

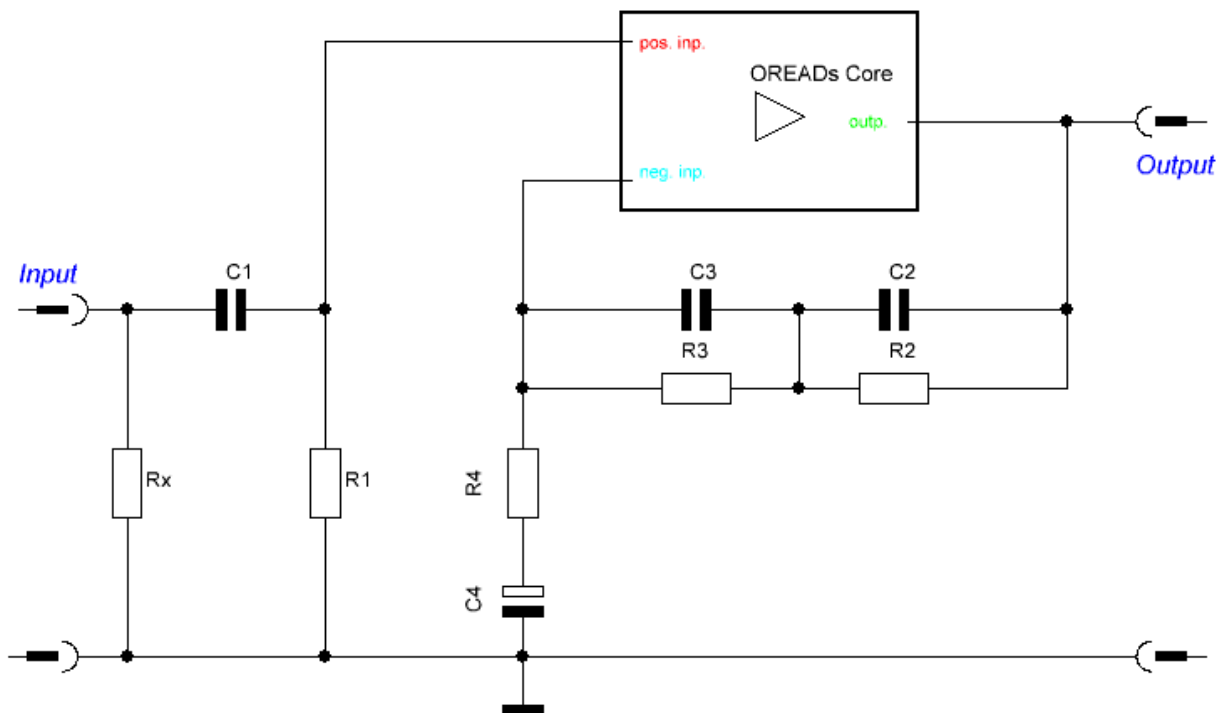
# Mein eigener diskreter Operationsverstärker mit bipolaren Transistoren

