

Schmitt-Trigger

Schmitt-Trigger sind Komparatorschaltungen mit Mitkopplung. Sie werden hauptsächlich zur Impulsformung und Rechteckwandler eingesetzt.

Im Gegensatz zur konventionellen Komparatorschaltung wird die Referenzspannung nicht fest vorgegeben, sondern mit einem Spannungsteiler aus der Ausgangsspannung gewonnen. Dadurch entsteht eine Mitkopplung. Sie bewirkt zwei Umschaltunkte u_{T+} , u_{T-} . Die Differenz zwischen den Umschaltpunkten nennt man Hysterese u_H .

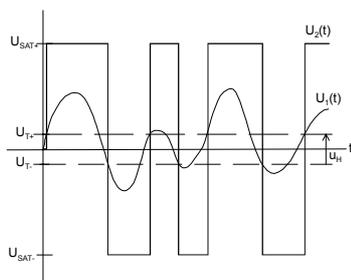


Bild 1 :
Spannungsverläufe am Beispiel des nicht invertierenden Schmitt-Triggers. Der Bereich u_{T+} - u_{T-} nennt man Hysterese.
 $u_1(t)$: Eingangssignal
 $u_2(t)$: Ausgangssignal

Durch die Hysterese kann ein Schmitt-Trigger auch bei langsamen Umschaltvorgängen nicht schwingen und hat eine von der Eingangsspannung unabhängige Umschaltzeit.

Invertierender Schmitt-Trigger

Die Grundsaltung für den invertierenden Schmitt Trigger ist in Bild 2 gezeigt. Die Quelle u_V bewirkt eine seitliche Verschiebung der Hysteresekurve. Setzt man $u_V=0V$ und $-u_{SAT-}=u_{SAT+}$, erhalten wir den vereinfachten Fall des nullpunktsymmetrischen Schmitt-Triggers.

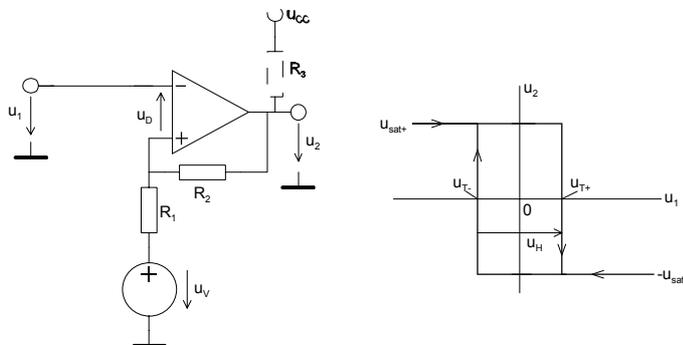


Bild 2:
Grundsaltung und Hysteresecharakteristik des invertierenden Schmitt-Triggers.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$u_H = u_{T+} - u_{T-} = \frac{R_1 (u_{SAT+} - u_{SAT-})}{R_1 + R_2} = \frac{2R_1 u_{SAT}}{R_1 + R_2} \quad (u_{SAT} = -u_{SAT-} = u_{SAT+}) \quad (1)$$

$$u_{T\pm} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT\pm} \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (u_{T+} > u_{T-}) \quad (2)$$

$$u_V = \frac{u_{T-} \cdot u_{SAT+} - u_{T+} \cdot u_{SAT-}}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{u_{SAT} (u_{T+} + u_{T-})}{2u_{SAT} - u_{T+} + u_{T-}} \quad (3)$$

$$R_1 = \frac{(u_{T+} - u_{T-}) R_2}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{R_2 (u_{T+} - u_{T-})}{2u_{SAT} - u_{T+} + u_{T-}} \quad (4)$$

Die Dimensionierung erfolgt im Regelfall durch Vorgabe der Schaltpunkte u_{T+} , u_{T-} und der Wahl eines Widerstandes, z.B. R_2 .

Wird der Schmitt-Trigger mit Komparatorbausteinen realisiert, ist $R_3 \ll (R_1 + R_2)$ für den Open-Collector Ausgang vorzusehen. In diesem Fall kann ohne grossen Fehler $u_{SAT} = u_{CC}$ gesetzt werden. Bei der Verwendung eines Operationsverstärkers ist jedoch u_{SAT} betragsmässig in der Grössenordnung von 1V kleiner als u_{CC} .

U_V kann über einen Spannungsteiler nach Bild 3 realisiert werden. R_1 in Bild 3 geht dabei in den Spannungsteiler R_3/R_4 über. Je nach benötigter Polarität von u_V wird u_{CC} entweder positiv oder negativ verwendet.

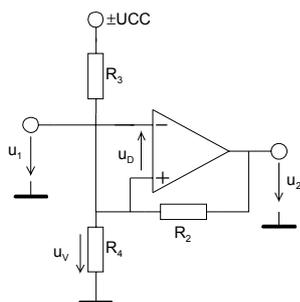


Bild 3:
Invertierender Schmitt-Trigger mit Erzeugung der
Offsetspannung u_V über einen Spannungsteiler R_3/R_4 .

