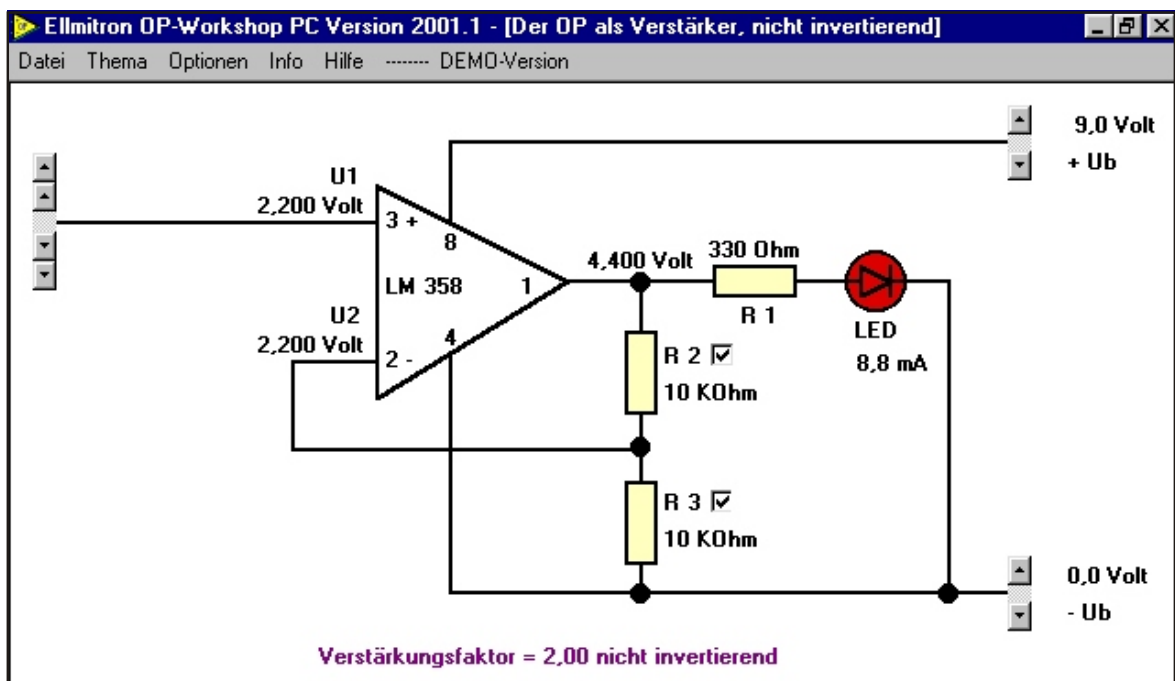


# ELL-OP-358

## Workshop Operationsverstärker 'PC'

Autor: Carsten Engelhardt  
Programmentwicklung: Carsten Engelhardt

Version 2001.1



— *ELLMITRON* —

- [Lizenzbestimmungen](#)
- [Hardwarevoraussetzungen](#)
- [Installation](#)
- [Programmstart](#)
- [Ziel von EII-OP-358](#)
- [Programmfunktionen](#)
- [Menüpunkte](#)
- [Themenblätter](#)
  - [LED und Vorwiderstand](#)
  - [Komparator, schematisch](#)
  - [Komparator, Schaltbild](#)
  - [Transistorstufe](#)
  - [Transistorstufe, mit getrennter Stromversorgung](#)
  - [Komparator mit Hysterese](#)
  - [Komp. mit zwei OP's in Wechselschaltung](#)
  - [Komp. mit zwei OP's \(Leistungsschalter\)](#)
  - [Komp. mit zwei OP's \(Fensterdiskriminator\)](#)
  - [Thermoschalter](#)
  - [Thermoschalter mit Hysterese](#)
  - [Temperaturregelung mit dem OP](#)
  - [Ausschaltverzögerung/Sensortaste](#)
  - [Blinklicht](#)
  - [Blink-/Blitzlicht \(Flashlight\)](#)
  - [Verstärker, nicht invertierend](#)
  - [Verstärker, invertierend](#)

## **Lizenzbestimmungen**

Mit der Installation der Ellmitron-Software erkennen Sie die Lizenzbestimmungen der Firma Ellmitron an.

Das Programm wird nur als Schul-Lizenz oder DEMO-Version angeboten.

Für die Verwendung als DEMO-Version darf das Programm jederzeit weitergegeben werden. Die Lizenzdaten dürfen **nicht** weitergegeben werden. Manche Themen sind in der DEMO-Version nicht verfügbar.