## Ein Leitfaden

*My own discrete operational amplifier with bipolar transistors*

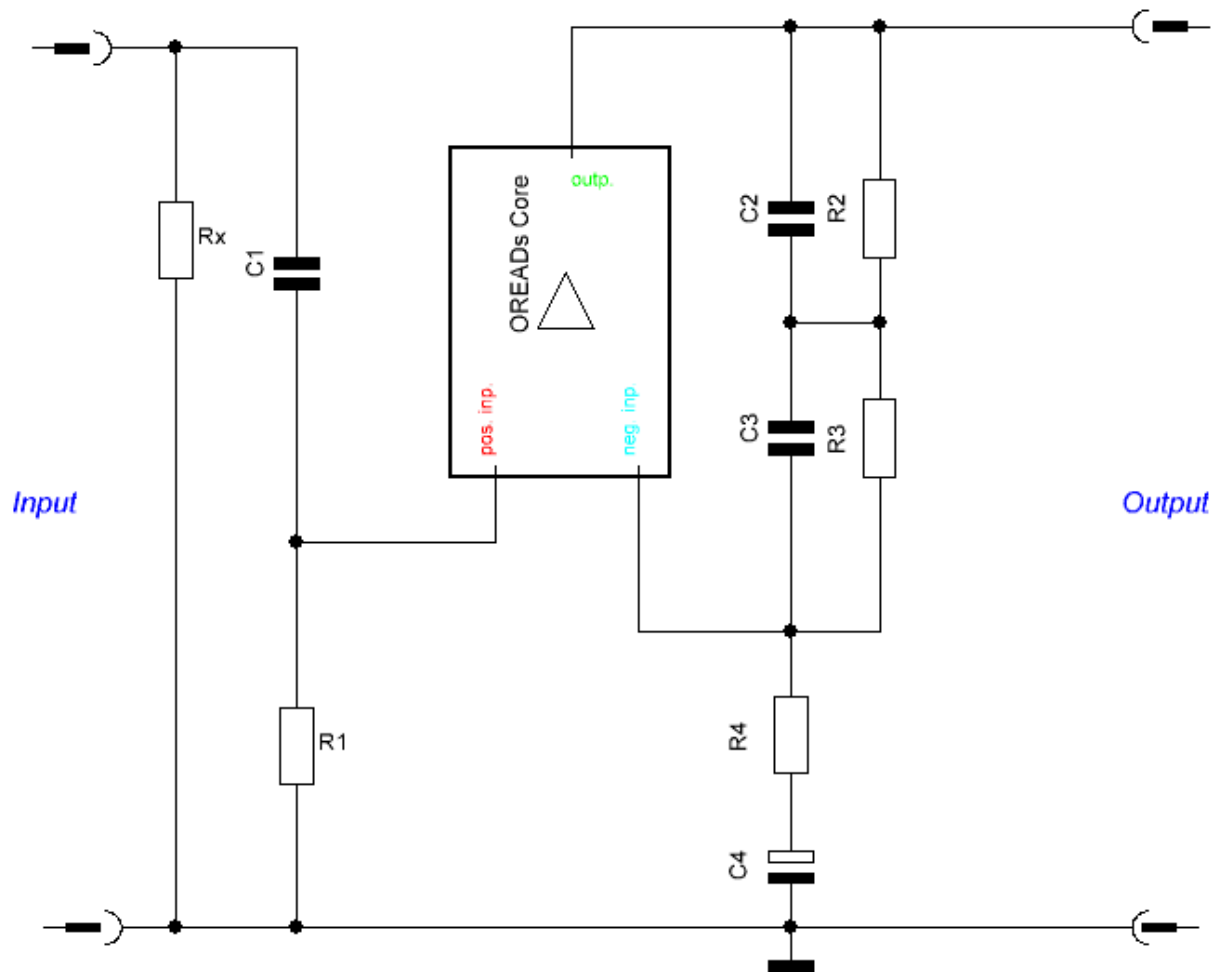
*A guide*

§7



Auf den ersten Blick erkenne ich zwei Eingänge und einen gemeinsamen Ausgang, der „negative Eingang“ wird dabei vom „positiven Ausgang“ des eigentlichen Verstärkers gespeist (der Begriff positiv bezieht sich dabei auf das Geschehen am anderen Eingang, den wir zur Aussteuerung – als MM-Eingang verwenden), man nennt dieses allgemein Rückkopplung.

*At first glance I recognize two inputs and a common output, the "negative input" is fed by the "positive output" of the actual amplifier (the term positive refers to what happens at the other input, which we use for level control - as MM input), this is generally called feedback.*



In diesem Bild ist der Sachverhalt nur etwas anders gezeichnet, vielleicht erkennt man jetzt einen komplexen Spannungsteiler auf der linken Seite und einen weiteren (wesentlich umfangreicheren) zweiten komplexen Spannungsteiler auf der rechten Seite?