Die Offsetspannung u_V wird hierzu mit einer Thevenin-Ersatzquelle u_V mit Innenwiderstand R_1 aus der Versorgungsspannung u_{CC} modelliert:

$$R_1 = R_3 \parallel R_4 \tag{5}$$

$$u_V = \pm u_{CC} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Die Dimensionierungsgleichungen für R_4, R_3 werden unter Vorgabe von R_1 und u_V :

$$R_3 = \frac{\pm u_{CC} \cdot R_1}{u_V} \tag{6}$$

$$R_4 = \frac{\pm u_{CC} \cdot R_1}{\pm u_{CC} - u_V} \tag{7}$$

Analyse des invertierenden Schmitt-Triggers

Die Analyse erfolgt durch Auswerten der Maschengleichungen in

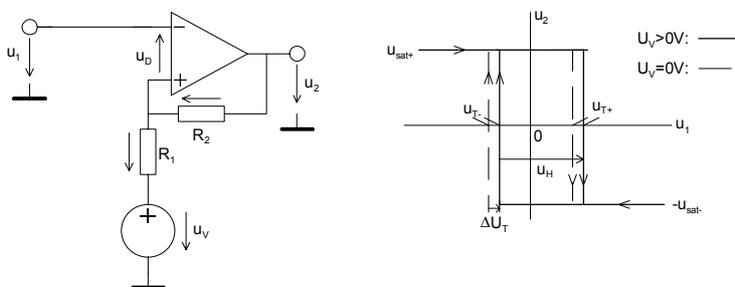
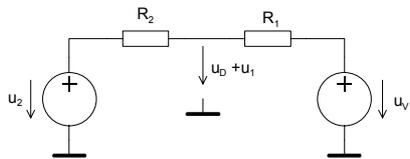


Bild 4:
Schaltbild und Hysteresekurve zur Analyse des
invertierenden Schmitt-Triggers.

Die beiden Spannungen u_p, u_2 sind nach Kirchhoff aus Bild 4:

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{R1} + u_V + u_D \\ u_2 &= u_{R2} + u_V + u_D \end{aligned} \tag{8}$$

Zur weiteren Betrachtung bestimmen wir die Spannung u_1+u_D mittels Superposition:



$$u_1 + u_D = u_V \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

Die beiden Schaltpunkte u_{T+} , u_{T-} werden erreicht, wenn $u_D=0V$ wird. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Fall $u_2=u_{SAT-}$:

Der Umschaltpunkt $u_1=u_{T-}$ wird:

$$u_{T-} = u_V \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = u_V \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_{SAT-} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT-} R_1}{R_1 + R_2} \quad (10)$$

2. Fall $u_2=u_{SAT+}$:

Der Umschaltpunkt $u_1=u_{T+}$ wird analog dem 1. Fall:

$$u_{T+} = u_V \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_{SAT+} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT+} R_1}{R_1 + R_2} \quad (11)$$

Für die Umschaltunkte beim invertierenden Schmitt-Trigger gilt allgemein:

$$u_{T\pm} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT\pm} R_1}{R_1 + R_2} \quad (12)$$

Normalerweise ist die Ausgangsspannung symmetrisch. Dann vereinfacht sich (12) wegen

$$-u_{SAT-} = u_{SAT+} = u_{SAT} :$$

$$u_{T\pm} = \frac{u_V R_2 \pm u_{SAT} R_1}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

Die Hysterese u_H wird mit der Definition der Hysterese $u_H = u_{T+} - u_{T-}$:

$$u_H = u_{T+} - u_{T-} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT+} R_1}{R_1 + R_2} - \frac{u_V R_2 + u_{SAT-} R_1}{R_1 + R_2}$$

$$u_H = \frac{R_1 (u_{SAT+} - u_{SAT-})}{R_1 + R_2} = \frac{2u_{SAT} R_1}{R_1 + R_2} \quad (14)$$

Man erkennt in (14), dass die Hysterese nur durch R_1 und R_2 bestimmt wird. Die Dimensionierungsgleichung für R_1 kann direkt aus (14) abgeleitet werden. U_V wird durch Einführen der Hilfsspannung Δu_T bestimmt. Δu_T ist der seitliche Versatz der Hysteresekurve bezüglich der Mitte des möglichen Aussteuerbereiches:

$$\Delta u_T = u_{T+} \Big|_{u_V \neq 0} - u_{T+} \Big|_{u_V = 0} - \frac{u_{SAT+} + u_{SAT-}}{2} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT+} R_1}{R_1 + R_2} - \frac{u_{SAT+} R_1}{R_1 + R_2} - \frac{u_{SAT-} + u_{SAT-}}{2} =$$

$$= \frac{2u_V R_2 - (R_1 + R_2)(u_{SAT+} + u_{SAT-})}{2(R_1 + R_2)} \stackrel{u_{SAT+} = u_{SAT-}}{=} \frac{u_V R_2}{R_1 + R_2} \quad (15)$$

Andererseits ist der Versatz Δu_T auch wie Graph in Bild 4 ersichtlich:

$$\Delta u_T = u_{T+} - \frac{u_{T+} - u_{T-}}{2} - \frac{u_{SAT+} + u_{SAT-}}{2} = \frac{1}{2}(u_{T+} + u_{T-} - u_{SAT+} - u_{SAT-}) \stackrel{u_{SAT+} = u_{SAT-}}{=} \frac{1}{2}(u_{T+} + u_{T-}) \quad (16)$$

