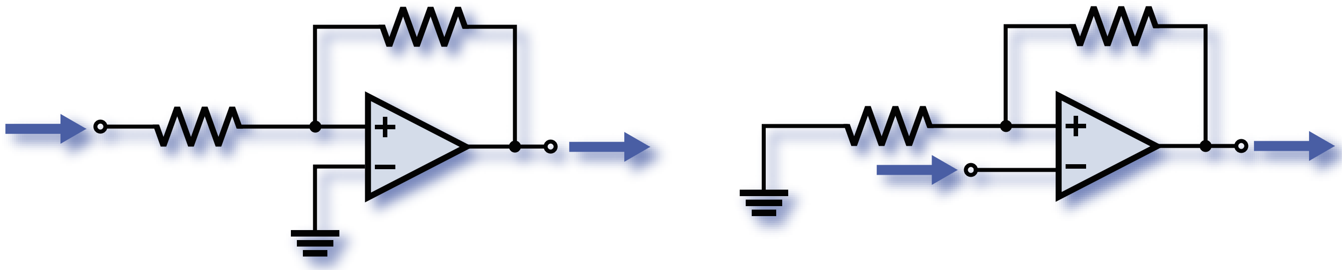
Schmitt-Trigger mit Opamps

Schaltungen und Berechnungen



Ein Schmitt-Trigger ist eine Standardschaltung der Elektronik – nichts Aufregendes sollte man meinen. Man nehme einen Opamp und ein paar Widerstände und das war's, oder? Wenn man die Hysterese und die Schaltschwellen nur grob festlegen will, dann stimmt das. Will man diese Werte aber präzise bestimmen und zum Beispiel auf gängige E-Reihen hin optimieren, dann braucht man passende Schaltungen sowie passende Berechnungen. In diesem Artikel finden Sie beides.

Von **Volker Schmidt** (D)

Die Berechnung von Schmitt–Triggern auf der Basis von Opamps ist nicht so ganz einfach, falls man nicht öfter damit zu tun hat. Ein Ansatz zur Berechnung dieser Schaltungen bestimmt über den Rückkopplungswiderstand die Referenzspannung. Die Referenzspannung liegt dann aber meist nicht in der Mitte des Hysterese-Fensters, und zudem ergeben sich bei der Berechnung oft krumme Werte, für die es keine Z-Dioden o.ä. gibt. So bleibt nur ein Spannungsteiler mit Widerstandswerten jenseits praktikabler E-Reihen oder ein Trimmpoti zur Erzeugung der Referenzspannung. Praktischer wäre es, wenn man die Referenzspannung mit Z-Dioden, Referenzspannungsquellen oder einfachen Spannungsteilern mit Widerständen aus der E-12-Reihe erzeugen und die Schaltung nach der Referenzspannung berechnen könnte. Mit Standardschaltungen ist das nicht ohne weiteres möglich, aber mit einer geringfügigen Modifikation können zuerst die Referenzspannung und die Schaltschwellen festgelegt sowie im zweiten Schritt die anderen Bauteile berechnet werden. Der Aufwand dafür hält sich in Grenzen, denn es werden nur drei Bauteile zusätzlich benötigt. Dieses Vorgehen ist sowohl für den nichtinvertierenden als auch für den invertierenden Schmitt-Trigger möglich.

Nichtinvertierender Schmitt-Trigger

Das Schaltverhalten des nichtinvertierenden Schmitt-Triggers in **Bild 1** wird durch die Spannung an R2 und seinen Ausgangsspannungsbereich bestimmt. Addiert bzw. subtrahiert man zu U_{R2} die Hysterese ΔU_H, ergeben sich die Schaltschwellen des Schmitt-Triggers. Idealerweise liegt die Referenzspan-

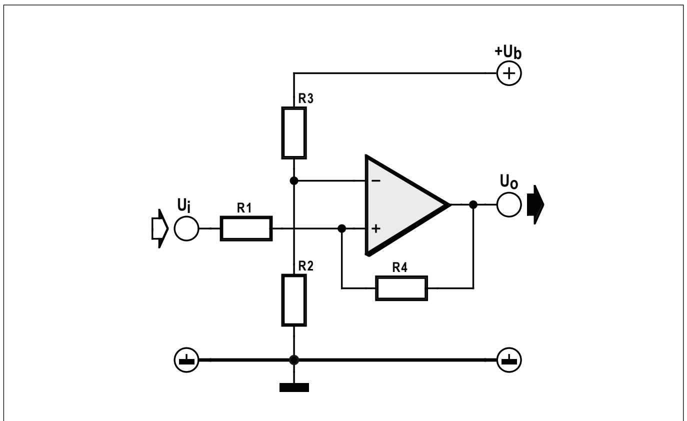


Bild 1. Die Standardschaltung eines nichtinvertierenden Schmitt-Triggers mit Opamp.