*In this picture, the situation is only drawn slightly differently, perhaps you can now recognize a complex voltage divider on the left and another (much more extensive) second complex voltage divider on the right?*

Jetzt könnte man viel erzählen, aber besser nicht an dieser Stelle abschweifen, nur kurz: der Kern (ein idealer Operationsverstärker) sorgt über seinen Ausgang selbsttätig dafür, dass seine Eingangsspannung, nämlich die Differenz  $U_{R1} - U_{|Z4(j\omega)|}$  gegen Null strebt. Wenn wir uns den Blindwiderstand von C4 als Kurzschluss vorstellen, das ist legitim, vereinfacht sich der Ausdruck zu  $U_{R1} \text{ minus } U_{R4} \text{ gleich Null}$ . Diesen automatischen Vorgang nennt man auch „Prinzip der verschwindenden Eingangsgröße“, kurz PVE.

Die Eingangsgröße ist also eine Differenzspannung, doch der eigentliche Vorgang ist nur möglich durch eine Regelschleife, unsere Gegenkopplung.

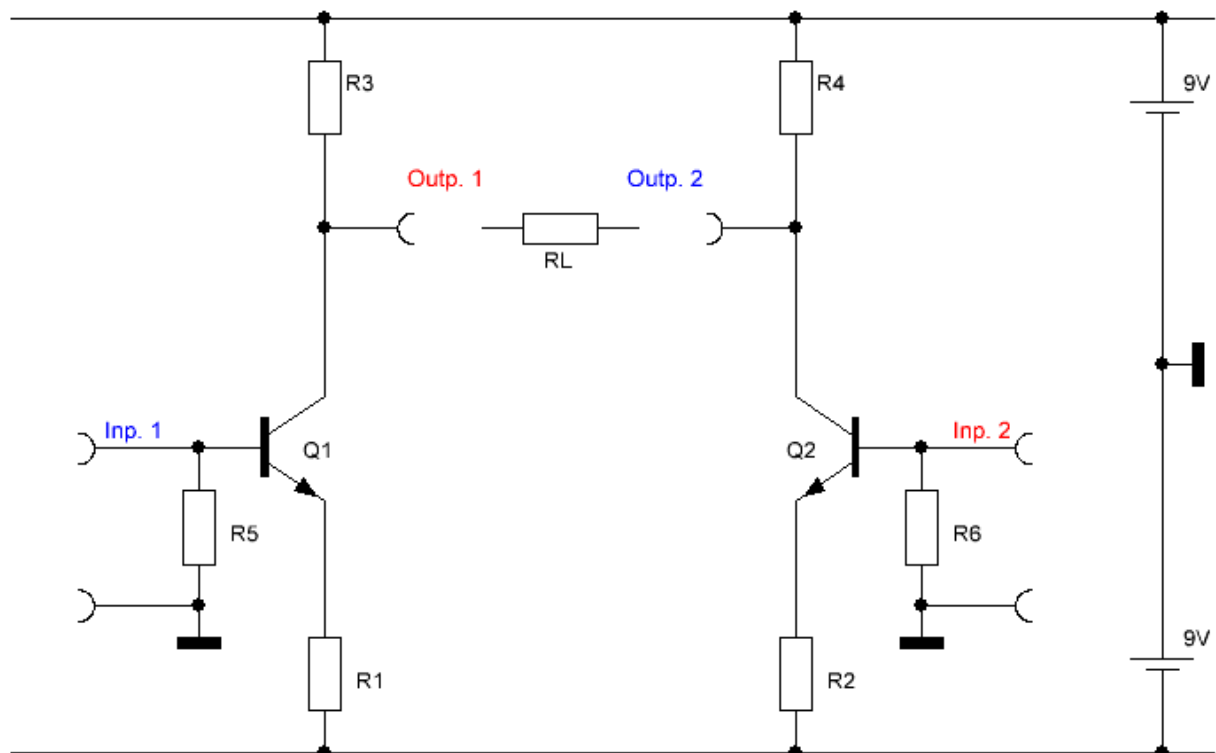
*We could go on and on, but it's better not to digress at this point, just briefly: the core (an ideal operational amplifier) automatically ensures via its output that its input voltage, namely the difference*