Mit dem Ansatz über (14), (15) und (16) werden die Gleichungen formuliert und nach R_1 und u_V aufgelöst:

$$u_H = u_{T+} - u_{T-} = \frac{(u_{SAT+} - u_{SAT-}) R_1}{R_1 + R_2} \rightarrow R_1 = \frac{(u_{T+} - u_{T-}) R_2}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{-u_H R_2}{u_{T+} - u_{T-} - u_{SAT+} + u_{SAT-}}$$

$$= \frac{R_2 (u_{T+} + u_{T-})}{2u_{SAT} - u_{T+} + u_{T-}} \quad (17)$$

$$u_V - \frac{u_{SAT+} + u_{SAT-}}{2} = \frac{\Delta u_T (R_2)}{R_2} \rightarrow u_V = \frac{u_{T-} \cdot u_{SAT+} - u_{T+} \cdot u_{SAT-}}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{u_{SAT} (u_{T+} + u_{T-})}{2u_{SAT} - u_{T+} + u_{T-}} \quad (18)$$

Diese Gleichungen erlauben eine präzise Dimensionierung. Wesentlich ist aber die genaue Kenntnis von u_{SAT} . Sie wird aus dem Datenblatt oder aus der Simulation mit dem entsprechenden OpAmp oder Komparator bestimmt.

Beispiel 1: (Invertierender Schmitt-Trigger)

Ein invertierender Schmitt-Trigger mit einem OpAmp LF411 soll für folgende Vorgaben dimensioniert werden:

$$u_{T+} = 4V \quad u_{T-} = -1V \quad u_{CC} = \pm 12V$$

$$u_{SAT} = 11.3V$$

Lösung:

Wir wählen den Widerstand $R_2 = 10k\Omega$. Mit den Gleichungen (17), (18) wird die Offsetspannung u_V und der Widerstand R_1 :

$$u_V = \frac{u_{SAT} (u_{T+} + u_{T-})}{2u_{SAT} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{11.3(4-1)}{2 \cdot 11.3 - 4 - 1} = 1.92614V$$

$$R_1 = \frac{R_2 (u_{T+} - u_{T-})}{2u_{SAT} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{10K(4+1)}{2 \cdot 11.3 - 4 - 1} = 2.84091k\Omega$$

Der Spannungsteiler zur Erzeugung der Offsetspannung u_V wird mit (6) und (7):

$$R_3 = \frac{\pm u_{CC} \cdot R_1}{u_V} \stackrel{u_V = \text{positiv}}{=} \frac{+u_{CC} \cdot R_1}{u_V} = \frac{12 \cdot 2.84091K}{1.92614} = 17.69912k\Omega$$

$$R_4 = \frac{\pm u_{CC} \cdot R_1}{\pm u_{CC} - u_V} \stackrel{u_V = \text{positiv}}{=} \frac{+u_{CC} \cdot R_1}{+u_{CC} - u_V} = \frac{12 \cdot 2.84091K}{12 - 1.92614} = 3.384095k\Omega$$

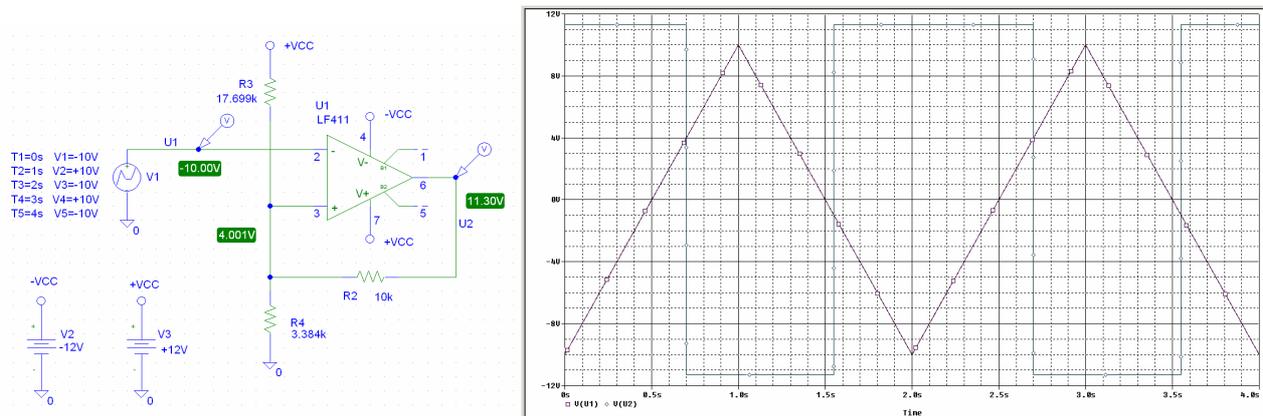


Bild 5:
Schema und Übertragungsverhalten des invertierenden Schmitt-Triggers nach Beispiel 1.

