

Versuch 5.1a: Transistorverstärker und digitale Bauelemente

Praktikanten: Carl Böhmer, Maxim Singer
Betreuer: Michael Reese

Durchführung: 20.12.2010

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel	2
2 Grundlagen	3
2.1 Halbleiter	3
2.2 Diode	3
2.3 Transistor	4
2.4 Spannungsverstärkung mit und ohne Stromkopplung	6
2.5 Konjunktive und disjunktive Logik	7
3 Durchführung und Auswertung	9
3.1 Messung	9
3.2 Spannungsverstärkung	9
3.3 Berechnung des Stromverstärkungsfaktors β	10
3.4 Bestimmung des Eingangswiderstandes	12
3.5 Linearität der Spannungsverstärkung	13
3.6 Bestimmung der Schaltzeiten	15
4 Aufbau einer Digitalschaltung	17
5 Fazit	17
6 Quellen	17
7 Eigenständigkeitserklärung	18
A Anhang	19

1 Ziel

In diesem Versuch machen wir uns mit der Funktionsweise des Transistors vertraut. Dazu verwenden wir eine Emitterschaltung mit und ohne Stromgegenkopplung, an der wir die Spannungsverstärkung des Transistors in Abhängigkeit von der Frequenz des Eingangssignals untersuchen. Anschließend bestimmen wir mit Hilfe eines Oszilloskops die Schaltcharakteristika des verwendeten Transistors. Zum Abschluss des Versuchs schauen wir uns die Funktionsweise der grundlegenden digitalen Bauelemente an und bauen ein EXOR-Gatter auf der Basis eines 7400-Mikrochips auf.

2 Grundlagen

2.1 Halbleiter

Halbleiter stellen ein Bindeglied zwischen Isolatoren und Leitern dar. In den Isolatoren ist die Bandlücke zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband so groß, dass es viel Energie ($> 3 \text{ eV}$) erfordert um ein Elektron in das Leitungsband zu heben, wo es zur Leitfähigkeit beitragen würde. In den Leitern überlappen sich das Valenz- und das Leitungsband, so dass eine Leitfähigkeit jederzeit gewährleistet ist. Bei Halbleitern ist die Bandlücke kleiner als bei den Isolatoren, so dass man weniger Energie ($< 3 \text{ eV}$) braucht um ein Elektron in das Leitungsband zu heben. Um diese Bandlücke weiter zu verkleinern werden in die Halbleitermaterialien gezielt fremde Atome eingebracht, man nennt dieses Verfahren Dotieren. Je nach dem ob fremde Atome mit mehr oder weniger Valenzelektronen als die Halbleiteratome eingesetzt werden, unterscheidet man zwischen n- bzw. p-dotierten Halbleitern.

2.2 Diode

Eine Diode stellt ein einfaches elektronisches Bauelement auf Halbleiterbasis dar. Sie besteht aus zwei unterschiedlich dotierten Halbleitern. Die Elektronen aus dem n-Halbleiter streben aufgrund ihrer Diffusionsbewegung in den p-Halbleiter und die Löcher aus dem p-Halbleiter in den n-Halbleiter. Die daraus hervorgerufene Ladungstrennung in der Grenzschicht zwischen den beiden Halbleiterschichten führt zu einem elektrischen Feld, welches der weiteren Bewegung der Elektronen entgegenwirkt. So stellt sich in der Grenzschicht ein Gleichgewicht zwischen der Diffusions- und der Coulomb-Kraft ein. Diese Grenzschicht ist in der Regel einige Mikrometer dick und wird Sperrschicht genannt.

Liegt an der Diode eine äußere Spannung an, so unterscheidet man zwei Fälle.

1. Pluspol an n-Schicht, Minuspol an p-Schicht: Die beweglichen Ladungsträger werden aus der Diode abgezogen, so dass sich die Sperrschicht vergrößert. Damit kann kein Stromfluss durch die Diode stattfinden - die Diode sperrt.
2. Pluspol an p-Schicht, Minuspol an n-Schicht: Die Ladungsträger in der Diode werden von beiden Seiten in die Sperrschicht gedrängt, wo sie miteinander rekombinieren, so dass ständig neue Ladungsträger nachfließen können. Dadurch verkleinert sich die Sperrschicht und es fließt ein messbarer Strom zwischen den Polen.

2.3 Transistor

Ein Transistor ist ein elektronisches Bauelement, welches als Spannungs- und Stromverstärker oder als Schalter eingesetzt werden kann. In diesem Versuch verwenden wir einen bipolaren pnp-Transistor, welcher aus drei Halbleiterschichten aufgebaut ist. Wie der Name sagt, liegt zwischen zwei p-dotierten Halbleiterschichten (die beide mit einem Anschluss versehen sind, der eine Anschluss wird als Emitter, der andere als Kollektor bezeichnet) eine n-dotierte Schicht, deren Anschluss als Basis bezeichnet wird. Es bilden sich somit zwei Grenzschichtenübergänge aus.

Schließt man eine Spannungsquelle an den Kollektor und den Emitter an, so kann, außer eines minimalen Sperrstroms, kein Stromfluss stattfinden, da der Kollektor-Basis-np-Übergang in Sperrrichtung geschaltet wird. Schließt man eine weitere Spannungsquelle an Basis und Emitter so an, dass der Basis-Emitter-Übergang leitend wird, so gelangen Elektronen aus dem Emitter in die die p-Schicht, wo sie mit den Löchern rekombinieren. Da die p-Schicht sehr dünn und sehr schwach dotiert ist, gelangen viele Elektronen in die Sperrschicht des darüber liegenden np-Übergangs, wodurch er leitend wird und die Elektronen durch das Spannungspotential zwischen Kollektor und Emitter angezogen werden. Somit lässt sich durch einen kleinen Basisstrom ein großer Kollektorstrom steuern.

Die Charakteristiken eines bipolaren Transistors lassen sich durch sechs Größen I_E, I_B, I_C, U_E, U_B und U_C beschreiben. Mit Hilfe einer durchdachten Auftragung lassen die Beziehungen zwischen diesen Größen in einem zweidimensionalen Koordinatensystem darstellen.