*$U_{R1} - U_{R4}/Z_4(j\omega)$  tends towards zero. If we imagine the reactance of  $C_4$  as a short circuit, which is legitimate, the expression is simplified to  $U_{R1}$  minus  $U_{R4}$  equals zero. This automatic process is also known as the "principle of the vanishing input variable", or PVE for short.*

*The input variable is therefore a differential voltage, but the actual process is only possible through a control loop, our negative feedback.*

Wir benötigen einen Verstärker mit zwei Eingängen.

*We need an amplifier with two inputs.*



Ohne langes Zögern wähle ich zwei identische Transistoren und identische Schaltungen, die sogenannte Emitterschaltung. Das Basispotential ist dabei automatisch größer als das Emittential (die Spannung der jeweiligen Elektrode gegenüber dem Bezug, der Spannung Null am Punkt den wir Masse oder Erde nennen), d.h. Q1 & Q2 befinden sich in einem leitfähigen Zustand, es fließen Ströme.

*Without much hesitation, I choose two identical transistors and identical circuits, the so-called emitter circuit. The base potential is automatically greater than the emitter potential (the voltage of the respective electrode in relation to the reference, the zero voltage at the point we call ground or earth), i.e. Q1 & Q2 are in a conductive state, currents are flowing.*

Ab jetzt ist alles ein Kinderspiel:

$R1 = (9V - U_{BE}) / I$  dabei darf ich forsch  $U_{BE}=0,7V$  und  $I=0,5mA$  setzen, wir ermitteln vorläuft wieder nur Anhaltspunkte.

*From now on, everything is child's play:*

*$R1 = (9V - U_{BE}) / I$  I can set  $U_{BE}=0.7V$  and  $I=0.5mA$ , we are again only determining reference points.*

$R1=R2 = 16,6k\Omega$  vorweggenommen habe ich den Umstand, dass UR1 eine sogenannte Potentialdifferenz ist, wie alle Spannungs(ab)fälle, bzw. Spannungen.