Beispiel 2: (Invertierender Schmitt-Trigger mit ungleichen $U_{SAT\pm}$)

Ein invertierender Schmitt-Trigger mit einem OpAmp soll für folgende Vorgaben dimensioniert werden:

$$u_{T+} = 5V \quad u_{T-} = 1V \quad u_{SAT-} = -7V \quad u_{SAT+} = 12V$$

Lösung:

Wir wählen den Widerstand $R_2=10k\Omega$. Mit den Gleichungen (17), (18) wird die Offsetspannung u_V und der Widerstand R_1 :

$$R_1 = \frac{(u_{T+} - u_{T-})R_2}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{(5V - 1V) \cdot 10K}{12V - (-7V) - 5V + 1V} = 2.667k\Omega$$

$$u_V = \frac{u_{T-} \cdot u_{SAT+} - u_{T+} \cdot u_{SAT-}}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{T+} + u_{T-}} = \frac{1V \cdot 12V - 5V \cdot (-7V)}{5V - 1V - 12V + (-7V)} = 3.133V$$

Die Kontrolle der Schaltpunkte ergibt:

$$u_{T+} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT+} R_1}{R_1 + R_2} = \frac{3.133V \cdot 10K + (12V) \cdot 2.667K}{2.667K + 10K} = 5V$$

$$u_{T-} = \frac{u_V R_2 + u_{SAT-} R_1}{R_1 + R_2} = \frac{3.133V \cdot 10K + (-7) \cdot 2.667K}{2.667K + 10K} = 1V$$

Beispiel 3: (Invertierender Schmitt-Trigger für Single-Supply Betrieb)

Ein invertierender Schmitt-Trigger mit einem Komparator LM393 soll zum Betrieb an einer Speisespannung für folgende Vorgaben dimensioniert werden:

$$u_{T+} = 9V \quad u_{T-} = 2V \quad u_{CC} = 12V$$

$$u_{SAT-} = 0.1242V \quad u_{SAT+} = 11.975V$$

Lösung:

Wir wählen den Widerstand $R_2=100k\Omega$. Mit den Gleichungen (17), (18) wird die Offsetspannung u_v und der Widerstand R_1 berechnet. Die Spannung u_v wird aus der Versorgungsspannung u_{CC} mit einem Spannungsteiler R_3/R_4 gemäss (6), (7) erzeugt. Der Pull-Up Widerstand R_5 am Ausgang wird mit $1k\Omega$ gewählt:

Vorgaben:

$$u_{CC} := 12V \quad u_{SAT+} := 11.975V \quad u_{SAT-} := 124.2mV$$

$$R_2 := 100k\Omega \quad u_{TP} := 9V \quad u_{TN} := 2V$$

Berechnungen:

$$R_1 := \frac{(u_{TP} - u_{TN}) \cdot R_2}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{TP} + u_{TN}} \quad R_1 = 1.443 \times 10^5 \Omega$$

$$u_v := \frac{u_{TN} \cdot u_{SAT+} - u_{TP} \cdot u_{SAT-}}{u_{SAT+} - u_{SAT-} - u_{TP} + u_{TN}} \quad u_v = 4.707V$$

$$R_3 := \frac{u_{CC} \cdot R_1}{u_v} \quad R_3 = 3.679 \times 10^5 \Omega$$

$$R_4 := \frac{u_{CC} \cdot R_1}{u_{CC} - u_v} \quad R_4 = 2.374 \times 10^5 \Omega$$

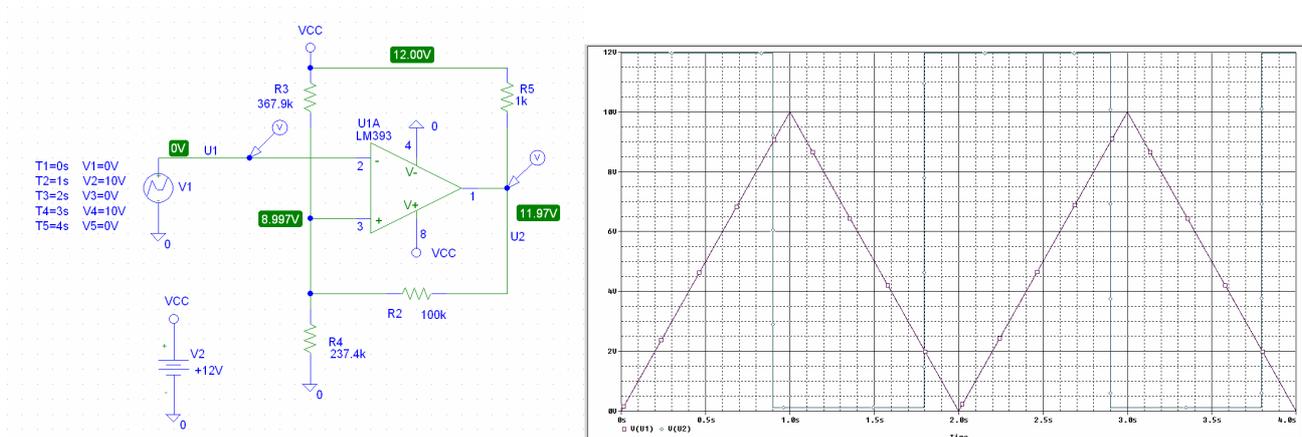


Bild 6:
Schema und Übertragungsverhalten des invertierenden Schmitt-Triggers nach Beispiel 3.