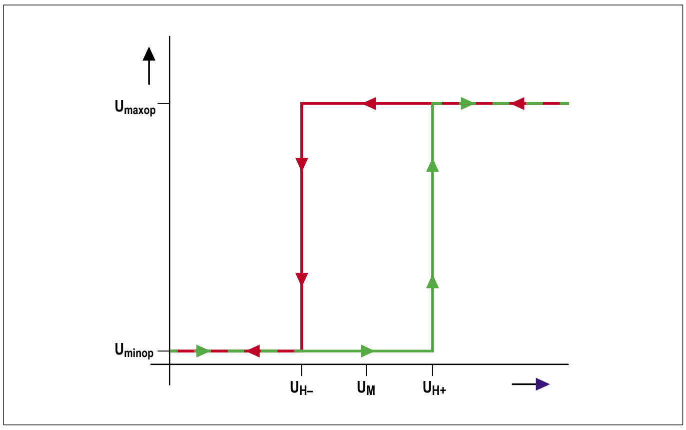


Bild 2. Hysterese-Diagramm eines idealen Schmitt-Triggers.

nung (**Bild 2**) in der Mitte zwischen oberer (U_{H+}) und unterer Schaltschwelle (U_{H-}). Dies ist aber nicht zwingend erforderlich. Man sollte außerdem darauf achten, die Referenzspannung nicht zu nahe an die Schaltschwellen zu legen. Berechnet man die Standardschaltung von Bild 1 über die Referenzspannung U_{R2}, ergibt sich das Problem, dass eine Schaltschwelle nicht frei wählbar ist. Die Werte von U_{H+} und U_{H-} sind bezogen auf die Referenz nicht symmetrisch. Theoretisch gleich groß und symmetrisch sind sie nur, wenn man bei symmetrischer Spannungsversorgung den invertierenden Eingang auf Masse oder bei unsymmetrischer Versorgung genau auf die Hälfte des Ausgangsspannungsbereichs des Opamps legt.
Die Ursache für dieses Verhalten ist der Strom, der durch R4 und R1 fließt. Er hängt von der Spannungsdifferenz der Ausgangsspannung und der Spannung am invertierenden Eingang ab. Nur wenn der Wert des Stroms dem Betrag nach im eingeschalteten wie im ausgeschalteten Zustand gleich ist, gelten die Zusammenhänge:

$$U_{H+} = U_{R2} + \Delta U_{H+}$$

$$U_{H-} = U_{R2} - \Delta U_{H-}$$

$$|\Delta U_{H+}| = |\Delta U_{H-}|$$

$$I_{R4} = \frac{U_{maxop} - U_{R2}}{R4} = -\frac{U_{minop} - U_{R2}}{R4}$$

$$I_{R1} = -I_{R4}$$

$$\Delta U_H = -I_{R4} \times R1$$

Ist dies nicht der Fall, kann man zwar zum Beispiel U_{H+} vorgeben, doch auf U_{H-} hat man keinen direkten Einfluss. Der Wert von I_{R4} ist in den beiden Schaltzuständen dann nicht identisch. Ein Rechenbeispiel bei Verwendung des Opamps CA3140 in Bild 1 macht dies deutlich. Ausgangsparameter sind:

$U_m = U_{R2} = 1{,}7$ V	$U_B = 9$ V	$\Delta U_{H+} = 0{,}2$ V
$U_{H+} = 1{,}9$ V	$U_{maxop} = 6{,}8$ V (gemessen)	
$U_{H-} = 1{,}5$ V gewünscht	$U_{minop} = 0{,}01$ V (gemessen)	

Nun zur Berechnung des **Spannungsteilers** R2/R3:

$$\frac{R2}{R3} = \frac{U_{R2}}{U_{R3}}$$

$$R2 = R3 \times \frac{U_{R2}}{U_{R3}}$$

Wählt man für R3 den Wert 10 kΩ, ergibt sich:

$$R2 = 10\,k\Omega \times \frac{1{,}7V}{7{,}3V} = 2{,}33\,k\Omega$$

Diesen Wert kann man aus 2,2 kΩ + 100 Ω genau genug zusammensetzen. Da beim Opamp die Potentiale beim Schalten an den Eingängen gleich sind, gilt auch:

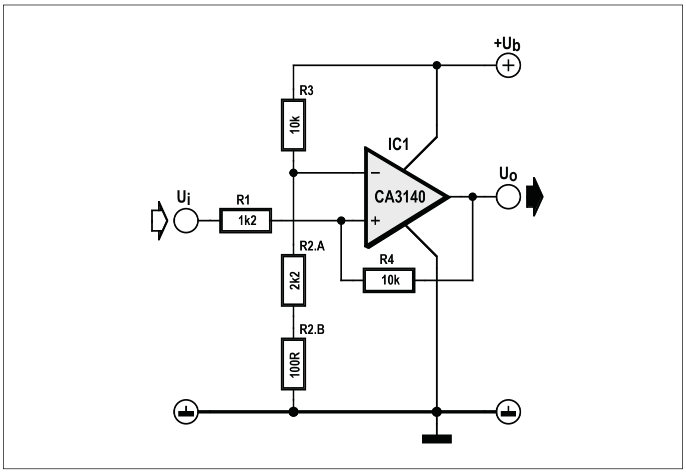


Bild 3. Die fertig dimensionierte Standardschaltung eines nichtinvertierenden Schmitt-Triggers.

$$U_p = U_n$$

$$U_{R4} = U_{minop} - U_{R2}$$

$$U_{R4} = 0{,}01V - 1{,}7V = -1{,}69V$$

Hat R4 den Wert 10 kΩ, gilt:

$$I_{R4} = \frac{U_{R4}}{R4} = \frac{-1{,}69V}{10\,k\Omega} = -169\mu A$$

und:

$$I_{R1} = -I_{R4}$$

Der Wert für R1 ergibt sich daher nach der Formel:

$$R1 = \frac{\Delta U_{H+}}{I_{R1}} = \frac{0{,}2V}{169\mu A} = 1{,}183\,k\Omega$$

Ein Wert von 1,2 kΩ ist also eine gute Näherung für R1. Nun zur Bestimmung von U_{H-}, der **unteren Schaltschwelle**:

$$U_{R4} = U_{maxop} - U_{R2}$$

$$U_{R4} = 6{,}8V - 1{,}7V = 5{,}1V$$

$$I_{R4} = \frac{U_{R4}}{R4} = \frac{5{,}1V}{10\,k\Omega} = 510\,\mu A$$

$$R1 = \frac{\Delta U_{H-}}{I_{R1}}$$

$$\Delta U_{H-} = R1 \times I_{R1}$$

$$I_{R1} = -I_{R4}$$

$$\Delta U_{H-} = 1{,}2\,k\Omega \times -510\,\mu A = -0{,}612V$$

$$U_{H-} = U_{R2} - \Delta U_{H-} = 1{,}088V$$

Die reale untere Schaltschwelle weicht deutlich vom gewünschten Wert ab. **Bild 3** zeigt die fertig dimensionierte Standardschaltung. Die Mathematik und die beiden Oszillogramme

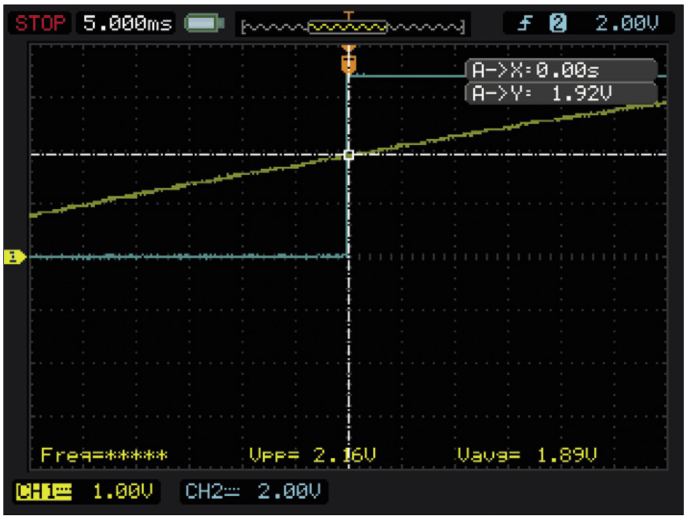


Bild 4. Oszillogramm der oberen Schaltschwelle der nichtinvertierenden Standardschaltung.