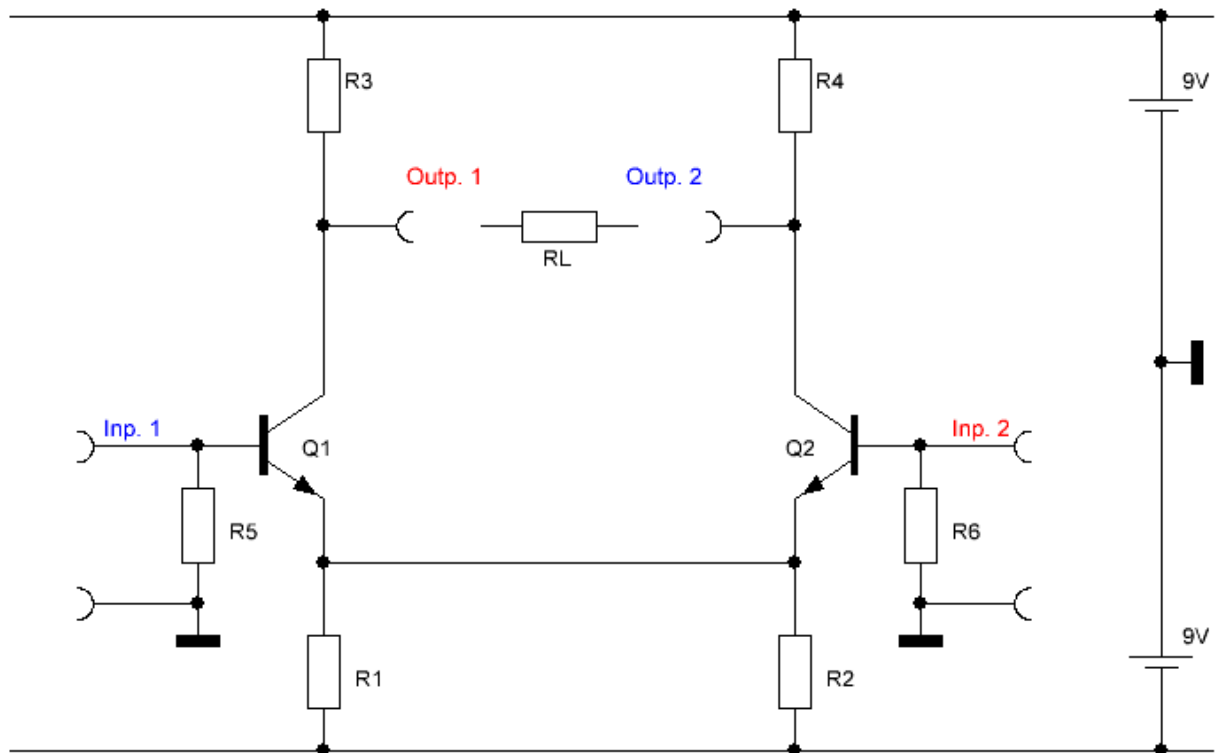
$R3 = (9V - UC) / I$  jetzt wird es heikel, denn eine Festlegung des Kollektorpotentials  $UC$  ist nicht so ohne weiteres sinnvoll, es wird später aber kleiner als  $9V/2$  sein. Wäre der Leitfad an dieser Stelle bereits zu Ende, beträgt  $UR3$  jetzt  $4,5V$  und  $R3$   $9k\Omega$ .

$R3 = R4$ , während wir temporär  $R5=R6$  vielleicht hochohmig als  $1M\Omega$  Widerstände betrachten. Das Resultat dieses ersten intuitiven Schrittes ist eine Brücke, ein Brückenverstärker oder auch symmetrischer Verstärker; ein symmetrischer Eingang und ein symmetrischer Ausgang. Beide Zweige tauschen die Polarität ihres jeweiligen Eingangs, nur verstärken tun sie nicht – dafür wird  $R1$  sowie  $R2$  sorgen.

*$R1=R2 = 16.6k\Omega$  I have anticipated the fact that  $UR1$  is a so-called potential difference, like all voltage (drop) cases or voltages.*

*$R3 = (9V - UC) / I$  Now it gets tricky, because it is not so easy to determine the collector potential  $UC$ , but it will later be less than  $9V/2$ . If the guide had already ended at this point,  $UR3$  would now be  $4.5V$  and  $R3$   $9k\Omega$ .*

*$R3 = R4$ , while we may temporarily consider  $R5=R6$  as high-impedance  $1M\Omega$  resistors. The result of this first intuitive step is a bridge, a bridge amplifier or balanced amplifier; a balanced input and a balanced output. Both branches swap the polarity of their respective inputs, but they do not amplify -  $R1$  and  $R2$  will take care of that.*



