei stärkeren Signalen einigermaßen kritisch sein kann und zweitens, daß durch Temperaturänderungen (schon durch solche, wie sie sich bei längerem Anfassen des Transistors ergeben) die Funktion der Schaltung gestört bzw. (bei Einstellung eines hohen Collector-Ruhestromwertes für niedrige Temperatur) sogar unterbunden wird.

Das **Bild E.41** zeigt die Kennlinien für gesteckte Verbindung f. Die darin eingetragene Gleichstrom-Widerstandsgerade ergibt sich zu einer Speisespannung U_2 von 4,5 V und zu einem aus dieser Spannung und dem Gleichstromwiderstand

des Kopfhörers folgenden Strom von 4,25 mA. Dieser Strom wurde im Experimentiergerät mit folgendem Steckschema



gemessen. Die Wechselstrom-Widerstandslinie verläuft flacher als die Gleichstrom-Widerstandsgerade, weil der Wechselstromwiderstand des Kopfhörers höher ist als sein Gleichstromwiderstand. Infolge des Blindanteils ergibt sich für Wechselstrom anstelle einer Geraden eine Ellipse.

Das Bild E.41 läßt erkennen: Für die gegebene Arbeitskennlinie ist ein Collector-Ruhestromwert von ungefähr 1,9 mA (wie dort eingetragen) am günstigsten.

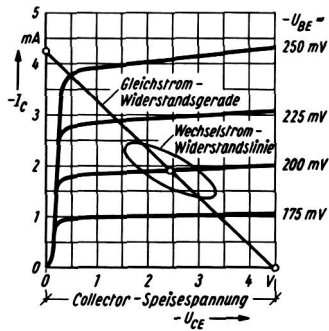


Bild E.41. Das Ausgangs-Kennlinienbild des hier zugrunde gelegten Transistors mit der Gleichstrom-Widerstandsgerade und Wechselstrom-Widerstandslinie des Kopfhörers. Der Collector-Ruhestrom beträgt ungefähr 1,9 mA.

Bei Kleinsignalverstärkung (z. B. Uhrenticken als Schallsignal) ändert sich an der Wiedergabe-Lautstärke nichts, wenn wir den Arbeitspunkt stark aus seiner günstigsten Lage verschieben. Erst bei Collector-Ruheströmen nahe Null oder nahe 4 mA nimmt die Wiedergabe-Lautstärke ganz bedeutend ab.

Bei Großsignalverstärkung, also bei einigermaßen voller Aussteuerung, wie wir sie mit einem passend eingestellten Rundfunkgerät als Schall-Signalquelle bekommen können, merken wir deutlich, daß ein Collector-Ruhestrombetrag etwas unter 2 mA am günstigsten ist. Bei größeren Abweichungen nach oben oder unten ergeben sich Verzerrungen. Am Strommesserausschlag erkennen wir dabei:

für Collector-Ruheströme um 2 mA einen gleichbleibenden Strom,

für Collector-Ruheströme wesentlich über 2 mA einen mit wachsender Lautstärke **abnehmenden** Ruhestrom (weil der Collectorstrom kaum über 4 mA hinaus angesteuert werden kann) und

für Collector-Ruhestrombeträge wesentlich unter 2 mA einen mit steigender Lautstärke **zunehmenden** Ruhestrom (weil der Collectorstrom einerseits bis auf **mehr als 4 mA**, andererseits bis höchstens auf 0 mA durchgesteuert werden kann).

Daß das so sein muß, erkennen wir beim Studium des Bildes E.41.

Verstärkerstufe mit Widerstand in der Emitterleitung

Um den in der Emitterleitung liegenden Widerstand R_6 wirksam werden zu lassen, müssen wir den Stecker f ziehen. Bei gezogenem Stecker f haben wir die an R_4 für die Basis abgegriffene Gleichspannung passend zu erhöhen, damit sich wieder etwa -200 mV wirksame Basis-Emitter-Vorspannung ergeben.

Bei 20 °C gelten mit diesen 200 mV dieselben Verhältnisse wie in Bild E.41. Dem Bild E.41 liegen 20 °C zugrunde. Für Wechselstrom ist nämlich der in der Emitterleitung liegende Widerstand R_6 durch den Kondensator C_2 praktisch kurzgeschlossen.

Wenn nun die Temperatur des Transistors steigt, nimmt der Collectorstrom zu. Wir können uns das so vorstellen: Die Kennlinien schieben sich nach oben, und unten tauchen (sich aus der waagerechten Achse erhebend) weitere Kennlinien auf. Dabei sind die senkrechten Abstände der Kennlinien auch hier wieder zu gleichen Unterschieden der Basis-Emitter-Spannung unten gering und werden nach oben immer größer.

