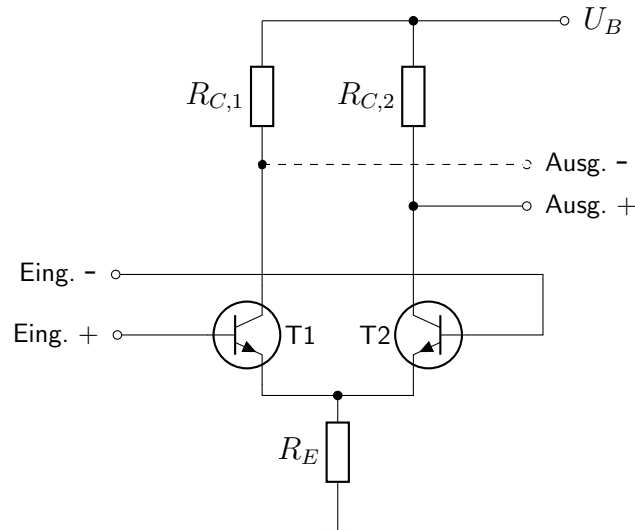


## Der Differenz-Verstärker

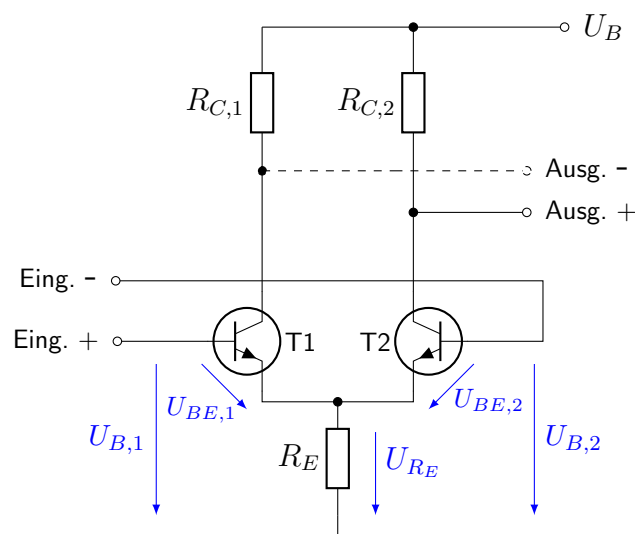
Nachdem wir die Funktionsweise eines einfachen NF-Verstärkers betrachtet haben, wenden wir uns einer speziellen, aber sehr wichtigen und häufig eingesetzten Form des Verstärkers zu: dem **Differenz-Verstärker**.



**Bild 1:** Ein Differenz-Verstärker (Prinzip-Schaltbild)

Diese Schaltung in Bild 1 sieht erst einmal komisch aus. Um deren Funktion zu verstehen müssen wir uns noch einmal mit dem **Bezugspotential** und der **Gegenkopplung** beschäftigen. Bei dem Verstärker aus Schaltung 019 war das **Bezugspotential** sowohl für das Ein- als auch für das Ausgangssignal die **Masse**. Bei diesem Verstärker ist das **Bezugspotential** für unser Eingangssignal nicht die Masse des Verstärkers, sondern die **zweite Eingangsleitung**.

Wir müssen aber auch die Gegenkopplung beachten. Dazu ist die Schaltung in Bild 2 nochmal mit den wichtigen Spannungen in **blau** dargestellt.