## **Hinweis!**

***Dieses Programm habe ich im vergangenen Jahrtausend geschrieben und leider ist es auch nicht mehr „updatebar“.***

***Für den Unterricht ist es dennoch eine schöne Ergänzung.***

***Es wurde für eine Bildschirmauflösung von 640 X 480 (VGA) erstellt und wenn man es mit Win 10+ optimal nutzen möchte, sollte man das Programm in dieser Auflösung betreiben.***

***Da das Programm nicht über den Server bereitgestellt werden kann, startet man das Programm am besten direkt vom gelieferten USB-Stick. Hier lassen sich dann auch individuelle Einstellungen speichern.***

***Wenn Sie hierzu Fragen haben, können Sie mich gerne kontaktieren unter***

***[info@ellmitron.de](mailto:info@ellmitron.de)***

### ***Ihr Carsten Engelhardt***

Eine Schul-Lizenz erlaubt den Gebrauch des Programms auf allen Computern innerhalb der Lizenznehmer-Schule, sowie auf Computern, die der Unterrichtsvorbereitung bezüglich der Lizenznehmer-Schule dienen, als auch auf Computern von Schülern der Lizenznehmer-Schule.

Nur wenn Sie eine lizenzierte Schul-Lizenz besitzen stehen Ihnen alle Funktionen des Programms und der komplette Service von Ellmitron zur Verfügung. Eine DEMO-Version darf nicht für Unterrichtszwecke eingesetzt werden.

Bitte geben Sie Ihre Lizenzierungsdaten nach dem ersten Start des Programms ein.

**Code-Nummer: 994158851**

**Lizenz-Nehmer: Meine Schule**  
(Bitte geben Sie hier wirklich „Meine Schule“ ein und nicht den Namen Ihrer Schule!)

**Lizenz-Nummer: 2017000**

### **Programmstart**

Das Programm kann direkt durch Doppelklick auf das Programmsymbol bzw. die Datei EllOP358.exe gestartet werden.

Beim ersten Start werden Sie nach den Lizenzdaten gefragt. Geben Sie diese ganz genau unter Beachtung von Groß- und Kleinschreibung und aller Leer- und Sonderzeichen ein. Wenn Sie das Programm als DEMO-Version betreiben wollen brauchen Sie keine Lizenzdaten eingeben.

## Ziel von EII-OP-358, der Workshop-Operationsverstärker für den PC

EII-OP-358 bietet einen äußerst sinnvollen und didaktisch wertvollen Einstieg in die Schaltungstechnik mit Operationsverstärkern.

EII-OP-358 ermöglicht die interaktive Gestaltung von Schaltungsabläufen und Simulation des Bauteilverhaltens bei veränderbaren Bauteilwerten. Die Schaltungen sind übersichtlich und die Funktionen anschaulich dargestellt. Das Programm soll dabei nicht das Löten und Herstellen von „echten“ Schaltungen ersetzen, bietet aber eine hervorragende Grundlage um mit dem äußerst interessanten Bauteil LM-358 zu experimentieren und Schaltungen mit geeigneten Bauteilwerten zu entwickeln.

### Programmfunktionen

Die meisten Funktionen des Programms sind selbsterklärend.

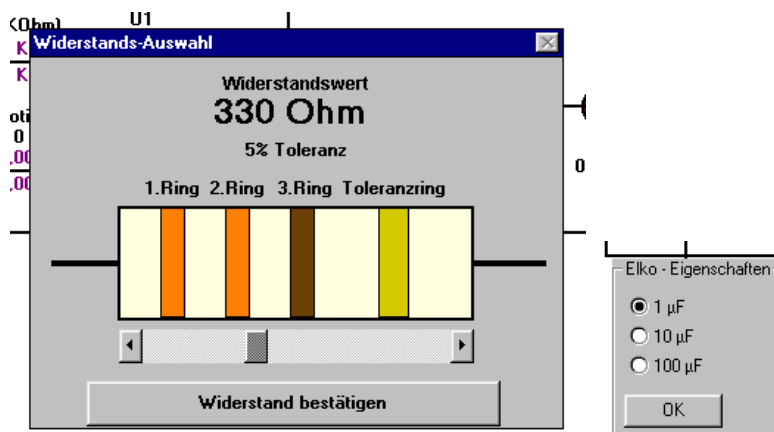
Die Betriebsspannung und die Eingangsspannungen können an Schieberegler in weiten Bereichen eingestellt werden. Wenn sich dabei eine Spannungs- oder Stromanzeige rot färbt bedeutet dies einen kritischen Zustand. Durch Doppelklicken auf das betroffene Bauteil erfahren Sie mehr über den Grund der Warnanzeige.