Bemerkung:

Der Wert des Pull-Ups R_5 beeinflusst die Werte für R_3/R_4 minimal und sollte in die Dimensionierung einfließen. Vor allem dann, wenn nicht gilt $R_5 \ll (R_4 \parallel R_3 + R_2)$.

Nicht invertierender Schmitt-Trigger

Die Grundsaltung für den nicht invertierenden Schmitt Trigger ist in Bild 7 gezeigt. Mittels Quelle $u_v \neq 0V$ oder $-u_{SAT-} \neq u_{SAT+}$ kann ein nullpunktsymmetrisches Schaltverhalten erreicht werden.

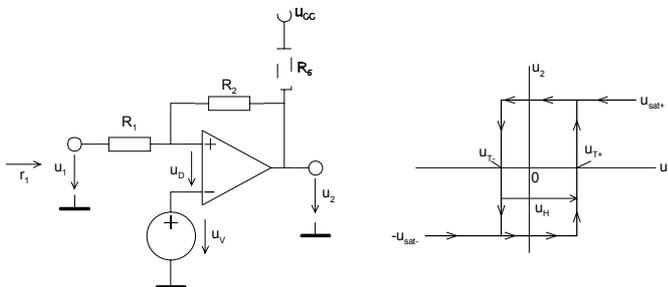


Bild 7:
Grundsaltung und Hysteresekennlinie des nicht invertierenden Schmitt-Triggers.

Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$u_v = \frac{u_{T+} \cdot u_{SAT+} - u_{T-} \cdot u_{SAT-}}{u_{SAT+} - u_{SAT-} + u_{T+} - u_{T-}} = \frac{u_{SAT} (u_{T+} + u_{T-})}{2u_{SAT} + u_{T+} - u_{T-}} \quad (u_{SAT} = -u_{SAT-} = u_{SAT+}) \quad (19)$$

$$u_{T\pm} = \frac{u_v (R_1 + R_2) - u_{SAT\mp} R_1}{R_2} = \frac{u_v (R_1 + R_2) \pm u_{SAT} R_1}{R_2} \quad (u_{T+} > u_{T-}) \quad (20)$$

$$R_1 = \frac{R_2 (u_{T+} - u_{T-})}{u_{SAT+} - u_{SAT-}} = \frac{R_2 (u_{T+} - u_{T-})}{2u_{SAT}} \quad (21)$$

$$u_H = \frac{(u_{SAT+} - u_{SAT-}) R_1}{R_2} = \frac{2R_1 u_{SAT}}{R_2} \quad (22)$$

$$r_1 = R_1 + R_2 \quad (23)$$

Die Dimensionierung erfolgt im Regelfall durch Vorgabe der Schaltpunkte u_{T+} , u_{T-} und der Wahl eines Widerstandes, z.B. R_2 .

Wird der Schmitt-Trigger mit Komparatorbausteinen realisiert ist $R_5 \ll (R_1 + R_2)$ für den Open-Collector Ausgang vorzusehen. In diesem Fall kann ohne grossen Fehler $u_{SAT} = u_{CC}$ gesetzt werden. Bei der Verwendung eines Operationsverstärkers ist jedoch u_{SAT} betragsmässig in der Grössenordnung von 0.5..1V kleiner als u_{CC} .

u_v kann über einen Spannungsteiler R_3/R_4 nach Bild 8 realisiert werden. Je nach benötigter Polarität von u_v wird u_{CC} entweder positiv oder negativ verwendet.

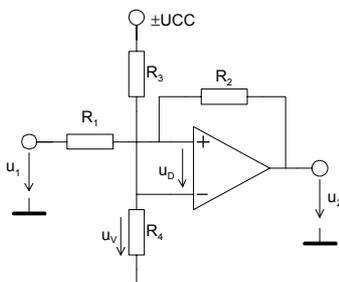


Bild 8:
Invertierender Schmitt-Trigger mit Erzeugung der Offsetspannung u_v über einen Spannungsteiler R_3/R_4 .

R_3 oder R_4 kann frei gewählt werden. Bei der Vorgabe von R_3 wird R_4 :

$$R_4 = \frac{u_v R_3}{\pm u_{CC} - u_v} \quad (24)$$

Analyse des nicht invertierenden Schmitt-Triggers

Die Analyse erfolgt durch Auswerten der Maschengleichungen in Formelblock(25).