**Bild 2:** Ein Differenz-Verstärker mit eingezeichneten Spannungen

Wir erinnern uns, dass sich Spannungen addieren<sup>1</sup>. Wie dann anhand der eingezeichneten Spannungen zu erkennen ist, gilt:

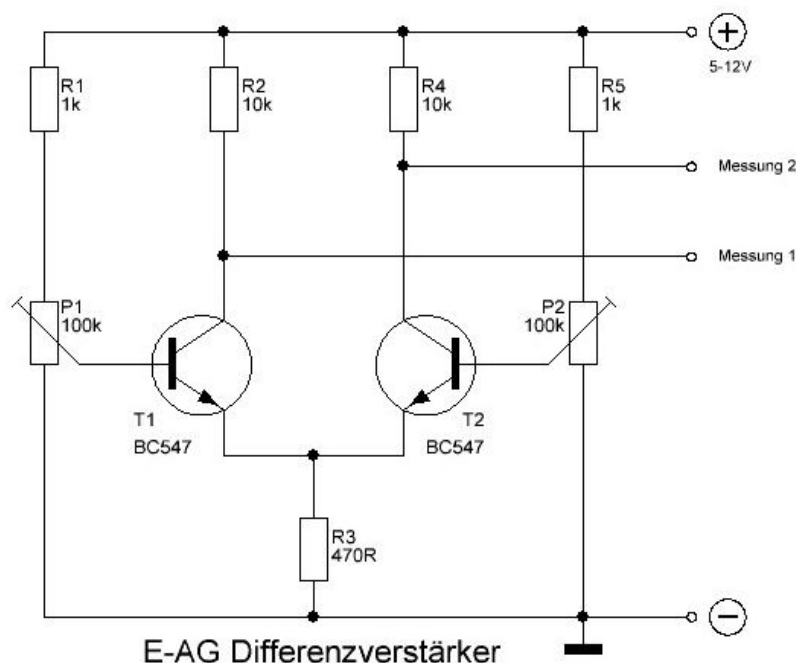
$$U_{B,1} = U_{BE,1} + U_{R_E} \quad (1)$$

$$U_{B,2} = U_{BE,2} + U_{R_E} \quad (2)$$

Die beiden Transistoren sind über den gemeinsamen Gegenkopplungswiderstand in der Emittenerleitung miteinander verkoppelt.

## Beschreibung der Funktion

Wozu nun das Ganze und wie arbeitet diese Schaltung? Schauen wir uns dazu das Schaltbild einer realen Schaltung in Bild 3 an.



**Bild 3:** Testschaltung für Differenzverstärker

An die Basen beider Transistoren kann über die Potentiometer  $P_1$  und  $P_2$  eine variable Spannung gelegt werden. Die Widerstände  $R_1$  und  $R_5$  dienen zum Schutz der Transistoren für den Fall, dass wir das Potentiometer ganz an das positive Ende drehen.

- Zum Test der Schaltung stellen wir das Potentiometer  $P_1$  so ein, dass die Spannung an der Basis von  $T_1$  gegen Masse  $U_{B,1}$  bei ungefähr 1.5 V liegt.
- Das Potentiometer  $P_2$  drehen wir ganz bis zum linken Anschlag. Dann ist die Spannung  $U_{B,2}$  an der Basis von  $T_2$  nahezu 0 V.
- $T_2$  sperrt also, und wir können ihn uns für einen Moment als aus der Schaltung gestrichen vorstellen.

<sup>1</sup>Denkt die im Zick-Zack oder hintereinander einzulegenden Batterien in verschiedenen Geräten.

- Am Kollektor von  $T_2$  (Ausgang 2) liegt dann praktisch die volle Betriebsspannung.
- Die Spannung an der Basis von  $T_1$  hatten wir auf 1.5 V eingestellt.
- $T_1$  leitet also, und es fließt ein Strom durch den (gemeinsamen) Emitterwiderstand  $R_3$ , welcher die Gegenkopplung darstellt.
- An diesem Widerstand steht also die Spannung  $U_3$  an.
- Am Kollektor von  $T_1$  (Ausgang 1) messen wir eine eher niedrige Spannung, welche sich im Wesentlichen aus dem durch  $R_2$  und  $R_3$  gebildeten Spannungsteiler ergibt.
- Da die Basis von  $T_2$  ungefähr auf 0 V liegt, ist die Spannung an seinem **Emitter größer** als an der **Basis**. Die Basis-Emitter-Diode ist daher sogar in **Sperrrichtung** gepolt! Also keine Chance für  $T_2$  zu leiten ☺.