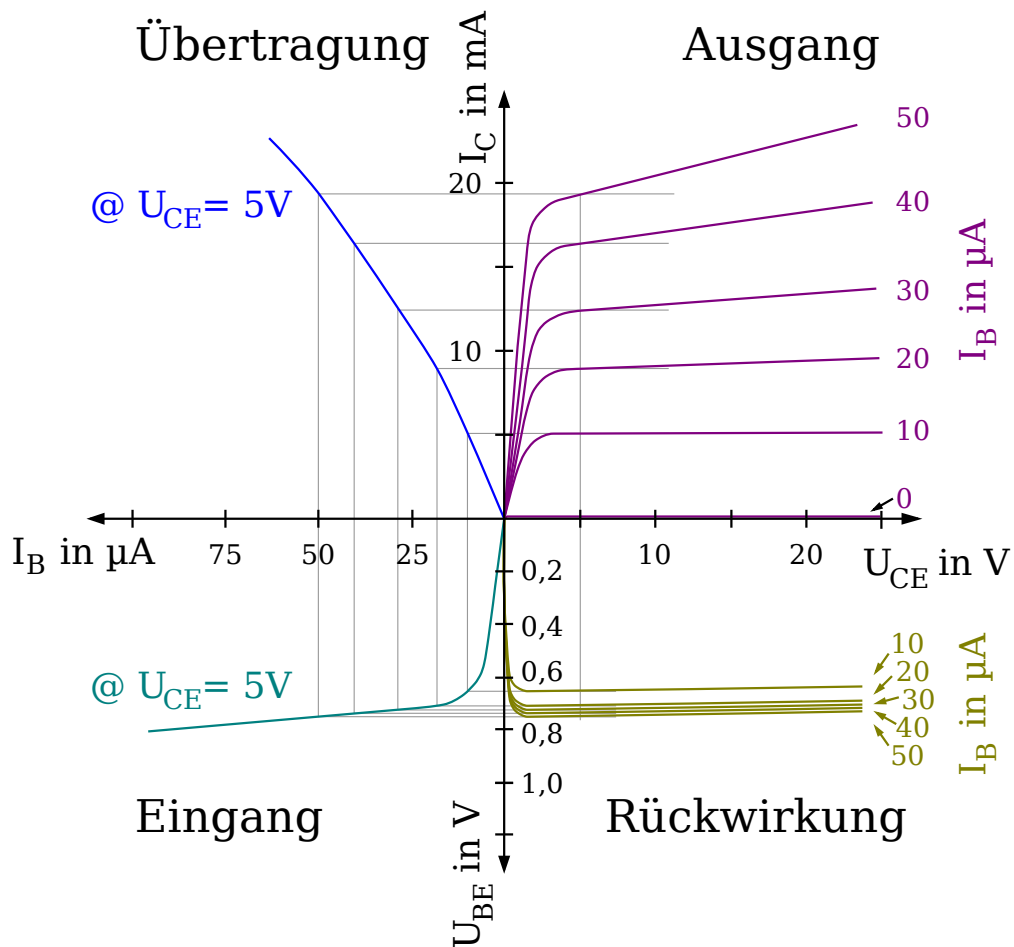


Abbildung 1: Kennlinienfeld eines Transistor in Emitterschaltung). (Quelle: https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/w/index.php?title=Datei:Kombiniertes_Kennlinienfeld_Transistor_2.svg)

Beispielsweise lässt sich im dritten Quadranten - dem Eingangskennlinienfeld - der Funktionsverlauf $I_B = f(U_{BE})$ für eine bestimmte Kollektorspannung U_C ablesen. Da es für jede Kollektorspannung einen etwas anderer Verlauf gibt, entsteht ein Linienfeld, wenn man sie alle in einen Quadranten einträgt (daher auch der Name). In der oberen Abbildung ist aus Übersichtsgründen nur eine Kennlinie eingetragen. Ausführliche Informationen findet man unter [KF] und [BPT].

2.4 Spannungsverstärkung mit und ohne Stromkopplung

Im folgenden sollten analytische Ausdrücke für die Spannungsverstärker in einer Emitterschaltung (Abb. 2) hergeleitet werden. Diese Schaltung kann als eine Vereinfachung der Schaltungen in der Abbildung 12 betrachtet werden, da die Kondensatoren aufgrund der verwendeten Wechselspannung näherungsweise als Leiter ohne einen Widerstand fundieren.

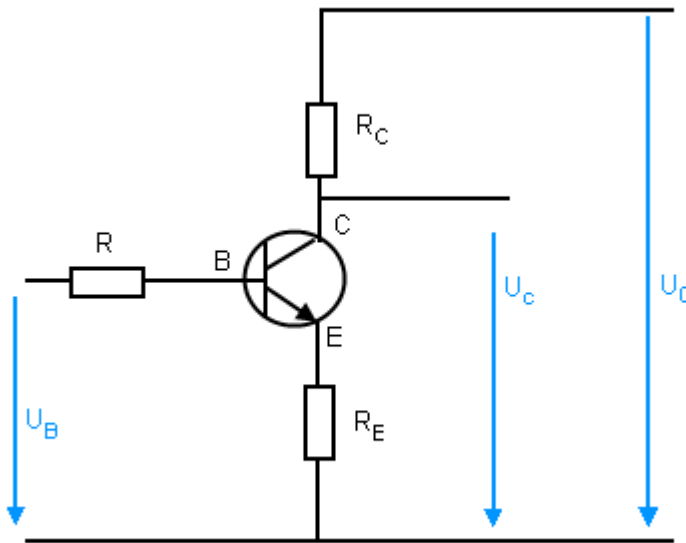


Abbildung 2: Emitterschaltung

Für die Schaltung mit der Gegenkopplung entstehen nach der Maschenregel zwei Ausdrücke.

$$U_0 = U_{R_C} + U_C$$

$$U_B = U_R + U_{B_E} + U_{R_E}$$

Dabei entspricht U_{B_E} dem internen Widerstand des Basis-Emitter-Übergangs.

Betrachtet man die Spannungsverstärkung als das Verhältnis der Eingangs- und der Ausgangsspannungen $v = \left| \frac{\Delta U_C}{\Delta U_B} \right|$, so folgt daraus

$$v = \left| \frac{\Delta(U_{R_C} - U_0)}{\Delta(U_R + U_{B_E} + U_{R_E})} \right| = \frac{\Delta U_{R_C}}{\Delta(U_R + U_{B_E} + U_{R_E})} = \frac{\Delta I_{R_C} R_C}{\Delta I_R R + \Delta I_{B_E} r_{B_E} + (\Delta I_B + \Delta I_{R_C}) R_E}$$

Nimmt man des Weiteren an, dass die Stromverstärkung als $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ definiert ist, so lässt sich der Ausdruck weiter vereinfachen.

$$v = \frac{\beta R_C}{r_{BE} + (1 + \beta)R_E} \approx \frac{\beta R_C}{r_{BE} + \beta R_E}$$

Betrachtet man eine Emitterschaltung ohne Gegenkopplung, so kann der Widerstand R_E auf null gesetzt werden, so dass für die Spannungsverstärkung in diesem Fall einfach gilt:

$$v \approx \frac{\beta R_C}{r_{BE}}$$

2.5 Konjunktive und diskonjunktive Logik

Mit Hilfe der konjunktiven und diskonjunktiven Logik lässt sich aus einer Wahrheitstabelle eine logische Funktion konstruieren, mit der man sofort die in der Wahrheitstabelle beschriebene Funktionsweise mit Hilfe der AND, OR und NOT-Gattern aufbauen kann. Durch entsprechende Umformungen lassen sich auch Ausdrücke gewinnen, die nur auf NAND-Gattern aufbauen.