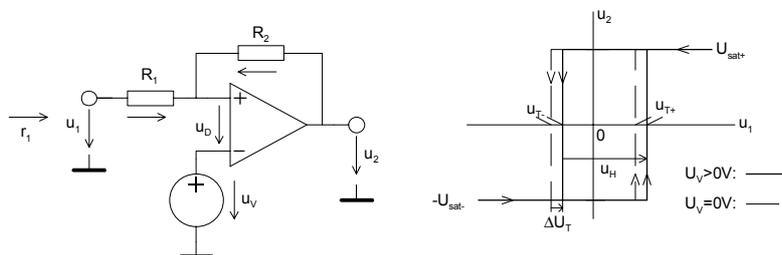


Bild 9:
Schaltbild und Hysteresekurve zur Analyse
des invertierenden Schmitt-Triggers

Ein Maschenansatz liefert die Spannungen u_p , u_2 :

$$\begin{aligned} u_1 + u_D &= u_{R1} + u_V \\ u_2 + u_D &= u_{R2} + u_V \end{aligned} \quad (25)$$

Die Spannung $u_V + u_D$ wird mittels Superposition:

$$u_V + u_D = u_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} + u_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (26)$$

Die Schaltpunkte u_{T+} , u_{T-} werden erreicht, wenn $u_D = 0V$. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Fall $u_2 = u_{SAT-}$:

Der Umschaltunkt $u_1 = u_{T-}$ wird mit (26):

$$u_{T-} = \frac{u_V (R_1 + R_2) - u_{SAT-} R_1}{R_2} \quad (27)$$

2. Fall $u_2 = u_{SAT+}$:

Der Umschaltunkt $u_1 = u_{T+}$ wird analog dem 1. Fall:

$$u_{T+} = \frac{u_V (R_1 + R_2) - u_{SAT+} R_1}{R_2} \quad (28)$$

Daher gilt für die Umschaltunkte beim nicht invertierenden Schmitt-Trigger allgemein, wobei

$$u_{SAT-} = -u_{SAT+} = u_{SAT\mp}$$

$$u_{T\pm} = \frac{u_V (R_1 + R_2) - u_{SAT\mp} R_1}{R_2} = \frac{u_V (R_1 + R_2) \pm u_{SAT} R_1}{R_2} \quad (29)$$

Die Hysterese u_H wird analog (14) bestimmt:

$$u_H = u_{T+} - u_{T-} = \frac{u_V(R_1 + R_2) - u_{SAT-}R_1}{R_2} - \frac{u_V(R_1 + R_2) - u_{SAT+}R_1}{R_2}$$

$$u_H = \frac{(u_{SAT+} - u_{SAT-})R_1}{R_2} = \frac{2u_{SAT}R_1}{R_2} \quad (30)$$

Die Dimensionierungsgleichung für R_1 ergibt sich direkt aus (30). U_V wird über die Hilfsspannung Δu_T bestimmt. Sie verkörpert die seitliche Abweichung der Hysteresekurve bezüglich der Mitte des möglichen Aussteuerbereiches:

$$\Delta u_T = u_{T+} \Big|_{u_V \neq 0} - u_{T+} \Big|_{u_V = 0} - \frac{u_{SAT+} + u_{SAT-}}{2} = \frac{u_V(R_1 + R_2) - u_{SAT-}R_1}{R_2} - \frac{u_{SAT-}R_1}{R_2} - \frac{u_{SAT-} + u_{SAT+}}{2} =$$

$$= \frac{2u_V(R_1 + R_2) - R_2(u_{SAT+} + u_{SAT-})}{2R_2} \stackrel{u_{SAT+} = u_{SAT-}}{=} \stackrel{u_{SAT-} = -u_{SAT+}}{=} \frac{u_V(R_1 + R_2)}{R_2} \quad (31)$$

$$\Delta u_T = u_{T+} - \frac{u_{T+} - u_{T-}}{2} - \frac{u_{SAT+} + u_{SAT-}}{2} = \frac{1}{2}(u_{T+} + u_{T-} - u_{SAT+} - u_{SAT-}) \stackrel{u_{SAT+} = u_{SAT-}}{=} \stackrel{u_{SAT-} = -u_{SAT+}}{=} \frac{1}{2}(u_{T+} + u_{T-}) \quad (32)$$

Nun kann der Ansatz über (31), (32) nach R_1 und u_V aufgelöst werden.

$$u_H = \frac{(u_{SAT+} - u_{SAT-})R_1}{R_2} \quad \rightarrow \quad R_1 = \frac{(u_{T+} - u_{T-})R_2}{u_{SAT+} - u_{SAT-}} = \frac{u_H R_2}{u_{SAT+} - u_{SAT-}} \quad (33)$$

$$u_V - \frac{u_{SAT+} + u_{SAT-}}{2} = \frac{\Delta u_T \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad \rightarrow \quad u_V = \frac{u_{T+} \cdot u_{SAT+} - u_{T-} \cdot u_{SAT-}}{u_{SAT+} - u_{SAT-} + u_{T+} - u_{T-}} = \frac{u_{SAT}(u_{T+} + u_{T-})}{2u_{SAT} + u_{T+} - u_{T-}} \quad (34)$$

Diese Gleichungen erlauben eine präzise Dimensionierung. Es gelten die gleichen Anmerkungen wie bei (17), (18).