Was passiert jetzt, wenn wir die Spannung an der Basis von  $T_2$  durch drehen des Potentiometers  $P_2$  langsam erhöhen?

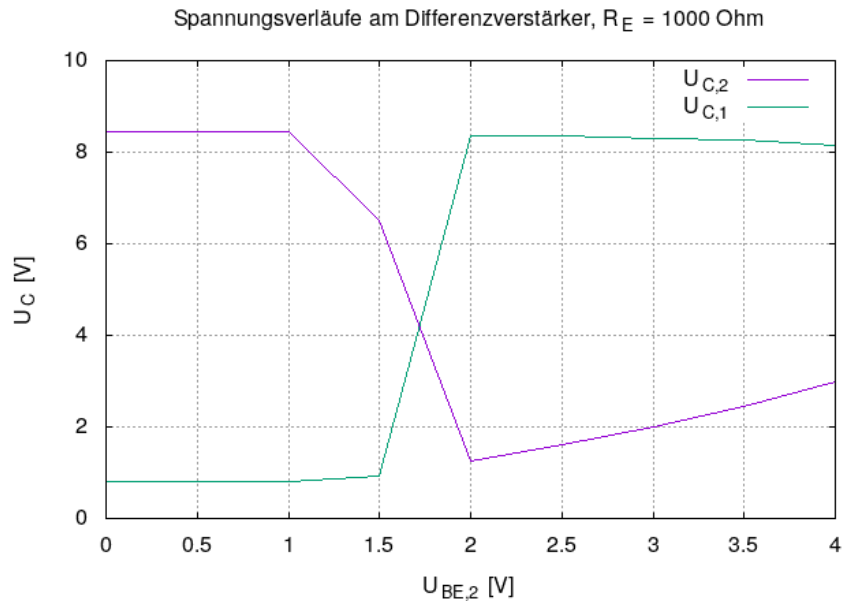
- Wenn wir das Potentiometer  $P_2$  langsam in Richtung der positiven Spannung drehen, erhöht sich dadurch die Spannung an der Basis von  $T_2$ .
- Sobald die Spannung größer wird als  $U_3 + 0.7\text{ V}$ , beginnt  $T_2$  zu leiten.
- Dadurch fließt aber ein erhöhter Strom durch den Widerstand  $R_3$  und erhöht dort den Spannungsabfall.
- Davon wird jetzt aber auch  $T_1$  beeinflusst, denn wenn sich bei ihm die Emitterspannung erhöht, verringert sich seine Basis-Emitter-Spannung und er leitet etwas weniger.

Es stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem beide Transistoren ein wenig leiten. Dies ist auch in Bild 4 zu sehen welches nach einer Messreihe gezeichnet wurde.

Die Spannung an der Basis von  $T_2$ ,  $U_{B,2}$ , ist auf der horizontalen Achse aufgetragen. Die violette Kurve zeigt die Spannung am Kollektor von  $T_2$ ,  $U_{C,2}$ . Die grüne Kurve zeigt die Spannung am Kollektor von  $T_1$ ,  $U_{C,1}$ . Als Emitterwiderstand wurde hier, abweichend vom Schaltplan, der Wert von  $1\text{ k}\Omega$  verwendet. Gut zu erkennen ist auch der Übergangsbereich, in dem beide Transistoren leiten.

