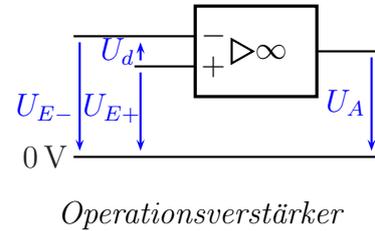


# Schmitt-Trigger

## 1. Ergänzungen zum idealen Operationsverstärker

Um den Schmitt-Trigger zu verstehen, kann man nicht mehr ausschließlich mit den drei Bedingungen des idealen Operationsverstärkers arbeiten. Ein realer Operationsverstärker hat eine Begrenzung der Ausgangsspannung nach oben und nach unten, die annähernd seiner Betriebsspannung entspricht. Diese Begrenzung nach oben durch  $U_{Amax}$  und nach unten durch  $U_{Amin}$  nehmen wir als Ergänzung zu den drei Bedingungen des idealen Operationsverstärkers hinzu.



Je nachdem, ob  $U_d$  positiv oder negativ ist, ist damit die Ausgangsspannung entweder  $U_{Amax}$  oder  $U_{Amin}$ .

$$U_d > 0 \Rightarrow U_A = U_{Amax}$$

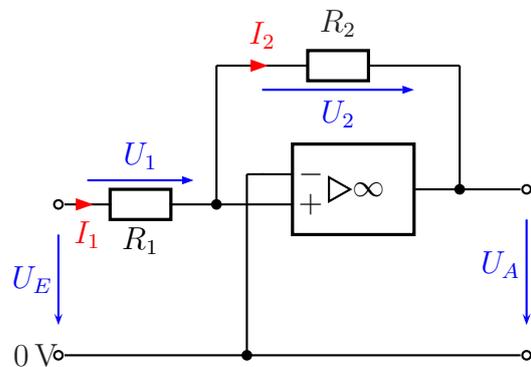
$$U_d < 0 \Rightarrow U_A = U_{Amin}$$

Der Fall  $U_d = 0$  tritt praktisch nicht auf, solange keine Gegenkopplung vorhanden ist. In diesem Falle wäre die Ausgangsspannung unbestimmt.

## 2. Der nicht invertierende Schmitt-Trigger

Nebenstehend ist die Schaltung eines nicht invertierenden Schmitt-Triggers dargestellt. Überlegen Sie: Kann man hier mit dem **virtuellen Kurzschluss** rechnen?

Nein, das geht nicht, denn die Ausgangsspannung wird auf den **positiven** Eingang zurückgeführt. Wir haben also keine **Gegenkopplung**, sondern eine **Rückkopplung**. Wie kann also das Verhalten der Schaltung berechnet werden?



Um das Verhalten berechnen zu können, müssen wir zunächst bestimmte Annahmen machen. Nehmen wir einmal an, wir legen eine Eingangsspannung von  $U_E = 0\text{ V}$  an, schließen den Eingang also kurz. Dann ist ungewiss, welcher Wert der Ausgangsspannung  $U_A$  sich ergibt. Warum?

Zweierlei ist möglich:

1.  $U_A = U_{Amax}$  – In diesem Fall würde die positive Ausgangsspannung über den Spannungsteiler  $R_2/R_1$  auf eine zwar kleinere, aber immer noch positive Spannung am Plus-Eingang des OP heruntergeteilt. Diese Eingangsspannung würde die Ausgangsspannung  $U_A = U_{Amax}$  bestätigen, der Zustand wäre also stabil.
2.  $U_A = U_{Amin}$  – Auch in diesem Fall wirkt der Spannungsteiler  $R_2/R_1$  und bringt eine negative Spannung an den Plus-Eingang des OP. Auch hierdurch ergibt sich ein stabiler Zustand des OP.