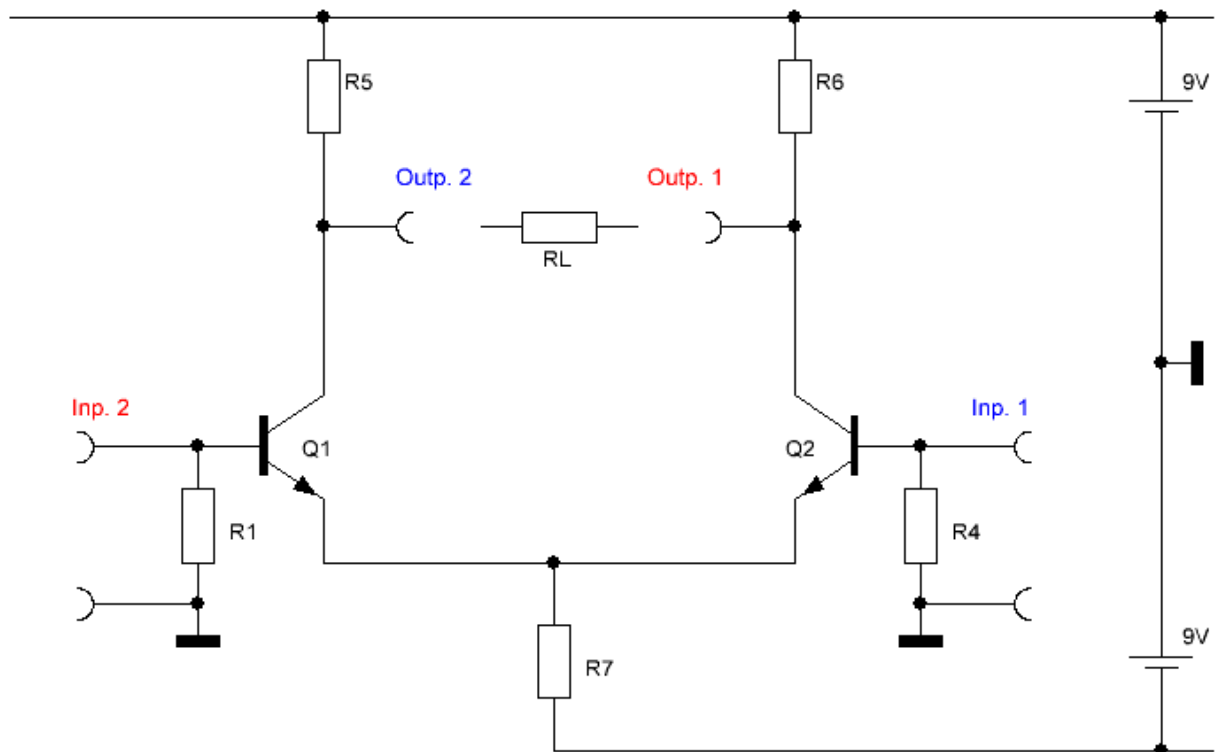
Dafür benötigen wir einen echten Differenzverstärker, dieser wird nun ganz einfach realisiert durch Verbinden der beiden Emittoren – wir lassen sie auf ein gemeinsames Potential arbeiten. Für Q2 ist Q1 nun ein Impedanzwandler, ein Emitterfolger, der ihm an seiner Emittierelektrode etwas mitteilen möchte. Für Q1 ist Q2 eine weiterverarbeitende Stufe, ein Verstärker in Basisschaltung. Und jetzt der Clou: das gilt auch umgekehrt, quasi kreuzweise. Endlich verstärkt das Konstrukt, die Brücke auch, sogar Gleichspannungen.

*For this we need a real differential amplifier, which is now simply realized by connecting the two emitters - we let them work on a common potential. For Q2, Q1 is now an impedance converter, an emitter follower that wants to communicate something to its emitter electrode. For Q1, Q2 is a further processing stage, an amplifier in a so-called base-circuit. And now the highlight: this also applies in reverse, crosswise so to speak. Finally, the construct, the bridge too, even amplifies DC voltages.*

Wir fassen die entstandene Parallelschaltung  $R1||R2$  zusammen.