- Erhöhen wir jetzt die Spannung an der Basis von  $T_1$  weiter, so steigen der Strom durch  $T_1$  und damit die Spannung am Emitterwiderstand  $R_3$  immer weiter an.
- Sinkt dadurch die Basis-Emitter-Spannung von  $T_2$  unter  $0.7\text{ V}$  sperrt  $T_2$ .
- Wir haben jetzt also den Zustand, dass  $T_2$  leitet und  $T_1$  sperrt.
- Am Kollektor von  $T_2$  (Ausgang 2) messen wir jetzt eine niedrige Spannung, während wir am Kollektor von  $T_1$  eine hohe Spannung messen (weil  $T_1$  sperrt).
- Der Verstärker hat also **umgeschaltet** als die Spannung an der Basis von  $T_2$  größer wurde als die an der Basis von  $T_1$ ! Auch dies ist in Bild 4 gut zu erkennen.

Wir haben also eine Schaltung, welche auf die **Unterschiede** in den Basis-Spannungen der beiden Transistoren reagiert. Die Spannungen werden dadurch **verglichen**. Ist die Basisspannung von



**Bild 4:** Spannungsverläufe am Differenzverstärker,  $R_E = 1 \text{ k}\Omega$

$T_1$  größer als die von  $T_2$ , so leitet  $T_1$ , und die Spannung am Ausgang 2 liegt auf nahe der Betriebsspannung. Im anderen Fall leitet  $T_2$  und die Ausgangsspannung liegt auf einem niedrigen Wert.

Wenn wir den vorherigen Zustand wieder herstellen wollen, müssen wir die Basisspannung von  $T_1$  durch Drehen von  $P_1$  weiter erhöhen. Wird diese größer als die Basisspannung von  $T_2$  läuft der beschriebene Prozess anders herum ab,  $T_1$  leitet wieder und  $T_2$  sperrt.

Aufgrund dieses Verhaltens ist es auch einzusehen, dass diese Schaltung nur **Differenzen** zwischen den beiden Signalen verstärkt. Steigt oder fällt die Spannung an beiden Eingängen gleichmäßig, hat das auf die Ausgangsspannung keinen Einfluss.

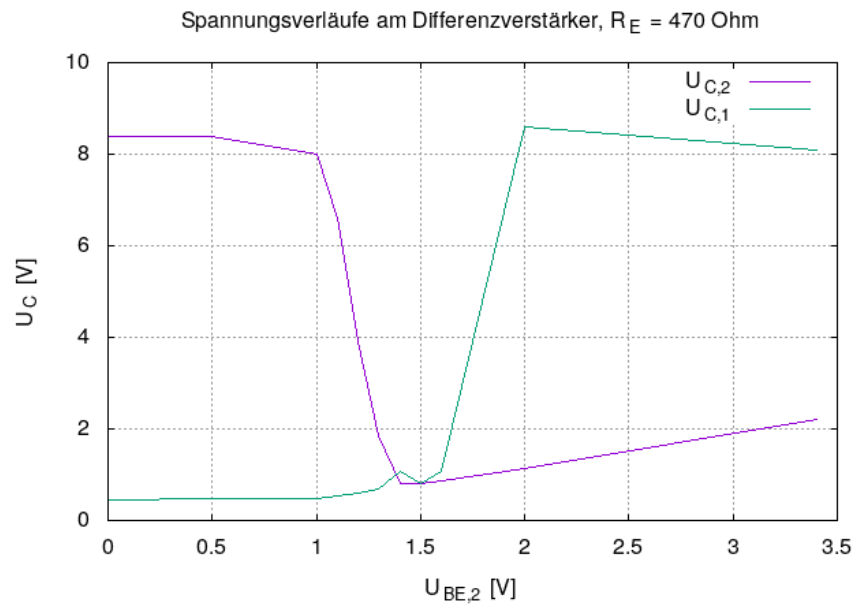
### Einfluss des Emitterwiderstands

Das genaue Verhalten des Differenzverstärkers hängt natürlich auch von den Werten der verwendeten Widerstände ab. Insbesondere der gemeinsame Emitterwiderstand hat hier einen Einfluss, da er die Gegenkopplung und damit die gegenseitige Beeinflussung der beiden Transistoren bestimmt.