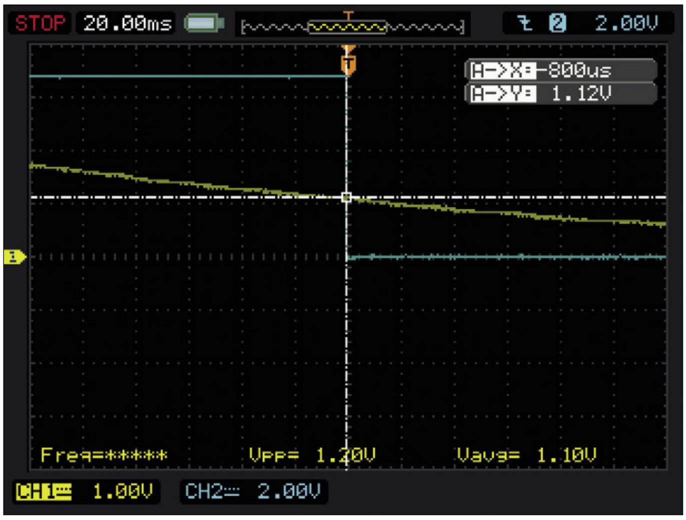


Bild 5. Oszillogramm der unteren Schaltschwelle der nichtinvertierenden Standardschaltung.

(**Bild 4** und **Bild 5**) zeigen, dass die Schaltschwellen theoretisch wie praktisch nicht symmetrisch zur Referenz liegen.

Schalten mit Präzision

Modifizierte Schaltung

Abhilfe würde ein getrennter Rückkopplungszweig für die obere und untere Schaltschwelle bringen. Durch geeignete Wahl der Widerstände kann man dann die beiden Schwellen frei wählen. Hierzu müssen, wie in **Bild 6** gezeigt, neben zwei Rückkopplungswiderständen auch noch zwei Dioden eingefügt werden. Wegen des geringeren Spannungsabfalls bieten sich hier Schottky-Dioden wie zum Beispiel der Typ 1N5817 an. R4 ist für die obere und R5 für die untere Schaltschwelle zuständig. Die Hysterese kann so sehr flexibel den jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

Für die Berechnung dieser Schaltung (ebenfalls mit CA3140) gelten folgende Parameter:

U_m = U_{R2} = 1,7 V	U_B = 9 V	U_{FD} = 0,21 V (gemessen)
U_{H+} = 1,9 V	U_{maxop} = 6,8 V (gemessen)	R_3 = 10 kΩ
U_{H-} = 1,5 V	U_{minop} = 0,01 V (gemessen)	ΔU_H = 0,2 V

Die Berechnung des **Spannungsteilers** R2/R3 lautet:

$$R2 = R3 \times \frac{U_{R2}}{U_{R3}} = 10\,k\Omega \times \frac{1{,}7\,V}{7{,}3\,V} = 2{,}33\,k\Omega$$

R2 kann man wieder aus einem 2,2-kΩ- und einem 100-Ω-Widerstand zusammensetzen. Die **obere Schaltschwelle** errechnet sich zu:

$$U_{R4} = U_{minop} + U_{FD} - U_{R2} = 0{,}01V + 0{,}21V - 1{,}7V = -1{,}48V$$

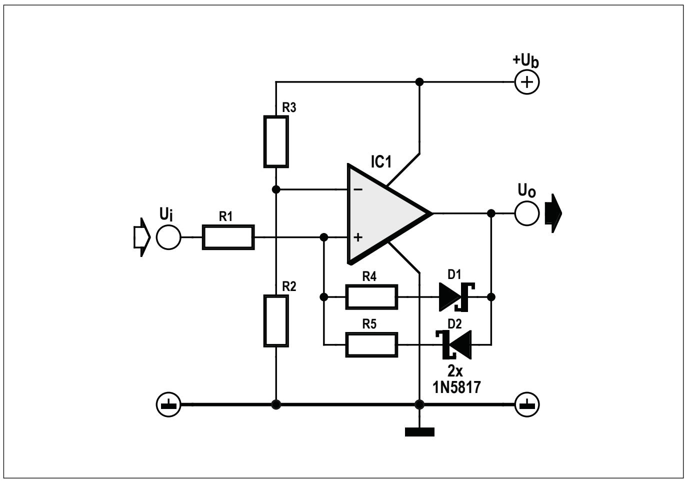


Bild 6. Prinzip der Modifikation eines nichtinvertierenden Schmitt-Triggers.