Mit der rechten Maus-Taste können alle Widerstände, Kondensatoren und LED's angeklickt und verändert werden. Es erscheinen dann entsprechende Editor-Fenster mit den veränderbaren Parametern.

- Widerstände verändern

Mit diesem Editor können beliebige Widerstände aus der Widerstandsreihe E-12 (12 Werte/Dekade) ausgewählt werden.

Es stehen Widerstände von 1 Ohm bis 10 MOhm zur Verfügung und werden automatisch mit dem entsprechenden Farbcode angezeigt.



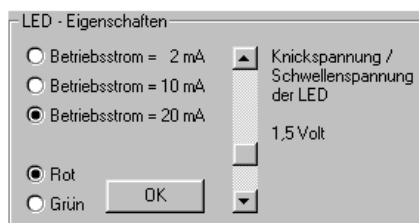
- Kondensatoren (Elko) verändern

Mit diesem kleinen Editor kann ein Elko von 1µF, 10µF oder 100µF ausgewählt werden. Kleinere Werte machen bei diesem Programm keinen Sinn, da die resultierenden Frequenzen zu hoch werden und dadurch optisch nicht mehr darstellbar sind.

- LED-Eigenschaften verändern

Mit diesem Editor können verschiedene Parameter der LED verändert werden. In Klammern sind die Standardwerte angegeben.

- Farbe (rot)  
rot oder grün
- Betriebsstrom (20mA)  
Nennstrom, bei welchem die LED mit Nennleuchtstärke leuchtet.  
Standard-LED erreicht bei ca. 20mA 0,6mcd – 3mcd  
Superhelle LED erreicht bei ca. 10mA 6mcd - 30mcd  
Niederstrom-LED erreicht bei ca. 2mA 2mcd - 6mcd
- Knickspannung/Schwellenspannung (1,5Volt)  
Sie kann im Bereich von 1,0 Volt bis 4,0 Volt eingestellt werden.



## Menüpunkte

- **Datei\_Drucken**

Hiermit können Sie den aktuellen Schaltplan z.B. zur Erstellung von Arbeitsblättern ausdrucken. Wenn Sie einen Schwarz/Weiß-Drucker verwenden, empfiehlt es sich, vorher die Hintergrundfarbe des Bildschirms auf weiß umzustellen (siehe Optionen\_Hintergrundfarbe weiß).

- **Datei\_Lizenzieren**

Wenn Sie das Programm bisher als DEMO-Version betrieben haben können Sie das Programm über diesen Menüpunkt durch Eingabe der Lizenzdaten zur Vollversion lizenzieren.

- **Datei\_Beenden**

Hier beenden Sie das Programm. Die Einstellungen der einzelnen Schaltungen werden nicht gespeichert.

- **Optionen\_Hintergrundfarbe grau**

Für den normalen Betrieb des Programms sollte die augenschonende Hintergrundfarbe grau gewählt werden.

- **Optionen\_Hintergrundfarbe weiß**

Wenn Sie screenshots für Arbeitsblätter in die Zwischenablage kopieren möchten um sie in Text-Dokumente einzubinden können Sie die Hintergrundfarbe weiß wählen. Dadurch werden spätere Ausdrücke mit B/W-Druckern bedeutend besser lesbar.

- Hilfe

Die Hilfe enthält Informationen über die wichtigsten Programmfunktionen. Wenn bestimmte Textanzeigen während des Programmablaufs rot unterlegt sind, kann durch Doppelklicken auf den entsprechenden Text die kontextorientierte Hilfe aufgerufen werden.

- Anzeige der Lizenzdaten

Die Lizenzdaten werden oben rechts im Menü angezeigt und sollten bei Inanspruchnahme der Hotline zur Verfügung stehen.

- Thema\_LED und Vorwiderstand

The screenshot shows a software window titled "Ellmitron OP-Workshop PC Version 2001.1 - [Berechnen des Vorwiderstandes für eine LED]". The interface includes a menu bar (Datei, Thema, Optionen, Info, Hilfe) and a status bar (DEMO-Version). The main area displays a circuit diagram on the left and calculation steps on the right.