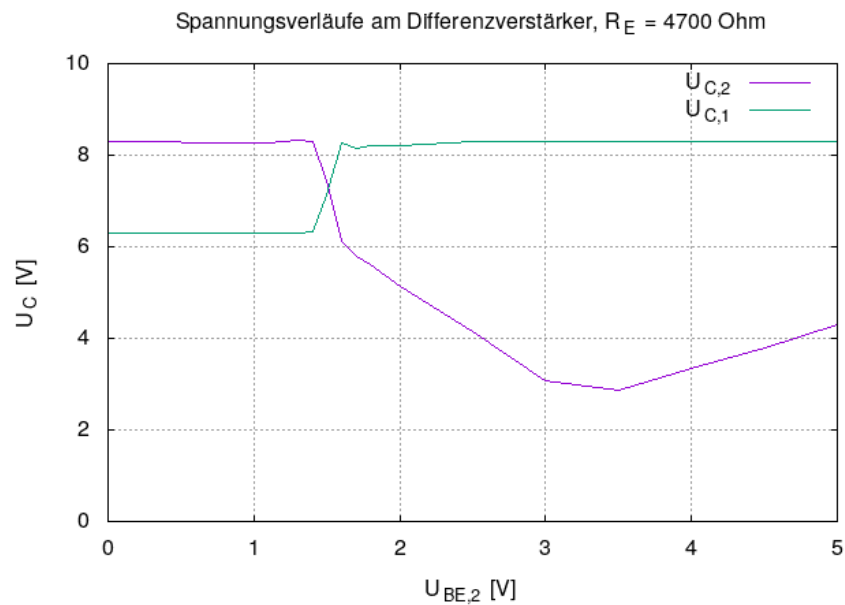
Bei einem Emitterwiderstand von  $470 \Omega$  ist die Kopplung nicht so stark und der Bereich, in dem beide Transistoren leiten, ist größer, wie das in Bild 5 zu sehen ist.

Bei einem Emitterwiderstand von  $4.7 \text{ k}\Omega$  ist die Kopplung wesentlich stärker. Dies ist in Bild 6 zu sehen. Die Umschaltung erfolgt deutlich schneller.

⇒ *Wem das jetzt noch zu kompliziert war, der muss sich deswegen keine Sorgen machen! Wichtig ist nur, sich zu merken, dass die Schaltung nur die **Differenzen** zwischen den beiden Eingängen verstärkt.*



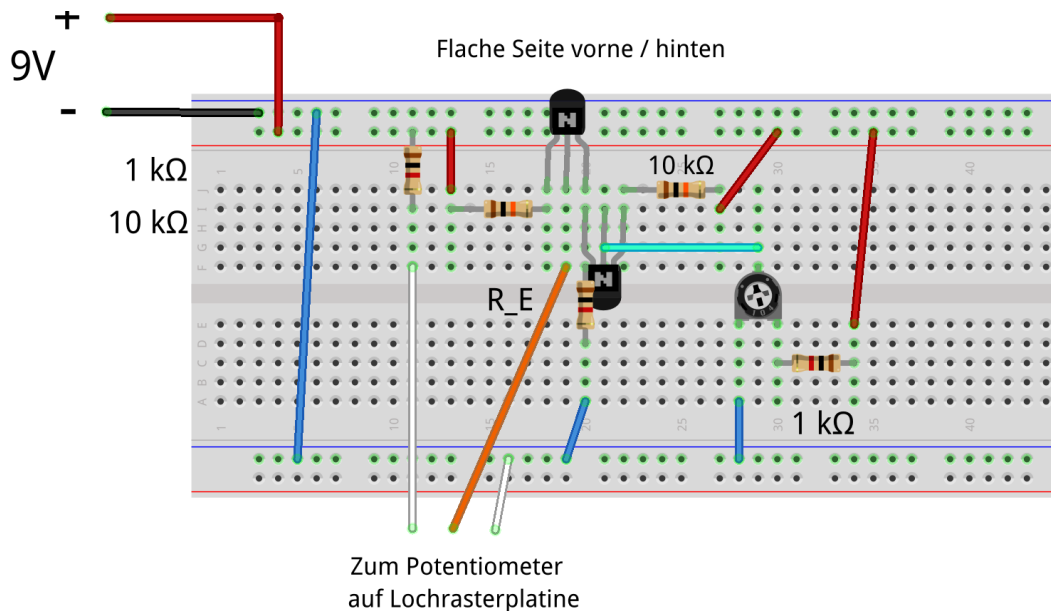
**Bild 5:** Spannungsverläufe am Differenzverstärker,  $R_E = 470 \Omega$