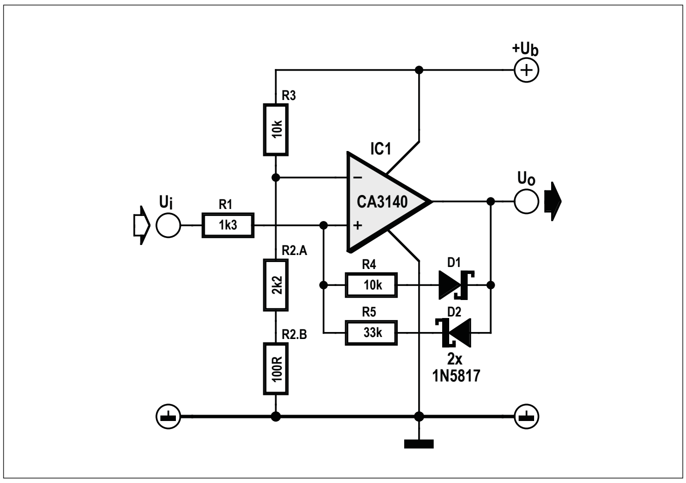


Bild 7. Die fertig dimensionierte Modifikation des nichtinvertierenden Schmitt-Triggers.

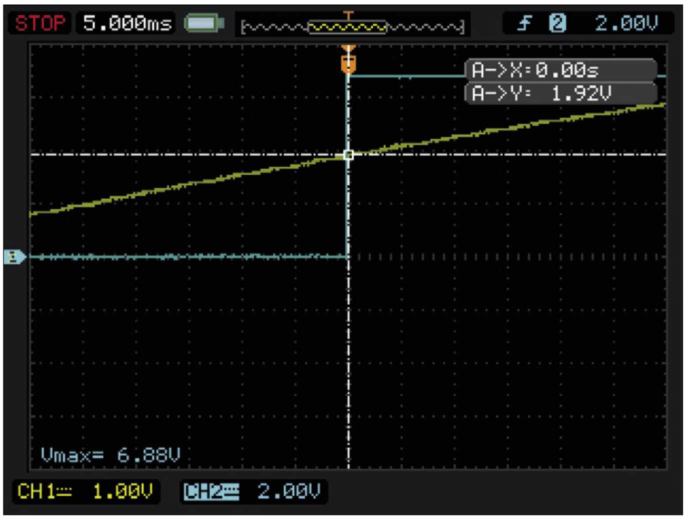


Bild 8. Oszillogramm der oberen Schaltschwelle der nichtinvertierenden Modifikation.

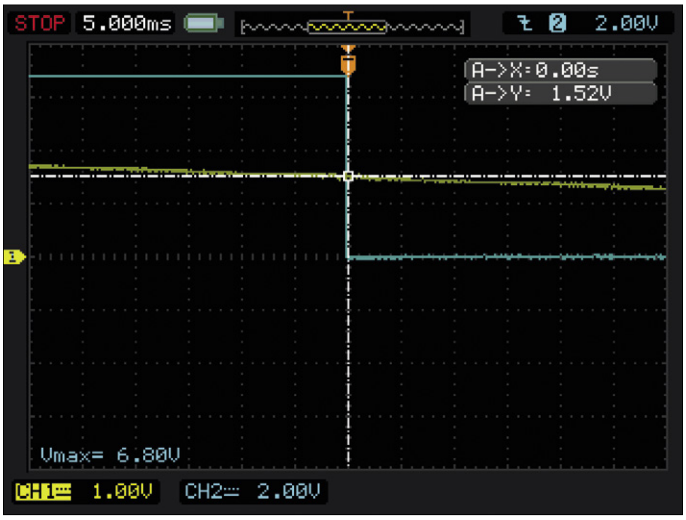


Bild 9. Oszillogramm der unteren Schaltschwelle der nichtinvertierenden Modifikation.