Bei der diskonjunktiven Logik werden alle Eingänge in den Zeilen in der Wahrheitstabelle, die am Ausgang eine 1 bewirken durch UND-Gatter verknüpft, wobei die so entstandenen Verknüpfungen von mehreren Zeilen untereinander mit ODER verbunden werden.

Bei der konjunktiven Logik geht man analog vor, nur dass man die Zeilen betrachtet, die am Ausgang eine 0 bewirken. Die Eingänge werden negiert und durch ODER-Verknüpfungen verbunden. Die einzelnen Zeilenausdrücke werden mit UND-Verknüpfung zu einer Gesamtfunktion verbunden.

Hier soll am Beispiel des XOR-Gatters die Vorgehensweise mit der diskonjunktiven Logik erläutert werden.

a	b	XOR
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabelle 1: Wahrheitstabelle der XOR-Verknüpfung

Wir betrachten die zweite und die dritte Zeile. Die zweite Zeile entspricht dem Ausdruck $(\bar{a} \wedge b)$, die dritte dem $(a \wedge \bar{b})$. Diese beiden Ausdrücke werden durch ODER-Verknüpfung verbunden, so dass die Gesamtfunktion zu $XOR(a, b) = (\bar{a} \wedge b) \vee (a \wedge \bar{b})$ wird. Diese Funktion lässt sich so umformen, dass die daraus aufgebaute Schaltung nur noch NAND-Gatter benötigt.

$$\overline{\overline{(\bar{a} \wedge b) \vee (a \wedge \bar{b})}}$$

$$\overline{\overline{(\bar{a} \wedge b)} \wedge \overline{\overline{(a \wedge \bar{b})}}}$$

$$\overline{(a \vee \bar{b}) \wedge (\bar{a} \vee b)}$$

$$\overline{(a \wedge \bar{a}) \vee (a \wedge b) \vee (\bar{b} \wedge \bar{a}) \vee (\bar{b} \wedge b)}$$

$$\overline{(a \wedge b) \vee (\bar{b} \wedge \bar{a})}$$

$$\overline{(a \wedge b) \wedge \overline{(\bar{b} \wedge \bar{a})}}$$

$$\overline{(a \wedge b) \wedge (a \vee b)}$$

$$\overline{((a \wedge b) \wedge a) \vee ((a \wedge b) \wedge b)}$$

$$\overline{\overline{((a \wedge b) \wedge a)} \vee \overline{\overline{((a \wedge b) \wedge b)}}$$

$$\overline{\overline{((a \wedge b) \wedge a)} \wedge \overline{\overline{((a \wedge b) \wedge b)}}$$

Der entstandene Ausdruck entspricht der nachfolgenden Schaltung aus 4 NAND-Gattern (Abb. 11). Wie man sieht, ist dieses Verfahren sehr aufwändig und für mehr als 3 Variablen kaum praktikabel, so dass man mit alternativen Algorithmen besser bedient ist. Als Beispiel ist hier an dieser Stelle das **Karnaugh-Veitch-Diagramm**-Verfahren zu nennen.

3 Durchführung und Auswertung

3.1 Messung

Für die Messung der Spannungsverstärkung haben wir das sinusförmige Signal vom Frequenzgenerator mit der Amplitude von $10 \text{ mV} \pm 0.5 \text{ mV}$ an den Eingang der Schaltung 1 (Abb. 12) geleitet. Das verstärkte Signal wurde auf einem Oszilloskop betrachtet, an dem auch die Messwerte abgelesen wurden. Die Frequenz des Eingangssignals wurde am Frequenzgenerator in ungleichen Schritten von 2 Hz auf 8 MHz (Bandbreite des Frequenzgenerators) erhöht. Dabei wurde bei jedem Schritt die Ausgangsspannung notiert.

Mit steigender Frequenz wurde die Amplitude des Signals scheinbar immer kleiner, so dass wir die Anweisung bekommen haben, diese durch Nachregeln immer konstant zu halten. Als bereits genug Daten angefallen waren um sich ein Bild über den Verlauf der Spannungsverstärkungskurve zu machen, wurde offensichtlich, dass diese nicht dem erwarteten Trapez mit runden Ecken entspricht (Abb. 9). Daraufhin wurden für den Frequenzbereich von 2 kHz bis 9 MHz eine neue Messung durchgeführt ohne die Eingangsamplitude nachzuregeln.

Für die Auswertung wurden im Frequenzbereich 2 Hz bis 1 kHz die Messwerte aus der ersten Messung herangezogen, für den Frequenzbereich von 2 kHz bis 8 MHz die Messwerte aus der neuen Messung.

3.2 Spannungsverstärkung

Die Spannungsverstärkung lässt nach der Definition $v(f) = \frac{U_{aus}(f)}{U_{ein}}$ bestimmen. Nach dieser Formel entstandenen Datenpunkte wurden im Programm Mathematica durch eine Funktion der Form $v(f) = \frac{v_{max}}{(\frac{f}{f_U})^{f_U} + (\frac{f}{f_O})^{f_O} + 1}$ angenähert. Der entstandene Verlauf entspricht der Spannungsverstärkung in Abhängigkeit der Eingangsfrequenz. Die Messunsicherheiten wurden mit Fehlerfortpflanzung bestimmt.

$$\Delta v(f) = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{aus}(f)}{U_{ein}}\right)^2 + \left(-\frac{U_{aus}(f)\Delta U_{ein}}{U_{ein}^2}\right)^2}$$

Aus dem entstandenen Graphen (Abb. 3) wird deutlich, dass die Spannungsverstärkung in einer Schaltung ohne Gegenkopplung viel höher ist, in unserem Fall um etwa Faktor 20.