*We summarize the resulting parallel circuit  $R1||R2$ .*

§10



Und erhalten endlich eine schon brauchbare erste Stufe des gesamten Kerns.

$$\begin{aligned} R7 &= R1 / 2 \\ &= 8.3k\Omega \end{aligned}$$

I hat sich jetzt selbstverständlich verdoppelt und beträgt nun 1mA. Sollte einer der beiden Zweige, sein Transistor sperren, sich nicht mehr im Rennen befinden, dann berechnen wir doch einfach einen neuen Anhaltspunkt für R5 und R6.

$$\begin{aligned} R5 &= 4,5V / 1mA \\ &= 4,5k\Omega \end{aligned}$$

*And finally obtain a usable first stage of the entire core.*

$$\begin{aligned} R7 &= R1 / 2 \\ &= 8.3k\Omega \end{aligned}$$

*I has of course now doubled and is now 1mA. If one of the two branches, its*

*transistor blocking, is no longer in the race, then we simply calculate a new reference point for R5 and R6.*

$$\begin{aligned} R5 &= 4.5V / 1mA \\ &= 4.5k\Omega \end{aligned}$$

R5=R6; führt uns nun zur Auswahl eines Wertes aus den bekannten Stufen der E-Reihen. Zum Beispiel 1M, 8k2 und 4k3.

Nun können wir bereits theoretisch auch den Verstärkungsfaktor dieser Stufe berechnen; dafür müssen wir Q1=Q2 kennen und entsprechend auswählen – an dieser Stelle würde es den Leitfaden allerdings sprengen, tiefer hinabzutauchen.

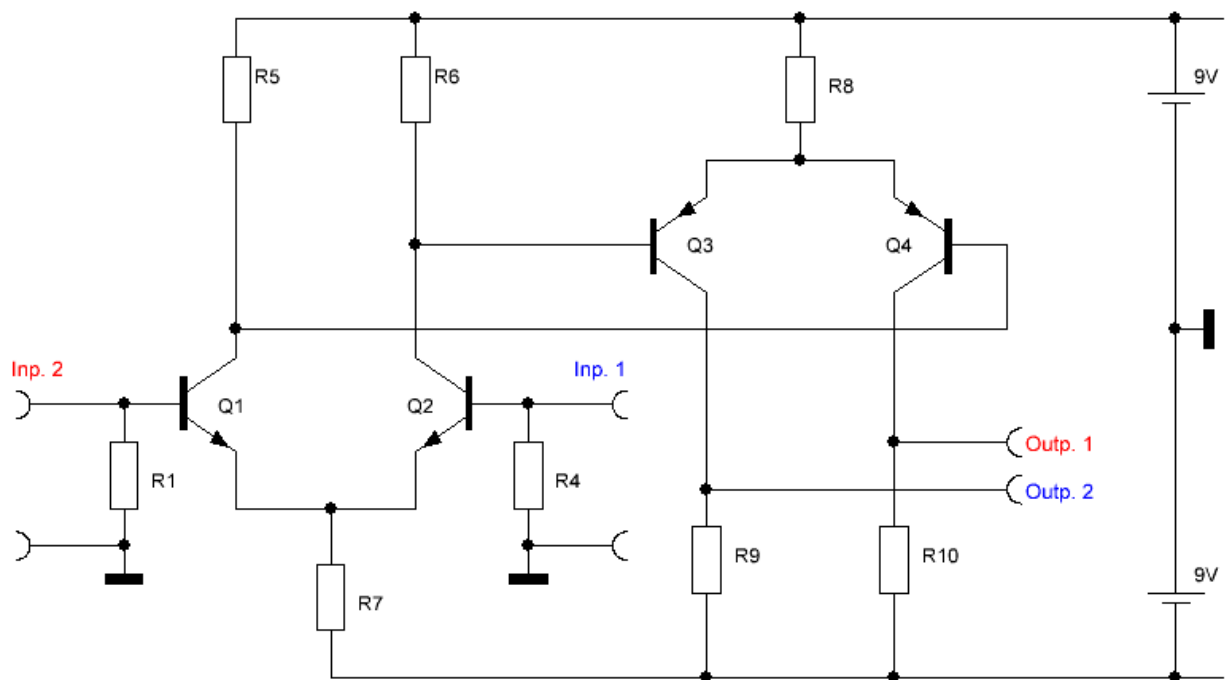
Die komplette Lösung können wir noch nicht erzielt haben, auch wenn bereits eine brauchbare Eingangsstufe an diesem Punkt vorliegt, versprochen!