Mit R4 = 10 kΩ ergibt sich somit ein Strom I_{R4} von -148 µA. Da bei den Schaltschwellen die Potentiale an den Opamp-Eingängen gleich sind, gilt:

$$U_p = U_n$$

und daher auch:

$$I_{R1} = -I_{R4}$$

Das Potential am nichtinvertierten Eingang muss um den Wert:

$$\Delta U_{H+} = U_{H+} - U_{R2}$$

höher sein, damit der Schmitt-Trigger schaltet und der Ausgang auf U_{maxop} springt. Der Wert für R1 ergibt sich nun nach der Formel:

$$R1 = \frac{\Delta U_{H+}}{I_{R1}} = \frac{0,2\,V}{148\,\mu A} = 1,351\,k\Omega$$

R1 kann daher mit nur geringem Fehler auf den E-24-Wert 1,3 kΩ gesetzt werden.

Für die **untere Schaltschwelle** gilt:

$$I_{R5} = \frac{U_{maxop} - U_{FD} - U_{R2}}{R5} = 148\,\mu A \rightarrow obere\ Schaltschwelle!$$

$$R5 = \frac{U_{maxop} - U_{FD} - U_{R2}}{I_{R5}} = \frac{6,8\,V - 0,21\,V - 1,7\,V}{148\,\mu A} = 33,04\,k\Omega$$

Für R5 passt der E-12-Wert 33 kΩ prima. **Bild 7** enthält die fertig dimensionierte Schaltung. Schaut man sich die beiden Oszillogramme (**Bild 8** und **Bild 9**) an, erkennt man eine sehr gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten.

Invertierender Schmitt-Trigger

Auch beim invertierenden Schmitt-Trigger ist es möglich, die Schaltschwellen ausgehend von der Referenzspannung zu berechnen. Wie bei der nichtinvertierenden Version ist bei der Standardschaltung in **Bild 10** ebenfalls eine kleine Modifikation möglich, die dann zur Version in **Bild 11** führt. Auch hier werden die beiden Schwellen mit Hilfe von zwei Widerständen und zwei Schottky-Dioden entkoppelt. Diesmal liegen diese Bauteile aber nicht im Rückkopplungszweig, sondern in der

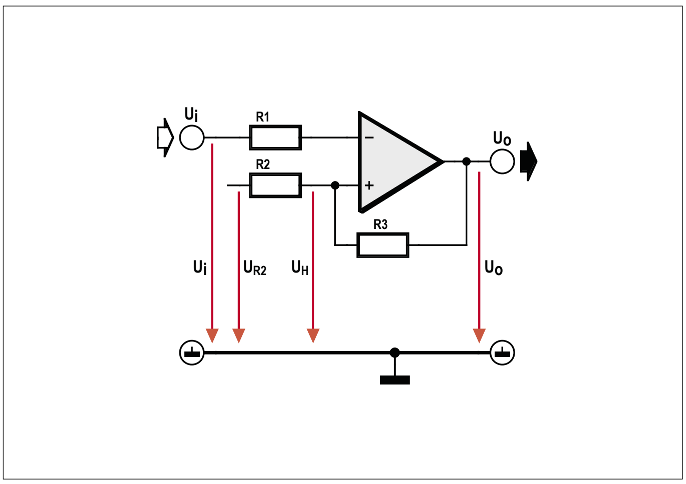


Bild 10. Die Standardschaltung des invertierenden Schmitt-Triggers.

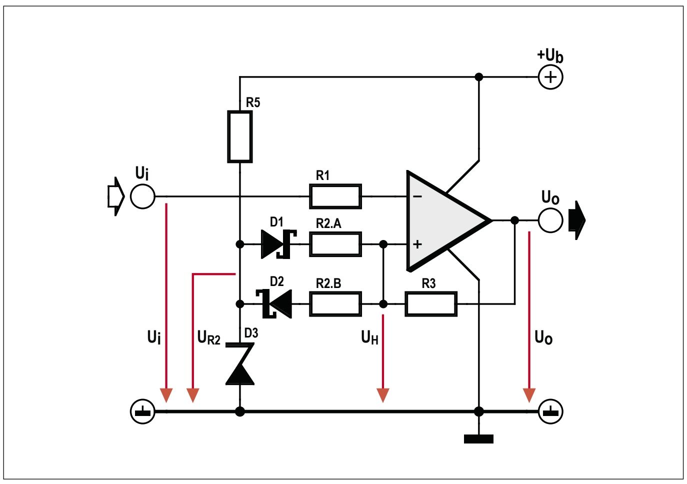


Bild 11. Prinzip der Modifikation eines invertierenden Schmitt-Triggers.