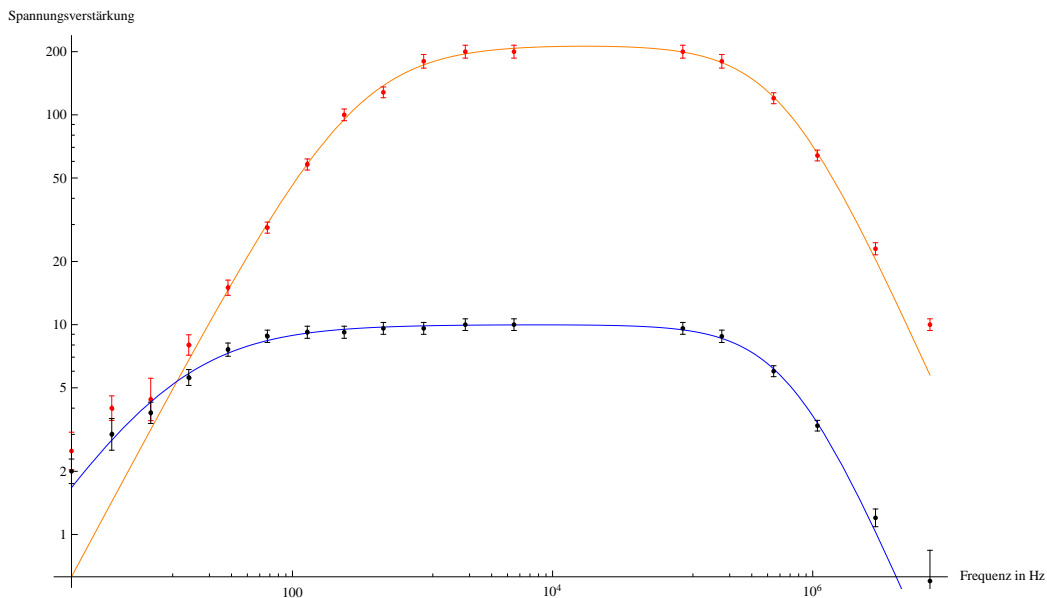


Abbildung 3: Spannungsverstärkung: ohne GK ohne Basiswiderstand (orange/oben); mit GK Basiswiderstand R (blau/unten)

Aus den Fit-Parametern der angenäherten Funktionen lässt sich sagen, in welchem Frequenzbereich die Spannungsverstärkung optimal ist. Dazu gibt Mathematica folgende Werte aus (Tab. 2). Der optimale Bereich liegt zwischen f_U und f_O .

Schaltung	v_{max} in V	f_U in Hz	f_O in Hz
ohne Gegenkopplung	215.7	306	601007
mit Gegenkopplung	10.0	11	688844

Tabelle 2: Plotparameter der Spannungsverstärkung

Weil die angenäherte Funktion zwar das Plateau gut beschreibt, aber nicht die Randbereiche, lässt sich bereits an dieser Stelle sagen, dass dies spürbare Auswirkungen auf die Bestimmung des Stromverstärkungsfaktors und des Transistorwiderstands haben wird.

3.3 Berechnung des Stromverstärkungsfaktors β

Um die Stromverstärkung zu bestimmen haben wir die Beziehungen für Spannungsverstärkung nach β umgestellt. Daraus ergeben sich für die Schaltung mit und ohne Gegenkopplung ähnliche Ausdrücke, die sich nur in dem einzusetzenden

Spannungsverstärkung unterscheiden.

Ohne Gegenkopplung:

$$\beta(f) = \frac{v_{ohneGKmitR}(f) R_{ohneGK}(f)}{R_C - \frac{v_{ohneGKmitR}(f)}{v_{ohneGKohneR}(f)} R_C}$$

Mit Gegenkopplung:

$$\beta(f) = \frac{v_{mitGKmitR}(f) R_{mitGK}(f)}{R_C - \frac{v_{mitGKmitR}(f)}{v_{mitGKohneR}(f)} R_C}$$

Mit diesen beiden Funktionen wurde der Stromverstärkungsfaktor für gegebene Frequenzen berechnet und in einem Plot dargestellt (Abb. 4).

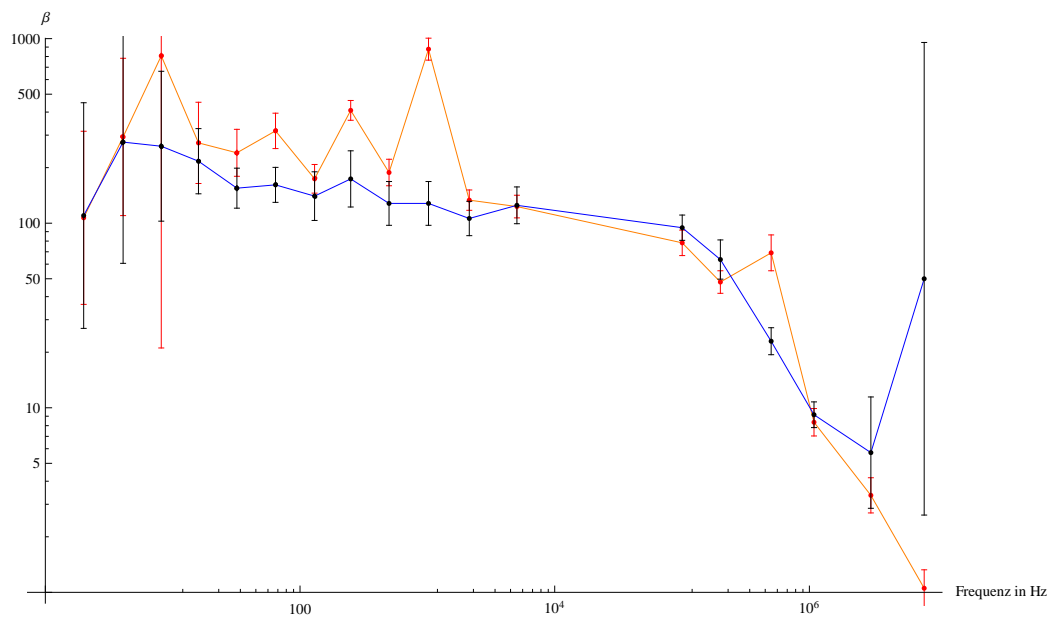


Abbildung 4: Stromverstärkung: ohne GK (orange); mit GK (schwarz).

Da die Stromverstärkung eine Transistoreigenschaft ist, haben die beiden Plots in etwa den gleichen Verlauf. Im Plateau-Bereich ist die Stromverstärkung annähernd konstant und fällt erst danach ab.