Da man nicht sagen kann, in welchem Zustand sich der OP befindet, nehmen wir zunächst einmal an, es sei  $U_E = 0\text{ V}$  und  $U_A = U_{Amax}$ . Wie eben beschrieben, bleibt der OP in diesem Zustand, da der Spannungsteiler  $R_2/R_1$  eine positive Spannung auf den Plus-Eingang des OP überträgt. Verändert man nun die Eingangsspannung  $U_E$  in Richtung steigender **negativer** Werte, dann bewegt sich das Potential am Plus-Eingang des OP in Richtung 0 Volt. Genau dann, wenn die Spannung dort die Grenze von 0 Volt unterschreitet, die Spannung also negativ wird, kippt der OP in den anderen stabilen Zustand mit  $U_A = U_{Amin}$  um, denn eine negative Spannung am Eingang verursacht auch eine negative Spannung am Ausgang.

Verändert man nun wieder die Eingangsspannung  $U_E$  in Richtung positiver Werte, dann kippt der OP nicht sofort in den anderen Zustand zurück, denn über den Spannungsteiler  $R_2/R_1$  wird ja eine erheblich stärker negative Spannung an den OP-Eingang übertragen, als zuvor. Um den OP zum Zurückkippen zu bewegen, muss also  $U_E$  nicht nur wieder positiv werden, sondern sogar einen bestimmten deutlich positiven Wert wieder nach oben überschreiten.

Wir erhalten also **zwei charakteristische** Spannungswerte, bei denen der OP schaltet, nämlich  $U_{Eein}$  und  $U_{Eaus}$ . Beim **Überschreiten** von  $U_{Eein}$  nach oben wird  $U_A = U_{Amax}$  und beim **Unterschreiten** von  $U_{Eaus}$  nach unten wird  $U_A = U_{Amin}$ .

Diese Schaltspannungen können wir berechnen, da dabei jeweils die Spannung am positiven Eingang des OP gerade 0 Volt beträgt, ähnlich, wie beim virtuellen Kurzschluss. Berechnen wir also  $U_E$  für beide Fälle.

1. **Ausschaltspannung  $U_{Eaus}$ :** Ausgeschaltet werden kann nur, wenn zuvor  $U_A = U_{Amax}$  war. An  $R_2$  liegt dann (von rechts nach links positiv gemessen) die Spannung  $U_A = U_{Amax}$  an, also:  $U_{R2} = U_A = U_{Amax}$ . Messen wir die Spannung an  $R_1$  auch von rechts nach links positiv, dann ist das genau  $U_E$  mit anderem Vorzeichen, also:  $U_{R1} = -U_E$ . Nach der Kirchhofschen Regel ist am Spannungsteiler das Verhältnis der Widerstände gleich dem Verhältnis der zugehörigen Teilspannungen, also:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{-U_{Eaus}}{U_{Amax}} \cdot U_{Amax}$$

$$-U_{Eaus} = \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amax} \cdot (-1)$$

$$U_{Eaus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amax}$$

2. **Einschaltspannung  $U_{Ein}$** : Eingeschaltet werden kann nur, wenn zuvor  $U_A = U_{Amin}$  war. Ähnlich zum vorangehenden Punkt erhalten wir dann:

$$U_{Ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amin}$$

Die Differenz zwischen Einschalt- und Ausschaltspannung nennt man **Hysteresespannung  $U_H$** .

$$\text{Definition: } U_H = U_{Ein} - U_{Eaus}$$

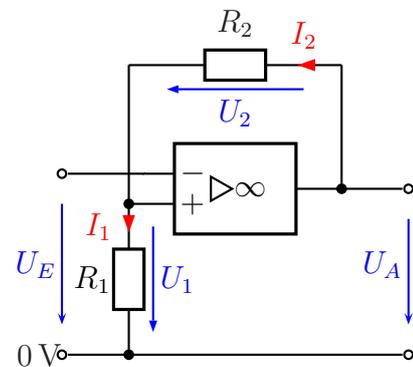
Setzen wir die zuvor berechneten Ergebnisse in diese Definition ein, erhalten wir:

$$U_H = U_{Ein} - U_{Eaus} = \left(-\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amin}\right) - \left(-\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amax}\right) = \frac{R_1}{R_2} \cdot (U_{Amax} - U_{Amin})$$

### 3. Der invertierende Schmitt-Trigger

Wie der nicht invertierende Schmitt-Trigger schaltungstechnisch dem invertierenden Verstärker ähnelt, hat der invertierende Schmitt-Trigger Ähnlichkeiten mit dem nicht invertierenden Verstärker. Beispielsweise ist der Schaltungseingang direkt mit einem Eingang des OP verbunden. Das hat natürlich Folgen für die Funktionsweise der Schaltung.