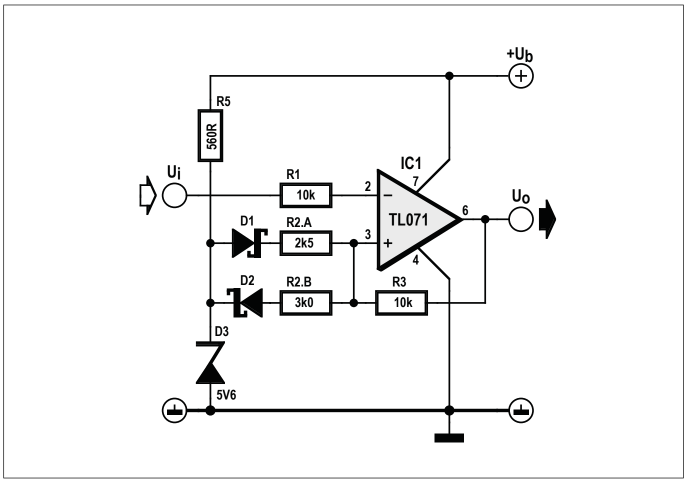


Bild 12. Die fertig dimensionierte Modifikation des invertierenden Schmitt-Triggers.

Verbindung zur Referenzspannung. Die Aufspaltung von R2 in R2.A und R2.B sorgt dafür, dass am nichtinvertierenden Opamp-Eingang je nach Schaltzustand die richtige Vergleichsspannung anliegt. Der Widerstand R3 wird gewählt, und R2.A und R2.B ergeben sich dann.

Bei der **unteren Schaltschwelle** gelten die Gleichungen $U_a = U_{minop}$ und $U_H = U_{H-}$ sowie die folgenden Formeln:

$$\frac{U_{H-} - U_{minop}}{R3} = \frac{U_{R2} - U_{FD} - U_{H-}}{R2.A}$$

$$R2.A = R3 \times \frac{U_{R2} - U_{FD} - U_{H-}}{U_{H-} - U_{minop}}$$

Bei der **oberen Schaltschwelle** können wir die Gleichungen $U_a = U_{maxop}$ und $U_H = U_{H+}$ benutzen:

$$\frac{U_{maxop} - U_{H+}}{R3} = \frac{U_{H+} - U_{R2} - U_{FD}}{R2.B}$$

$$R2.B = R3 \times \frac{U_{H+} - U_{R2} - U_{FD}}{U_{maxop} - U_{H+}}$$

Die modifizierte Schaltung wird nun für einen konkreten Fall dimensioniert und es wird die korrekte Funktion überprüft. Dabei gelten bei Verwendung eines TL071 folgende Parameter:

$U_m = U_{R2}$ = 5,6 V	U_B = 9 V	R_3 = 10 kΩ
U_{H+} = 6,6 V	U_{maxop} = 8,2 V (gemessen)	U_{FD} = 0,21 V (gemessen)
U_{H-} = 4,6 V	U_{minop} = 1,48 V (gemessen)	

Bei der **unteren Schaltschwelle** gilt folgende Gleichung:

$$R2.A = R3 \times \frac{U_{R2} - U_{FD} - U_{H-}}{U_{H-} - U_{minop}} =$$

$$\frac{5{,}6\,V - 0{,}21\,V - 4{,}6\,V}{4{,}6\,V - 1{,}48\,V} \times 10\,k\Omega = 2{,}532\,k\Omega$$

R2.A kann man bequem aus 1,5 kΩ und 1 kΩ zusammensetzen. Bei der **oberen Schaltschwelle** gilt:

$$R2.B = R3 \times \frac{U_{H+} - U_{R2} - U_{FD}}{U_{maxop} - U_{H+}} =$$

$$\frac{6{,}6\,V - 5{,}6\,V - 0{,}21\,V}{8{,}2\,V - 5{,}6\,V} \times 10\,k\Omega = 3{,}038\,k\Omega$$

Setzt man R2.B aus den Werten 1,8 kΩ und 1,2 kΩ zusammen, ergibt sich nur ein Fehler von etwa 1,3 %. **Bild 12** zeigt die fertig dimensionierte Schaltung. Die Oszillogramme (**Bild 13** und **Bild 14**) beweisen, dass die realen Schwellen sehr nahe an den errechneten Werten liegen.