Die deutlich erkennbaren Ausreißer am Anfang des Frequenzspektrums sind systematische Fehler, da wir am Anfang des Versuchs noch nicht den Dreh raus hatten, wie man bei der Bestimmung des Basiswiderstandes vorgeht.

3.4 Bestimmung des Eingangswiderstandes

Für die Bestimmung des Widerstands R_{BE} haben wir den Stromverstärkungsfaktor verwendet, wobei folgende Beziehungen benutzt wurden.

Ohne Gegenkopplung:

$$R_{BE}(f) = \frac{\beta(f)R_C}{v_{ohneGKohneR}(f)}$$

Mit Gegenkopplung:

$$R_{BE}(f) = \frac{\beta(f)(R_C - R_{EV_{ohneGKmitR}(f)})}{v_{ohneGKmitR}(f)}$$

Die entstandenen Plots weisen bereits oben beschriebene Fehler auf. Aus diesem Grund lässt sich ein sinnvoller Wert für R_{BE} nur im Plateau-Bereich (der Spannungsverstärkung) ablesen (Abb. 5).

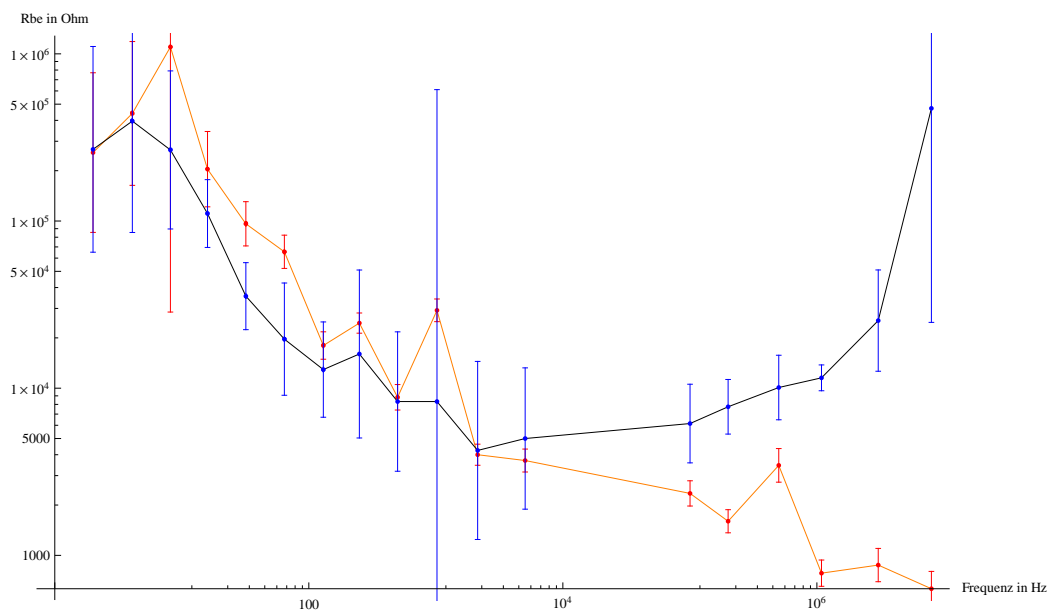


Abbildung 5: Widerstand zwischen Basis und Emitter: bestimmt ohne GK (orange) und mit GK (schwarz).

Ähnlich wie die Stromverstärkung ist auch der Basis-Emitter-Widerstand eine interne Transistoreigenschaft, die unabhängig von der Schaltung gleich bleiben müsste. Die beiden Graphen stimmen im Plateau-Bereich auch grob überein. Leider fehlen gerade in diesem Bereich uns ein paar Messwerte um einen besseren Vergleich anzustellen.

3.5 Linearität der Spannungsverstärkung

In diesem Abschnitt des Versuchs haben wir uns die Linearität der Spannungsverstärkung am Oszilloskop angeschaut. Die Eingangsspannung von der Verstärkerschaltung mit Stromgegenkopplung wurde an die x-Achse des Oszilloskops gelegt, die Ausgangsspannung an die y-Achse. Das Oszilloskop wurde im Schreiber-Modus betrieben. Es wurden drei grundlegende Verstärkungsbereiche festgestellt, die im folgenden als Skizzen des Oszilloskopbildes qualitativ wiedergegeben werden.

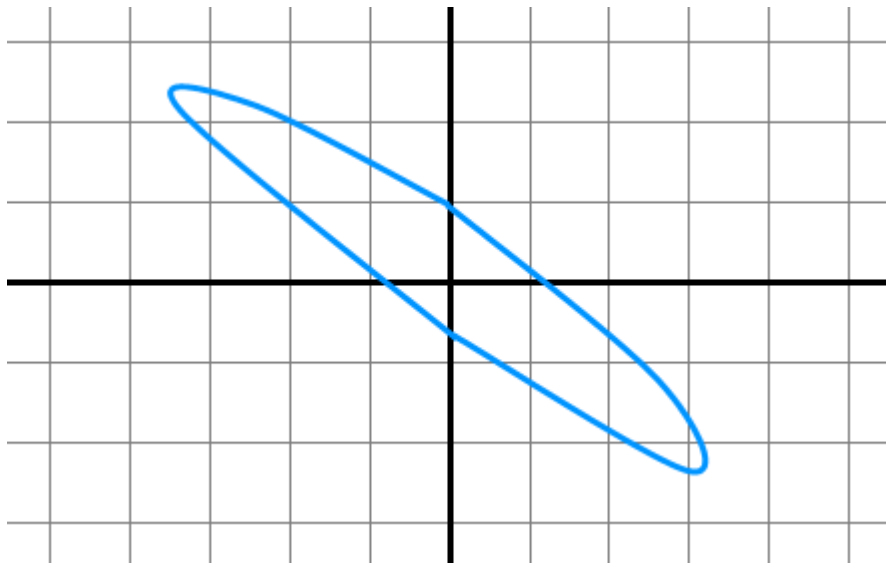


Abbildung 6: Ellipsenform, was einer linearen Verstärkung mit Phasenverschiebung entspricht. Einstellungen: $f=28.4$ kHz, $x: 50$ mV/div, $y: 200$ mV/div.