**Bild 6:** Spannungsverläufe am Differenzverstärker,  $R_E = 4.7 \text{ k}\Omega$

## Aufbau der Schaltung

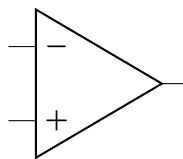
Die Aufbauskitze zu unserem Differenzverstärker zeigt Bild 7. Sie unterscheidet sich in einem Punkt von den bisherigen Schaltungen: die beiden Transistoren müssen um  $180^\circ$  „gegeneinander“ gedreht eingebaut werden. D. h.,  $T_1$  mit der flachen Seite nach vorne und  $T_2$  mit der flachen Seite nach hinten eingesteckt. Auf diese Weise können die Emittoren direkt miteinander verbunden werden, ohne dass hierzu zusätzliche Verdrahtung notwendig ist.



**Bild 7:** Aufbauskitze für Differenzverstärker

## Der Operationsverstärker

Diese hier vorgestellte Schaltung ist so wichtig, dass sie auch in Form einer Vielzahl integrierter Schaltungen verfügbar ist. Diese Schaltung heißt dann **Operationsverstärker** und hat ein eigenes Schaltsymbol:



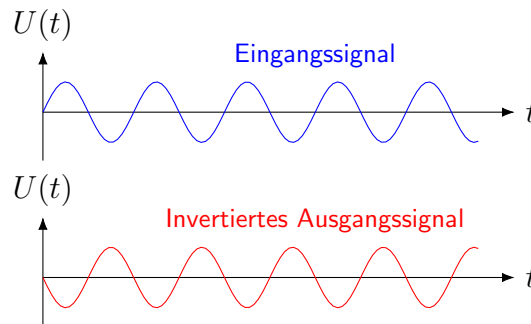
**Bild 8:** Schaltsymbol für Operationsverstärker

Abgekürzt wird der Operationsverstärker meist mit „OP“. Durch den internen Aufbau, der sich von der hier gezeigten Prinzipschaltung noch ein wenig unterscheidet, und weil in integrierten Schaltungen normalerweise mehrere Verstärkerstufen hintereinander geschaltet sind, weisen Operationsverstärker eine sog. **Leerlaufverstärkung** im Bereich von 100 000 (!) auf. In praktischen Schaltungen muss diese hohe Verstärkung natürlich wieder durch eine entspr. Gegenkopplung gebändigt werden. Sie ermöglicht aber eine Vielzahl von Anwendungen.

Über den inneren Aufbau muss man sich aber nur wenig Gedanken machen. Meist reicht es, wenn man die Anschlussbelegung des Chips und die Standardschaltungen für Operationsverstärker

kennt. Wichtig ist aber zu wissen, dass ein OP **zwei** Eingänge hat: einen **invertierenden** (gekennzeichnet durch das „-“) und einen **nicht-invertierenden** (gekennzeichnet durch das „+“) Eingang.

**Invertieren** bedeutet, dass das Signal beim Durchlaufen des Verstärkers an der **horizontalen Achse gespiegelt** wird, wie das in Bild 9 dargestellt ist.