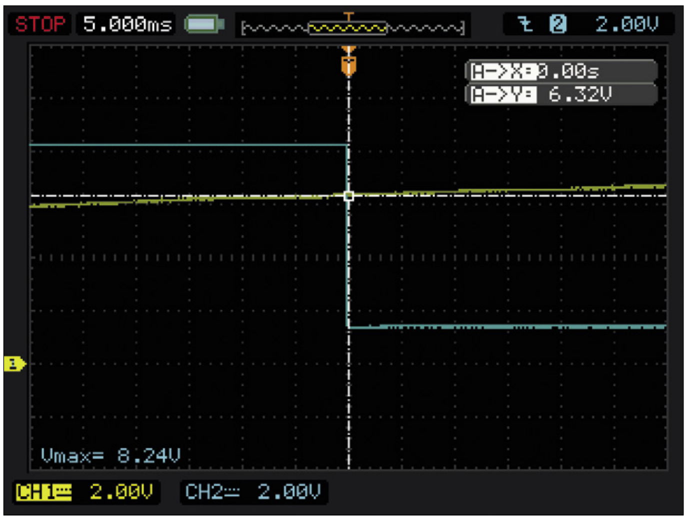


Bild 13. Oszillogramm der oberen Schaltschwelle der invertierenden Modifikation. Der Verlauf der Ausgangsspannung (blaugrüne Linie) ist ebenfalls invertiert.

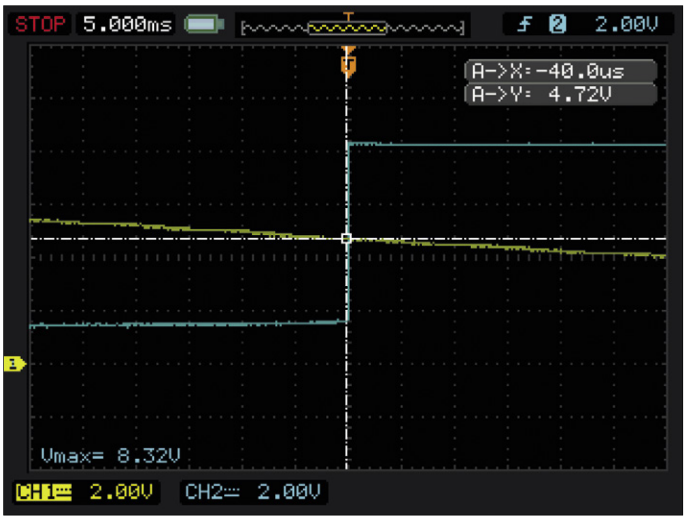


Bild 14. Oszillogramm der unteren Schaltschwelle der invertierenden Modifikation.

Parameter-Legende

Parameter	Bedeutung
U_b	Versorgungsspannung
U_{maxop}	Maximale Ausgangsspannung Opamp
U_{minop}	Minimale Ausgangsspannung Opamp
U_H	Schaltspannung allgemein
U_{H+}	Obere Schaltschwelle
U_{H-}	Untere Schaltschwelle
U_M	Mittlere Schaltspannung
ΔU_{H+}	Positive Hysterese
ΔU_{H-}	Negative Hysterese
U_{R2}	Referenzspannung
U_{FD}	Durchlassspannung Schottky-Diode

Die Werte von U_{minop}, U_{maxop} und U_{FD} sollten messtechnisch bestimmt werden, da sie für die Genauigkeit eine zentrale Rolle spielen. In den Datenblättern der Opamps und Dioden sind die angegebenen Werte oft mit zu großen Toleranzbereichen behaftet.

Über den Autor

Volker Schmidt arbeitet nach vielen Jahren als Projektierungsingenieur für Fernwirksysteme und speicherprogrammierbare Steuerungen freiberuflich in der Sparte IT. Elektronik ist schon seit dem 12. Lebensjahr sein Hobby. Heutzutage beschäftigt er sich besonders mit AVR-Controllern, aber auch mit analogen Schaltungen.

Fazit

Auch wenn sich die Sache etwas trocken anfühlt, werden Sie bei der nächsten Berechnung eines Schmitt-Triggers merken, dass sich die beiden Schaltungen in den Bildern 7 und 12 mit Hilfe der zugehörigen Formeln sehr fix berechnen lassen. Der Aufwand ist allerdings nur da gerechtfertigt, wo es auf genaue Schaltschwellen ankommt. Ist das nicht der Fall, genügt auch die „normale" Schaltung von Bild 3. Und auch dafür finden Sie hier die Formeln. Viel Spaß damit!

(160340)