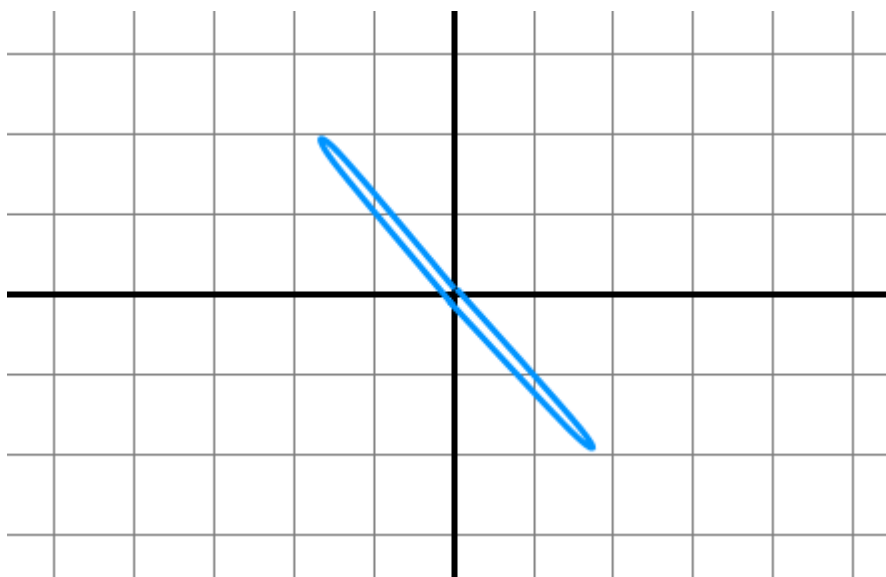


Abbildung 7: Zur einer Linie zusammengequetschte Ellipse, was einer linearen Verstärkung ohne Phasenverschiebung entspricht. Einstellungen: $f=1.37$ kHz, $x: 50$ mV/div, $y: 200$ mV/div.

Die Abbildung 8 zeigt eine deutliche Verzerrungen in dem Linearitätsverlauf auf. Diese kommen daher, dass die Amplitude der Eingangsspannung (Wech-

selspannung) so groß ist, dass sie einerseits zu stark in den negativen Bereich fällt, so dass die Basis-Emitter-Spannung zu niedrig für die Funktionsweise der Schaltung ist, andererseits aber auch zu hoch, dass es zu einer Sättigung des Stromflusses kommt, d.h. es wird eine maximal mögliche Verstärkung erreicht, wobei eine weitere Erhöhung der Eingangsspannung keinen Effekt auf die Ausgangsspannung hat, was schließlich in einem Plateau im unteren rechten Bereich resultiert.

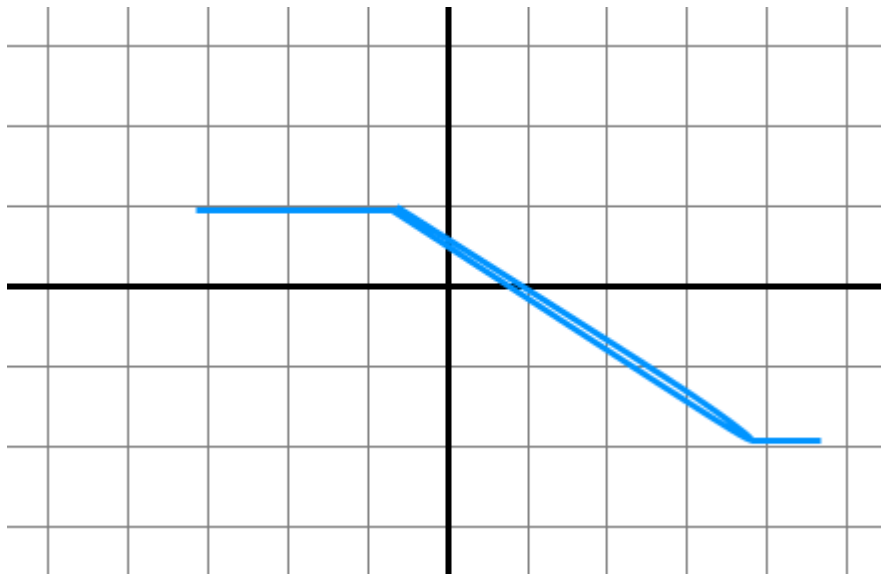


Abbildung 8: Gestörte Linearität aufgrund zu niedriger Eingangsspannungsamplitude(links) und Übersättigung(rechts). Einstellungen: $f=1.27$ kHz, $x: 0.5$ V/div, $y: 2$ V/div.

3.6 Bestimmung der Schaltzeiten

Im zweiten Teil des Versuchs haben wir den Transistor als Schalter benutzt (Abb. 12). Dazu leiteten wir ein Rechtecksignal an den Eingang und beobachteten die Schaltzeiten am Oszilloskop. Das Signal entsprach in etwa dem auf der Abbildung 10.

Folgende Werte wurden gemessen.

U_e in V	t_s in ns	t_f in ns
1.5	20	110
2.5	60	120
5	90	130
8	100	125
10	110	130

Tabelle 3: Speicher- und Fallzeit. $\Delta t = 5$ ns.

U_e in V	t_v in ns	t_{st} in ns
1.5	100	720
2	55	60
2.5	40	35
3	35	25
4	30	15
5	25	15
8	20	10
10	20	10

Tabelle 4: Verzögerungs- und Steigzeit. $\Delta t = 5$ ns.

Da ein Transistor eine bestimmte Zeit benötigt um ein Signal vollständig wiederzugeben, kann er kein weiteres Signal in der Zwischenzeit verarbeiten. Daraus resultiert, dass die maximale Arbeitsfrequenz in etwa dem Kehrwert der Zeit beträgt, die ein Transistor für einen Schaltvorgang benötigt.

Auf Basis der Messwerte haben wir die maximale Arbeitsfrequenz berechnet.

Spannung in V	$t_v + t_{st} + t_s + t_f$ in ns	f in MHz
2.5	255 ± 10	3.92 ± 0.04
5	260 ± 10	3.85 ± 0.04
8	255 ± 10	3.92 ± 0.04
10	270 ± 10	3.70 ± 0.04

Tabelle 5: Maximale Schaltfrequenz

Diese Messwerte decken sich gut mit dem Verlauf der Spannungsverstärkung, bei dem sichtbar wird, dass die Verstärkung ab einer Frequenz von wenigen MHz nachlässt.

Allgemein lässt sich beobachten, dass bei einer steigenden Eingangsspannung, die Speicherzeit auch steigt, die Fallzeit konstant bleibt, die Verzögerungszeit etwas und die Steigzeit deutlich sinken.