**Bild 9:** Invertiertes und nicht-invertiertes Signal

### Anwendungen des Operationsverstärkers

Ein Operationsverstärker kann nun auf vielfältige Weise eingesetzt werden.

- **Als Komparator** (Vergleicher).  
Der OP vergleicht die Spannungen an den beiden Eingängen und signalisiert durch das Ausgangssignal, welche größer ist. Durch die hohe Leerlaufverstärkung des OPs erfolgt das Umschalten des Ausgangs praktisch schlagartig.
- **Als Differenzverstärker.**  
Da die Schaltung nur die **Unterschiede** zwischen beiden Eingangsleitungen verstärkt, kann sie zur Unterdrückung von Störungen eingesetzt werden. Störungen wirken sich normalerweise auf beide Leitungen gleichermaßen aus und können so unterdrückt werden.  
Bei langen Leitungen, hohen Frequenzen und/oder einer störungsbehafteten Umgebung wird die differentielle Übertragung eingesetzt. Wer sich z. B. mal die Anschlussbeschreibung der USB-Schnittstelle anschaut, wird dort auch die Bezeichnungen „DATA+“ und „DATA-“ finden.
- **Als „normaler“ Verstärker.**  
Natürlich kann der Differenzverstärker auch als normaler Verstärker eingesetzt werden. Hierzu müssen lediglich die Arbeitspunkte der Transistoren so eingestellt werden, dass sie als lineare Verstärker wie in Schaltung 019 arbeiten.  
In Verstärkerschaltungen für den Audio-Bereich findet man OPs sowohl in Form von mit Einzeltransistoren aufgebauten Differenzverstärkern als auch fertige OPs in Form integrierter Schaltungen.

## Weitere Informationen

Die hier gezeigte Prinzipschaltung des Differenzverstärkers stellt nur die allereinfachste Grundschaltung dar. Zu den Themen „Differenzverstärker“ sowie „Operationsverstärker“ findet man auch im Internet jede Menge Informationen [4, 5].

Die Informationen dort sind aber sehr umfangreich. Außerdem weicht die Darstellung dort von der hier gezeigten Variante dahingehend ab, dass sie sog. *Konstantstromquellen*<sup>2</sup> anstatt der Widerstände verwenden. Dies verbessert die Funktion des Differenzverstärkers und ist in der praktischen Anwendung Standard.

## Referenzen

- [1] Deutscher Amateur-Radio-Club e.V.: [www.darc.de](http://www.darc.de)
- [2] Die Webseite des OV I07: [www.amateurfunk-leer.de](http://www.amateurfunk-leer.de)
- [3] Verband der Funkamateure in Telekommunikation und Post e.V. (früher: Vereinigung der Funkamateure der Deutschen Bundespost): [www.vfdb.org](http://www.vfdb.org), [z31.vfdb.org](http://z31.vfdb.org)
- [4] Der Differenzverstärker bei Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Differenzverstärker>
- [5] Der Operationsverstärker bei Wikipedia. <https://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverstärker>

---

© Alle Rechte beim DARC OV I07 bzw. den Autoren. Für Ausbildungs- und Lehrzwecke frei verwendbar. Die gewerbliche oder kommerzielle Nutzung bedarf der schriftlichen Genehmigung. Nicht referenzierte Bilder von DJ1FC, DK7AU oder vom Autor. Dokument erstellt mit  $\LaTeX$  unter Verwendung der Pakete TikZ und CircuiTikZ sowie fritzing und gnuplot.

\*\*\* Elektrischer Strom ist kein Spielzeug. Beachtet unsere Sicherheitshinweise. \*\*\*  
\*\*\* Ihr findet sie, wie diese Schaltung, auf unserer Webseite.\*\*\*

---

<sup>2</sup>Konstantstromquellen sind spezielle Transistorschaltungen, welche – ähnlich wie Zenerdioden, die eine konstante Spannung liefern – innerhalb gewisser Grenzen dafür sorgen, dass ein konstanter Strom fließt.