**Circuit Diagram:** A series circuit is shown. At the top, a voltage source  $+U_b$  is set to 9.0 Volt. A resistor  $R_1$  with a value of 390 Ohm is connected in series. The voltage across the resistor is labeled  $U_1$ . Below the resistor, the voltage is marked as 1.5 Volt. An LED is connected in series at the bottom, with a current of 19.2 mA flowing through it. The voltage across the LED is labeled  $U_2$ . The bottom terminal is labeled  $-U_b$  and 0 Volt.

**Calculation Steps:**

**Warum braucht man einen Vorwiderstand für eine LED?**  
 Wenn die Spannung an einer LED die typische Schwellenspannung (Knickspannung) erreicht, steigt der Stromfluss durch die LED sprunghaft so stark an, dass er die LED zerstören würde. Daher wird der LED ein Vorwiderstand vorgeschaltet, der den Strom begrenzt. Er sollte so gewählt werden, dass die LED hell leuchten kann aber nicht überlastet wird. Am optimalsten ist es, den Vorwiderstand so zu wählen, dass der Nennstrom der LED erreicht wird.

**Wie berechnet man die Spannung  $U_1$ ?**  
 $U_1 = U_b$  [Betriebsspannung] -  $U_2$  [Spannung an der LED]  
 $U_1 = 9,0 \text{ Volt} - 1,5 \text{ Volt} = 7,5 \text{ Volt}$

**Wie berechnet man den Stromfluß durch die LED?**  
 Bitte experimentieren Sie mit verschiedenen Vorwiderständen und Betriebsspannungen!

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{7,5 \text{ Volt}}{390 \text{ Ohm}} = 0,0192 \text{ A} = 19,2 \text{ mA}$$

**Wie berechnet man den Vorwiderstand für einen gewünschten Stromfluß?**  
 In dieser Rechnung wird für  $I$  der Nennstrom der gewählten LED eingesetzt! Bitte experimentieren Sie mit verschiedenen LED-Einstellungen. (mit rechter Maustaste auf die LED klicken)

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{7,5 \text{ Volt}}{20,0 \text{ mA}} = \frac{7,5 \text{ Volt}}{0,0200 \text{ A}} = 375,0 \text{ Ohm}$$

In diesem Thema geht es hauptsächlich um die Berechnung des Vorwiderstands für eine LED. Da diese von der Betriebsspannung und von den Kennwerten (Nennstrom und Schwellen- bzw. Knickspannung) der LED abhängig ist und ein falscher Vorwiderstand im schlimmsten Fall zur Zerstörung von Bauteilen oder zumindest zu Fehlfunktionen führen kann ist auf dieses Thema besonderes Gewicht zu legen.

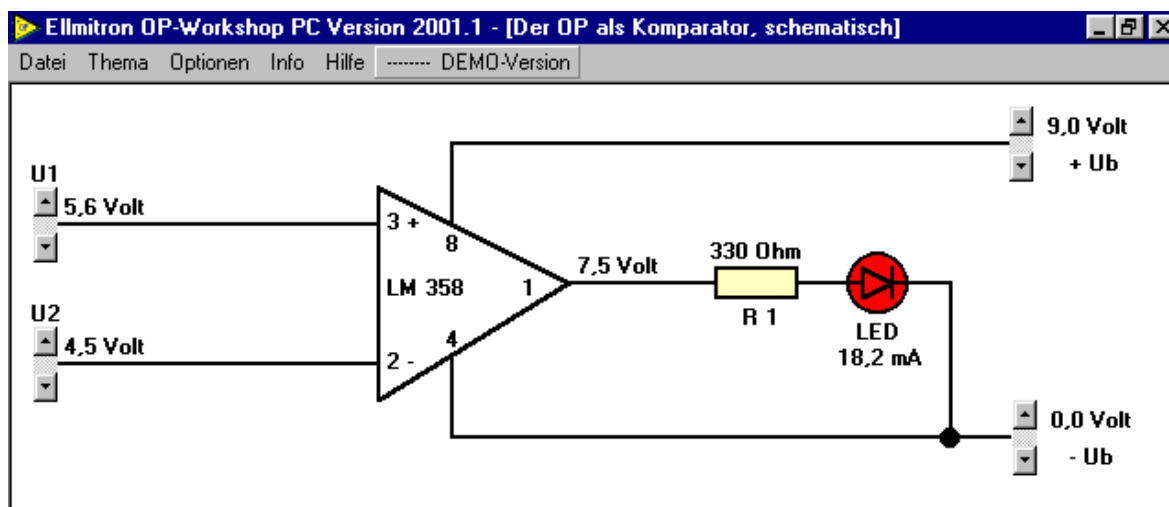
Die Betriebsspannung, der Vorwiderstand und die LED-Werte können hier verändert werden. Entsprechend ändern sich auch alle betroffenen Werte in den Formeln, sodass man sofort die Auswirkungen auf das Ergebnis sieht. Die Anzeigen lassen sich durch Klicken auf die Überschriften ausblenden. So können zunächst eigene Berechnungen angestellt werden und die Anzeige nur zur Kontrolle eingesetzt werden.