*R5=R6; now leads us to the selection of a value from the known levels of the E-series. For example 1M, 8k2 and 4k3.*

*Now we can theoretically also calculate the amplification factor of this stage; for this we need to know Q1=Q2 and select it accordingly - at this point, however, it would be beyond the scope of this guide to go any deeper.*

*We can't have achieved the complete solution yet, even if we already have a usable input stage at this point, I promise!*





Der resultierende Verstärkungsfaktor eines einzigen, einfachen Differenzverstärkers reicht für unseren Anwendungsfall leider nicht aus.

Eine zweite Stufe muss folgen und diese führt man sinnvollerweise ebenfalls als Differenzverstärker aus. Das bringt uns schnell und sicher ans gewünschte Ziel.

R8 wird nun in einem Zug berechnet und somit festgelegt, doch alle Zahlenwerte sind nur richtungsweisende Anhaltspunkte, also vorläufig.

*The resulting amplification factor of a single, simple differential amplifier is unfortunately not sufficient for our application.*

*A second stage must follow and this should also be implemented as a differential amplifier. This brings us quickly and safely to the desired goal.*

*R8 is now calculated in one go and thus determined, but all numerical values are only indicative, i.e. provisional.*

$U_{R8} = (4,3V - 0,7V) = 3,6V$  zur Berechnung von R8 fehlt noch der passende Strom, nur in welcher Höhe? Kurzum: verdoppeln,  $2 \cdot I_{\text{summe}}$  der ersten Stufe, führt zu 2mA.

$$R8 = 1,8k\Omega$$

Diesen Wert finden wir sogar unvermittelt in den E-Reihen. Korrekt ausbalanciert

fließen nun zwei gleich große Ströme mit dem Wert 1mA im linken Zweig R9 und im rechten Zweig R10.

*UR8 = (4.3V - 0.7V) = 3.6V to calculate R8, the appropriate current is still missing, but at what level? In short: doubling,  $2 * I_{\text{sum}}$  of the first stage, leads to 2mA.*

*R8 = 1.8kΩ*

*We even find this value directly in the E-series. Correctly balanced, two equal currents with the value 1mA now flow in the left branch R9 and in the right branch R10.*

R9 und R10 könnten jetzt nach dem bekannten Muster (Ohmsches-Gesetz sowie Kirchhoff 1 & 2, ...) berechnet werden, zum Beispiel:  $(9V - 6V) / 1mA = 3kΩ$ , doch die Eindeutigkeit, „das Warum“ fehlt völlig. Man hätte auch ganz andere Ströme und Potentiale festlegen dürfen. Aber, der nun dimensionierte zweistufige Differenzverstärker funktioniert bereits bestens. Er ist allerdings noch nicht vollständig, sein Ausgang ist symmetrisch.

*R9 and R10 could now be calculated according to the now familiar pattern (Ohm's law and Kirchhoff 1 & 2, ...), for example:  $(9V - 6V) / 1mA = 3kΩ$ , but the uniqueness, "the why" is completely missing. Completely different currents and potentials could have been specified. However, the now dimensioned two-stage differential amplifier already works perfectly. However, it is not yet complete, its output is symmetrical.*

Im nachfolgenden Teil des Leitfadens verknüpfen wir geschickt die Ausgänge und formen einen gemeinsamen, aber unsymmetrischen Ausgang.

Alle eventuell vorhandenen Kenntnisse über Stromspiegel, Stromquellen, Senken müssen wir auf dieser Reise über Bord werfen – als Novizen.

*In the following part of the guide, we cleverly link the outputs and form a common but asymmetrical output.*

*Any knowledge we may have about electronics, current sources and sinks must be thrown overboard on this journey - as novices.*