4 Aufbau einer Digitalschaltung

Im letzten Abschnitt des Versuchs haben wir uns mit der Funktionsweise logischer Gatter beschäftigt. Dazu haben wir ein XOR-Gatter aus vier NAND Gattern, die sich auf einem 7400-Mikrochip befanden, aufgebaut. Es wurden keine Messungen durchgeführt. Stattdessen haben wir die XOR-Wahrheitstabelle (Tabelle 1) durchlaufen und geschaut, ob sich das von uns aufgebaute auch wie gewünscht verhält, was auch der Fall war.

5 Fazit

Obwohl unsere Messung am Anfang des Versuchs einen groben systematischen Fehler aufwies, konnten aus den Messdaten einigermaßen vernünftige Werte abgeleitet werden.

Ein anderer negativer Aspekt, der uns leider erst in der Auswertung aufgefallen ist, war die Bestimmung des Widerstands R an der Basis. Dieser Widerstand müsste viel genauer bestimmt werden, um gute Messwerte zu bekommen, was aber nicht so einfach ist, da der Ablesevorgang doch sehr subjektiv ist.

6 Quellen

Literatur

- [ANLEITUNG] Anleitung zum Versuch 5.1
- [MAPPE 5.1] Literaturmappe zum Versuch 5.1
- [DGT Script] https://www.fbi.h-da.de/fileadmin/personal/e.komar/public_html/DGT-Skript-Teil1.PDF, 10.01.2011
- [BPT] <https://secure.wikimedia.org/wikipedia/de/wiki/Bipolartransistor>, 12.01.2011
- [KF] <http://www.elektroniktutor.de/bauteile/transkl.html>, 12.01.2011

7 Eigenständigkeitserklärung

Wir versichern hiermit, dass wir die vorliegende Ausarbeitung selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt haben. Die Stellen, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, haben wir durch die Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Darmstadt, 25.01.2011

Carl Böhmer, Maxim Singer

A Anhang

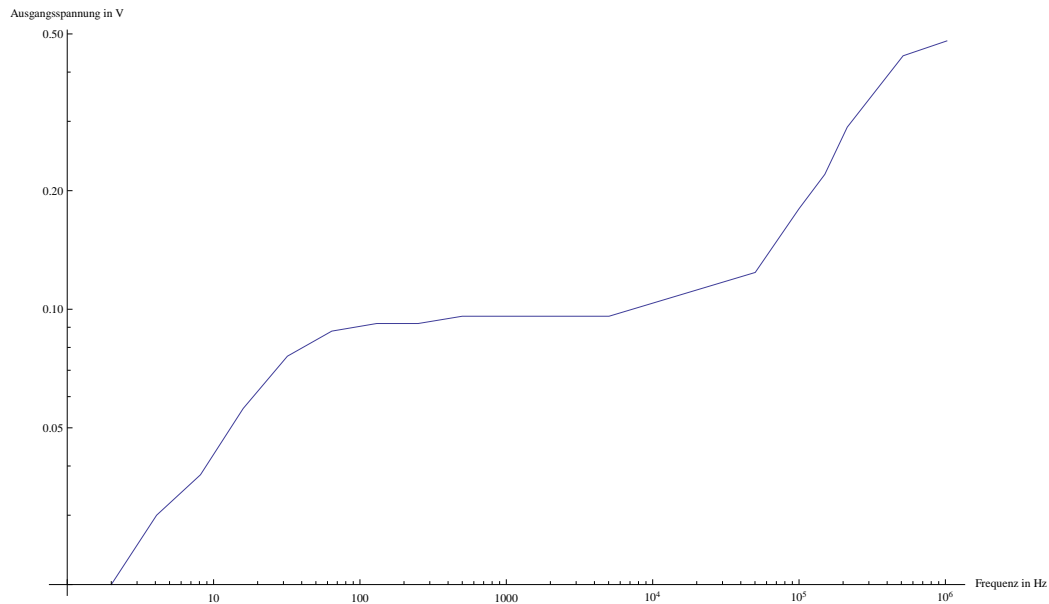


Abbildung 9: Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz des Eingangssignal, wenn die Signalamplitude am Frequenzgenerator während der Messung nachgeregelt wird, so dass am Oszilloskop die Verläufe immer eine feste Breite haben. Diese Vorgehensweise ist offensichtlich falsch.