Da der (+) Eingang nicht mehr einen virtuellen Massepunkt verkörpert, wird der Eingangswiderstand:

$$r_1 = R_1 + R_2 \quad (35)$$

Beispiel 4: (Nicht invertierender Schmitt-Trigger)

Ein nicht invertierender Schmitt-Trigger mit einem OpAmp LF411 soll für folgende Vorgaben dimensioniert werden:

$$u_{T+} = 4V \quad u_{T-} = -1V \quad u_{CC} = \pm 12V$$

$$u_{SAT} = 11.3V$$

Lösung:

Wir wählen den Widerstand $R_2=10k\Omega$. Mit den Gleichungen (17), (18) werden die Offsetspannung u_v und der Widerstand R_1 :

$$u_v = \frac{u_{SAT}(u_{T+} + u_{T-})}{2u_{SAT} + u_{T+} - u_{T-}} = \frac{11.3(4 - 1)}{2 \cdot 11.3 + 4 + 1} = 1.22826V$$

$$R_1 = \frac{R_2(u_{T+} - u_{T-})}{2u_{SAT}} = \frac{10K(4 + 1)}{2 \cdot 11.3} = 2.21239k\Omega$$

Der Spannungsteiler zur Erzeugung der Offsetspannung u_v wird mit (24):

$$R_3 = 10k\Omega \quad (\text{Wahl})$$

$$R_4 = \frac{u_v R_3}{\pm u_{CC} - u_v} = \frac{1.22826 \cdot 10K}{12 - 1.22826} = 1.14026k\Omega$$

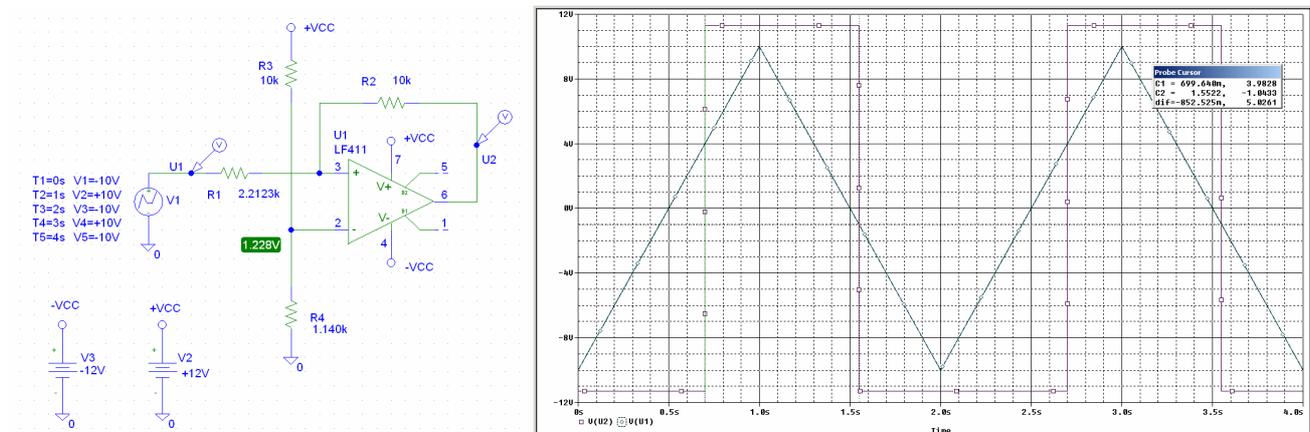


Bild 10:
Schema und Übertragungsverhalten des nicht invertierenden Schmitt-Triggers nach Beispiel 4.

Beispiel 5: (Bestimmung der Umschaltunkte am nicht invertierenden Schmitt-Trigger)
Man bestimme die Umschaltunkte des Schmitt-Triggers in Bild 11. Die Sättigungsspannung beträgt $u_{SAT} = \pm 11.3V$.

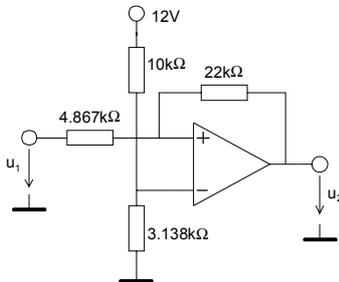


Bild 11:
Nicht invertierender Schmitt-Trigger in Beispiel 5 zur Bestimmung der Umschaltunkte.

Lösung:

Die Umschaltunkte werden mit (29) und (34):

$$u_V = \frac{u_{CC} \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{12 \cdot 3.138K}{10K + 3.138K} = 2.8662V$$

$$u_{T+} = \frac{u_V (R_1 + R_2) + u_{SAT+} R_1}{R_2} = \frac{2.8662(4.867K + 22K) + 11.3 \cdot 4.867K}{22K} = 6V$$

$$u_{T-} = \frac{u_V (R_1 + R_2) - u_{SAT-} R_1}{R_2} = \frac{2.8662(4.867K + 22K) - 11.3 \cdot 4.867K}{22K} = 1V$$

Beispiel 6: (Nicht invertierender Schmitt-Trigger mit verschiedenen $U_{SAT\pm}$)

Ein invertierender Schmitt-Trigger mit einem OpAmp soll für folgende Vorgaben dimensioniert werden:

$$u_{T+} = 5V \quad u_{T-} = 1V \quad u_{SAT-} = -5V \quad u_{SAT+} = 12V$$

Lösung:

Wir wählen den Widerstand $R_2 = 10k\Omega$. Mit den Gleichungen (33),(34) wird die Offsetspannung u_V und der Widerstand R_1 :

$$R_1 = \frac{(u_{T+} - u_{T-}) R_2}{u_{SAT+} - u_{SAT-}} = \frac{(5 - 1) \cdot 10K}{12 - (-5)} = 2.352k\Omega$$

$$u_V = \frac{u_{T+} \cdot u_{SAT+} - u_{T-} \cdot u_{SAT-}}{u_{SAT+} - u_{SAT-} + u_{T+} - u_{T-}} = \frac{5 \cdot 12 - 1 \cdot (-5)}{12 - (-5) + 5 - 1} = 3.095V$$

Die Kontrolle der Schaltpunkte ergibt:

$$u_{T+} = \frac{u_V (R_1 + R_2) - u_{SAT-} R_1}{R_2} = \frac{3.095V(2.352K + 10K) - (-5V) \cdot 2.352K}{10K} = 5V$$

$$u_{T-} = \frac{u_V (R_1 + R_2) - u_{SAT+} R_1}{R_2} = \frac{3.095V(2.352K + 10K) - 12V \cdot 2.352K}{10K} = 1V$$

Beispiel 7: (Nicht invertierender Schmitt-Trigger für Single-Supply Betrieb)

Ein invertierender Schmitt-Trigger mit einem OpAmp LM741 soll zum Betrieb an einer Speisespannung für folgende Vorgaben dimensioniert werden:

$$u_{T+} = 3.5V \quad u_{T-} = 3V \quad u_{CC} = 5V$$

$$u_{SAT-} = 0.1837V \quad u_{SAT+} = 4.82V$$

Lösung:

Wir wählen den Widerstand $R_2 = 10k\Omega$. Mit den Gleichungen (33),(34) wird die Offsetspannung u_V und der Widerstand R_1 berechnet. Die Spannung u_V wird aus der Versorgungsspannung u_{CC} mit einem Spannungsteiler R_3/R_4 gemäß (24) erzeugt:

Vorgaben:

$$u_{CC} := 5 \cdot V \quad u_{SATP} := 4.82V \quad u_{SATN} := 183.7mV$$

$$R_2 := 10k\Omega \quad u_{TP} := 3.5V \quad u_{TN} := 3V$$

Berechnungen:

$$R_1 := \frac{(u_{TP} - u_{TN}) \cdot R_2}{u_{SATP} - u_{SATN}} \quad R_1 = 1.078 \times 10^3 \Omega$$

$$u_V := \frac{u_{TP} \cdot u_{SATP} - u_{TN} \cdot u_{SATN}}{u_{SATP} - u_{SATN} + u_{TP} - u_{TN}} \quad u_V = 3.177V$$

$$R_3 := 10k\Omega \quad (\text{Wahl}) \quad R_3 = 1 \times 10^4 \Omega$$

$$R_4 := \frac{u_V \cdot R_3}{u_{CC} - u_V} \quad R_4 = 1.743 \times 10^4 \Omega$$

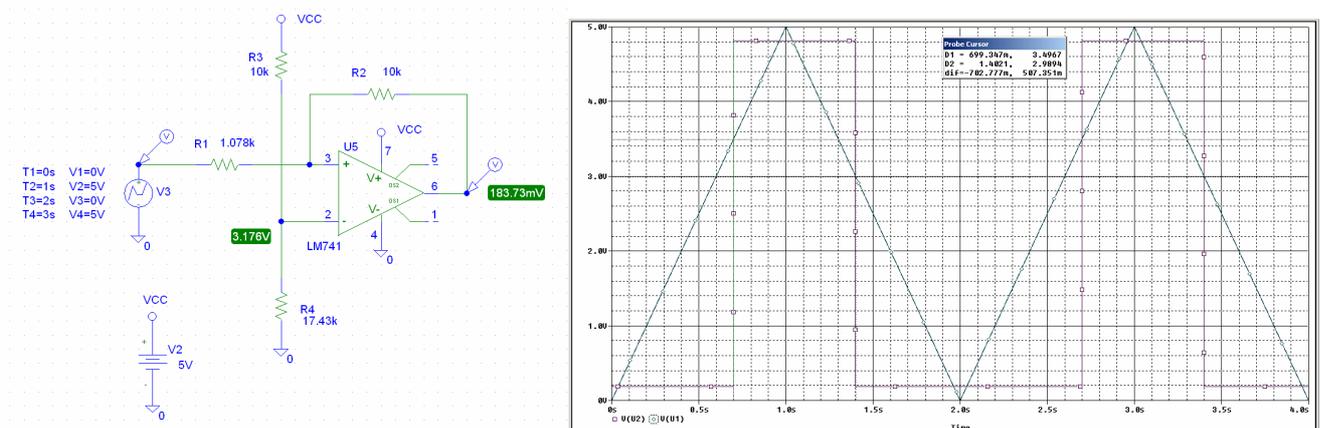


Bild 12:
Schema und Übertragungsverhalten des nicht invertierenden Schmitt-Triggers nach Beispiel 7.

Bemerkung:

Für kleine Speisespannungen ist ein Bipolar-OpAmp, wie der LM741, besser geeignet als ein LF411, da die $U_{SAT\pm}$ wesentlich näher an der Speisespannung liegen.