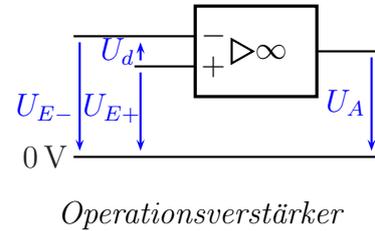


Schmitt-Trigger

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} .

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

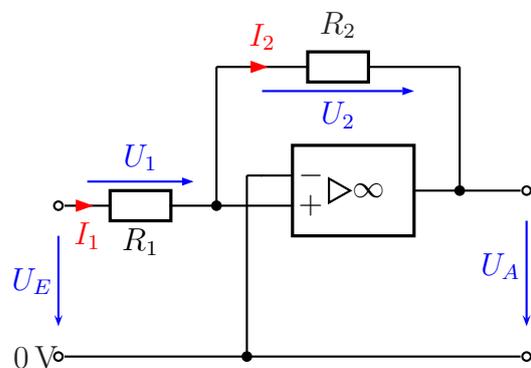
$$U_d < 0 \Rightarrow U_A = U_{Amin}$$

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?



Nicht invertierender Schmitt-Trigger

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:

$$\begin{aligned} \frac{R_1}{R_2} &= \frac{U_{R1}}{U_{R2}} \\ \frac{R_1}{R_2} &= \frac{U_{Eaus}}{-U_{Amax}} \quad | \cdot (-U_{Amax}) \\ U_{Eaus} &= -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Amax} \end{aligned}$$

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

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

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

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

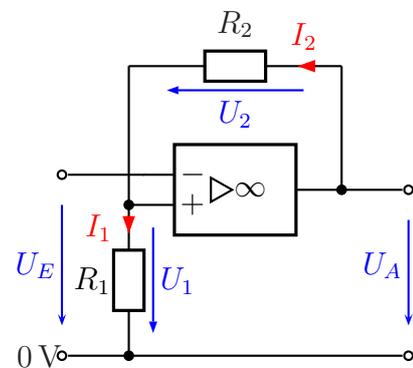
Setzen wir die zuvor berechneten Ergebnisse in diese Definition ein, erhalten wir:

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

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:

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

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

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.