Natürlich kann auch hier nicht mit dem virtuellen Kurzschluss gerechnet werden, da wir ebenfalls eine Mitkopplung (anstelle einer Gegenkopplung) haben. Auch ist in dieser Schaltung der Zustand beim Einschalten der Versorgungsspannung ungewiss, wenn  $U_E = 0\text{ V}$  ist. Es ist also ebenfalls erforderlich, dass man zur Berechnung von beiden möglichen Anfangszuständen als Annahme ausgeht und dann prüft, was sich beim Verändern der Eingangsspannung  $U_E$  ergibt.



*Invertierender Schmitt-Trigger*

Beginnen wir zunächst mit der Annahme, dass bei  $U_E = 0\text{ V}$  die Ausgangsspannung auf dem Maximalwert steht, also  $U_A = U_{Amax}$ . Beantworten Sie nacheinander folgende Fragen:

1. Wie groß ist die Spannung  $U_1$  am Widerstand  $R_1$ ? (Formel)
2. In welchem Bereich darf sich  $U_E$  verändern, ohne dass sich die Ausgangsspannung  $U_A$  verändert? Wie groß ist demnach  $U_{Eaus}$ ?
3. Wie groß ist die Einschaltspannung  $U_{Ein}$ , wenn  $U_A = U_{Amin}$  ist?
4. Wie groß ist die Hysteresespannung  $U_H$ ?

Gehen wir die Ergebnisse einmal der Reihe nach durch.

1. Wie groß ist die Spannung  $U_{R1}$  am Widerstand  $R_1$ ?  
 $R_2$  und  $R_1$  bilden einen Spannungsteiler, der die Ausgangsspannung auf einen kleineren Wert am positiven Eingang des OP herunterteilt. Nach Kirchhoff gilt:

$$\frac{U_{R1}}{U_A} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_A$$

$$U_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_A$$

2. In welchem Bereich darf sich  $U_E$  verändern, ohne dass sich die Ausgangsspannung  $U_A$  verändert?

So lange  $U_E$  **kleiner** als die eben berechnete Spannung  $U_{R1}$  bleibt, ist die Differenzeingangsspannung  $U_d$  des OP **positiv**, die Spannung  $U_A$  bleibt also auf dem Maximalwert. Die Grenze zum Umschalten liegt demnach bei der eben berechneten Spannung an  $R_1$ :

$$U_{Eaus} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{Amax}$$

3. Wie groß ist die Einschaltspannung  $U_{Eein}$ , wenn  $U_A = U_{Amin}$  ist?  
Entsprechend zur Ausschaltspannung ergibt sich:

$$U_{Eein} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{Amin}$$

4. Wie groß ist die Hysteresespannung  $U_H$ ?

Die Hysteresespannung  $U_H$  ist wieder die Differenz zwischen  $U_{Eein}$  und  $U_{Eaus}$ , wobei man berücksichtigen muss, dass  $U_{Eaus}$  größer als  $U_{Eein}$  ist, also:

$$U_H = U_{Eaus} - U_{Eein} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{Amax} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{Amin} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (U_{Amax} - U_{Amin})$$

## 4. Vergleich der Schaltungen

Wenn wir die Schaltungen miteinander vergleichen, dann sind Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede festzustellen. Hier geht es um die Unterschiede.

- Zunächst fällt der unterschiedliche Name auf. Einmal wird die Eingangsspannung invertiert, und einmal eben nicht.
- Die Formeln zur Berechnung von  $U_{Eein}$  und  $U_{Eaus}$  sind unterschiedlich. Bei gleichen Widerständen sind die Schaltspannungen betragsmäßig beim invertierenden Schmitt-Trigger etwas kleiner, als beim nicht invertierenden Schmitt-Trigger.
- Die Eingangswiderstände der Schaltungen sind unterschiedlich. Versuchen Sie doch einmal, diese zu bestimmen! Sie könne sich dabei am invertierenden und nicht invertierenden Verstärker orientieren.