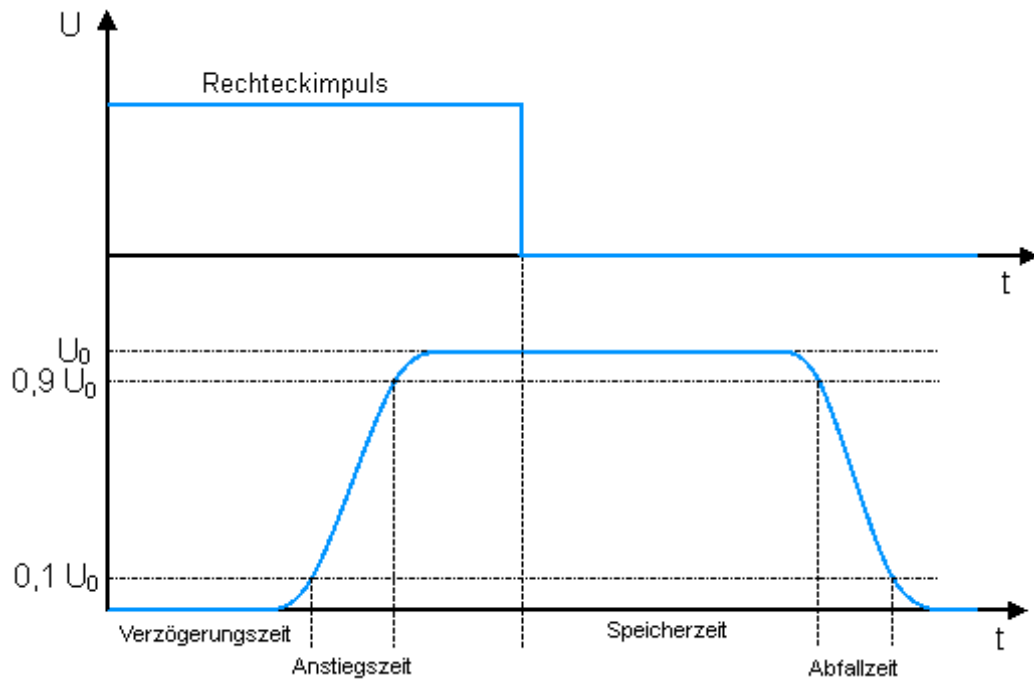


Abbildung 10: Transistorschaltzeiten in schematischer Darstellung

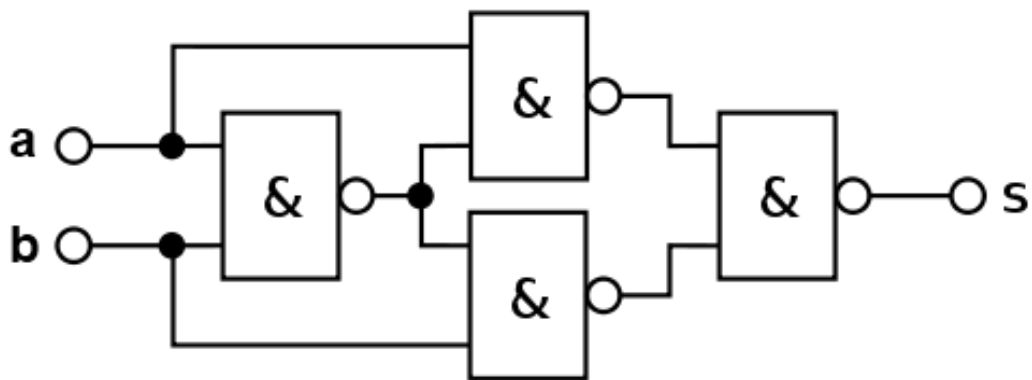
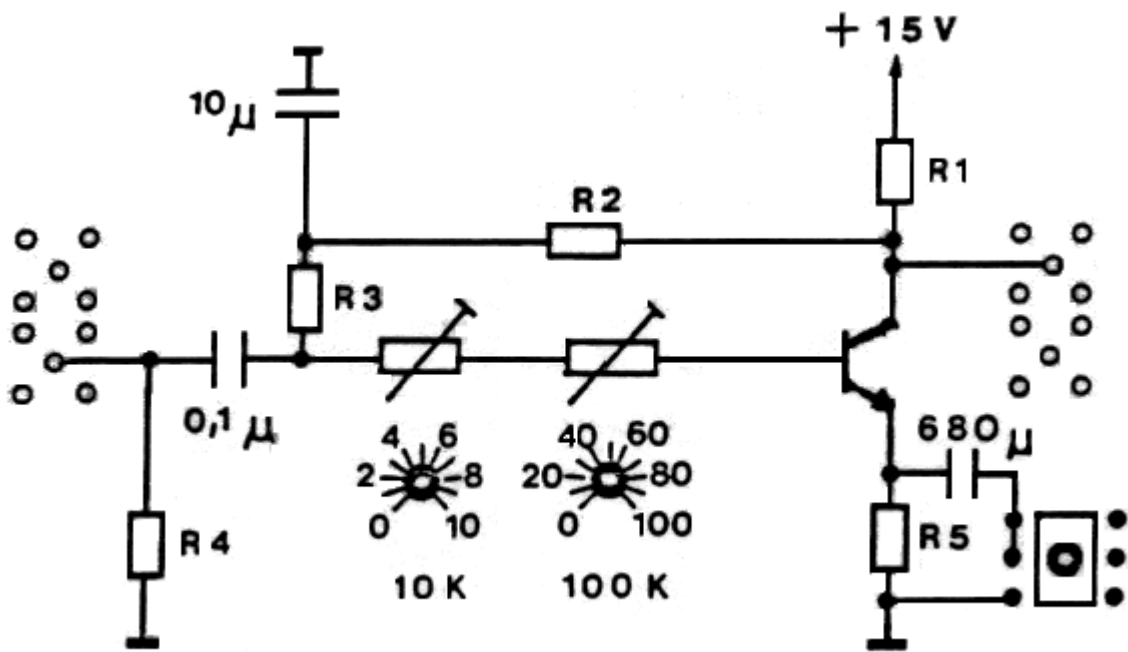
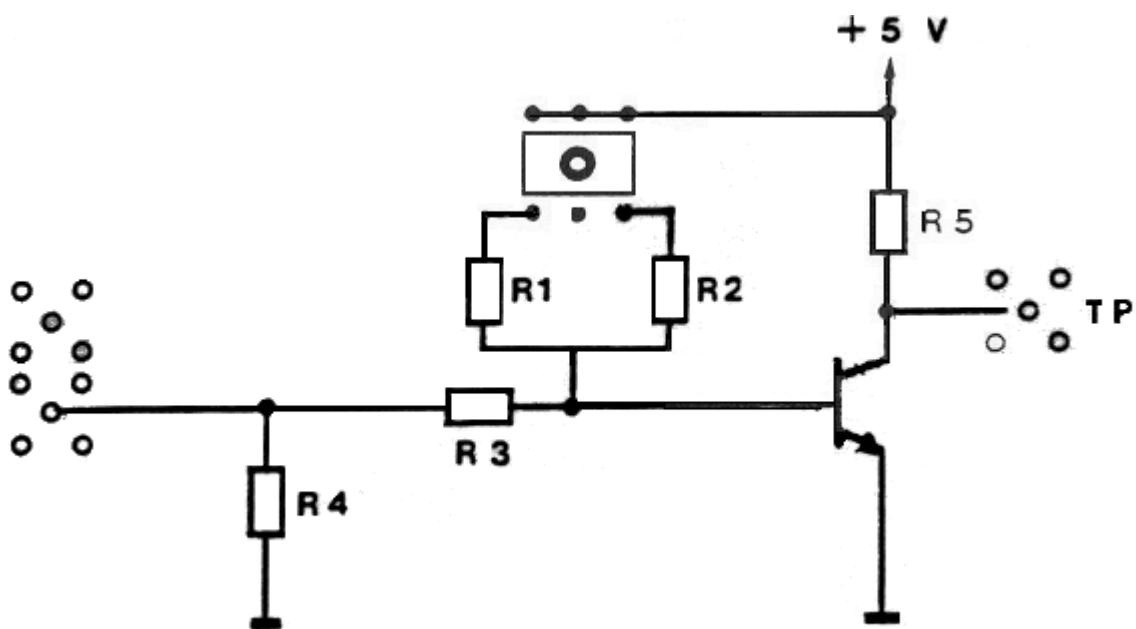


Abbildung 11: XOR-Gatter aufgebaut aus 4 NAND-Gattern.(Quelle:www.wikipedia.de/XOR)



$R1 = 6 \text{ k}\Omega$, $R2, R3 = 560 \text{ k}\Omega$, $R4 = 50 \text{ }\Omega$, $R5 = 560 \text{ }\Omega$

Abbildung 12: Versuchsschaltung des Transistorverstärkers



$R1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R3, R5 = 1 \text{ k}\Omega$, $R4 = 50 \text{ }\Omega$

Abbildung 13: Schaltfunktionen des Transistors