Wir erhöhen jetzt die Transistor-Temperatur durch Anfassen. Dabei bleibt der Gleichstromwiderstand unseres Kopfhörers natürlich unbeeinflusst. Würde es sich aber um eine allgemeine Temperaturerhöhung handeln, die auch den Kopfhörer beträfe, so nähme sein Widerstand zu (für eine Temperaturerhöhung von 20 °C auf 32 °C um etwa $4,8\%$), womit die Widerstandsgerade etwas steiler verlief (Punkt an der senkrechten Achse des Bildes E.42 statt bei $4,25$ mA jetzt $1,048$ mal $4,25$ mA $\approx 4,45$ mA). Um diese Änderung wollen wir uns hier nicht weiter kümmern. Die Gleichstrom-Widerstandsgerade ändere sich also nicht.

Wie wir schon festgestellt haben, nimmt der Betrag des Collector-Ruhestromes etwas zu, und zwar bei einer Temperatur-Erhöhung von 20 °C auf 32 °C um rund $0,06$ mA. Das können wir mit Hilfe des Temperaturdurchgriffes ($2,5$ mV/°C zu $-I_C \approx 2$ mA) und den 12 °C Temperaturerhöhung sowie den 510Ω in der Emitterleitung so ausrechnen:

$$12 \text{ °C} \cdot 2,5 \text{ mV/°C} = 30 \text{ mV} \qquad 30 \text{ mV} : 510 \Omega \approx 0,06 \text{ mA.}$$

Als Betrag der Basis-Emitter-Vorspannung ergeben sich also jetzt ungefähr $200 \text{ mV} - 30 \text{ mV} = 170 \text{ mV}$.

Die mit geringer Strichstärke in **Bild E.42** aus Bild E.41 übernommenen Kennlinien für 20°C gehören zu Basis-Emitter-Spannungen, die sich jeweils um etwa 30 mV unterscheiden. Dieselben Unterschiede müssen natürlich auch für die Kennlinien gelten, die einer Umgebungstemperatur von 32 °C zugeordnet sind. Die Kennlinienabstände sind für 32 °C weniger gleichmäßig als für 20 °C. Das besagt: Der

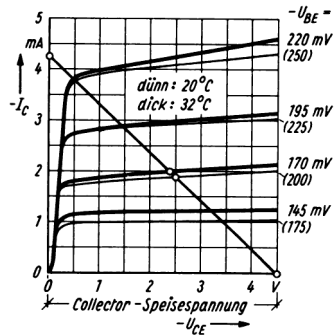


Bild E.42. Das Kennlinienbild von Bild E.41 ergänzt durch eine zweite Kennlinienschar, die für eine höhere Umgebungstemperatur gilt. Der Arbeitspunkt ist von 1,9 mA nur auf 2 mA gewandert.

in der Emitterleitung liegende Widerstand hält zwar den Collector-Ruhestrom und damit im Prinzip auch die Arbeitsbedingungen temperaturunabhängig, doch nehmen die Verzerrungen mit wachsender Temperatur etwas zu. Diese Zunahme könnte nur durch eine auch für Wechselstrom wirksame Gegenkopplung bekämpft werden, die aber eine höhere Steuerleistung voraussetzt.

Schalteilliste

Hierzu Bilder E.40 und E.43.

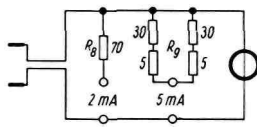


Bild E.43. Die hier zur Meßbereichenerweiterung des Strommessers gewählte Schaltung. Um den Meßbereich von 1 mA auf 2 mA bzw. auf 5 mA zu erweitern, wird jeweils ein Kurzschlußstecker eingesteckt.

Widerstände

R_1	Schichtwiderstand	3,9 k Ω	$\pm 5 \%$
R_2	Schichtwiderstand	5,1 k Ω	$\pm 5 \%$
R_3	Schichtwiderstand	1 k Ω	$\pm 5 \%$
R_4	Drehwiderstand	1 k Ω	

R_5	Schichtwiderstand	10 k Ω	$\pm 5\%$
R_6	Schichtwiderstand	510 Ω	$\pm 5\%$
R_7	Drehwiderstand	100 Ω	
R_8	Drahtwiderstand	70 Ω	$\pm 5\%$
R_9	Drahtwiderstände [2x (30 Ω +5 Ω)]	17,5 Ω	$\pm 5\%$

(Schaltung von JS₈ und ü, gemäß **Bild E.43**, Werte entsprechend Instrument.

Kondensatoren

C_1, C_2, C_3	Elektrolytkondensatoren	100 μ F	6 V
-----------------	-------------------------	-------------	-----

Batterien

B_1	Monozelle	1,5 V
B_2	Taschenlampenbatterie	4,5 V

Kurzschlußstecker, Buchsen, Fassung usw.

8	Kurzschluß-Doppelstecker	(Wisi)
39	Buchsen	
1	Transistor-Fassung	
2	Drehknöpfe	
1	Doppelstecker für Instrument	
1	Kopfhörer	1 k Ω
1	Lautsprecher mit Transformator	1 k Ω

Instrumente

Drehspul-Strommesser, Meßbereich 1 mA
(für R_8 und R_9 , Instrumentenwiderstand mit 17,5 Ω . angenommen)
Drehspulstrommesser, Meßbereiche umschaltbar (siehe Seite 201),
zum Messen von 30 μ A bis 70 μ A

Transistor

OC 602 (Meßobjekt)