Bitte beachten Sie, dass der Ausgang des OP's maximal ( $+U_b - 1,5 \text{ Volt}$ ) beträgt. Er kann aufgrund seines inneren Aufbaus nicht ganz nach  $+U_b$  schalten. Dies muss man bei der Berechnung von Vorwiderständen in OP-Schaltungen berücksichtigen.

Die Schwellen- oder Knickspannung einer LED kann man ermitteln, indem man sie mit einem  $1\text{K}\Omega$  Vorwiderstand an einer  $9 \text{ Volt}$  Spannungsquelle anschließt und die Spannung an der LED misst. Je nach Leuchtfarbe ergeben sich unterschiedliche Werte zwischen  $1,5 \text{ Volt}$  und  $4 \text{ Volt}$ . In unseren Schaltungen verwenden wir eine Knickspannung von  $1,5 \text{ Volt}$ .

- **Thema\_Komparator, schematisch**

Die folgende Darstellung ist der Einfachheit halber schematisch. So kann die Wirkungsweise des OP's am besten verdeutlicht werden.



*Verändern Sie die Eingangsspannungen und beobachten Sie, wie der OP reagiert. Wie verhält sich das Schaltverhalten wenn Sie die Betriebsspannung verändern?*

Ein Komparator ist ein Vergleicher. Hier werden die beiden Eingangsspannungen  $U_1$  und  $U_2$  miteinander verglichen. Ist die Spannung am  $+E$ ingang ( $U_1$ ) größer als die Spannung am  $-E$ ingang ( $U_2$ ) schaltet der OP nach ( $+U_b - 1,5 \text{ Volt}$ ). Der absolute Wert der Eingangsspannungen ist dabei nicht entscheidend.

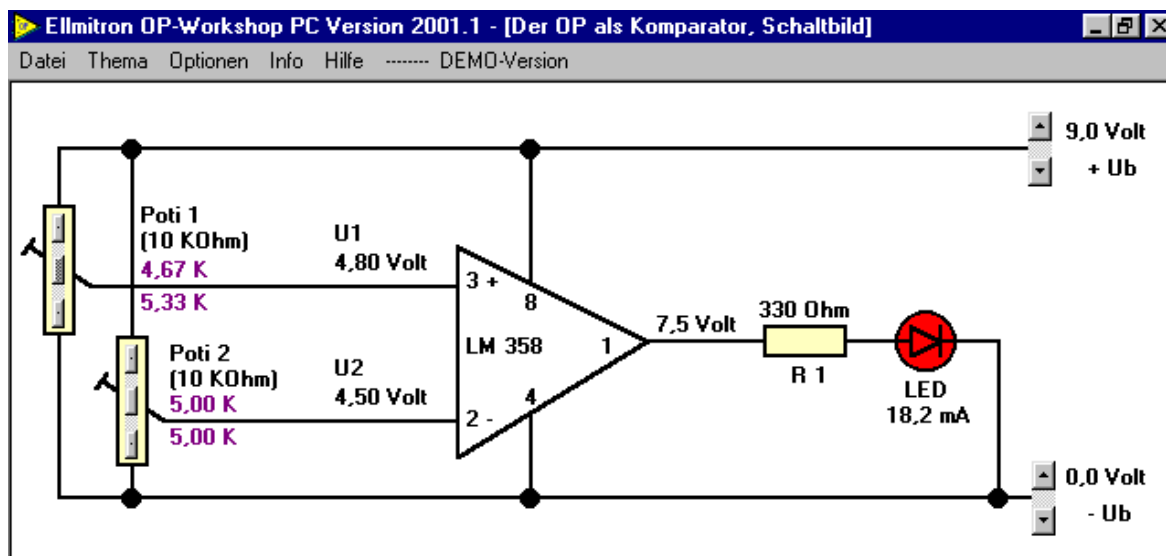
Die Eingangsspannung sollte dabei zwischen  $-U_b$  und ( $+U_b - 1,5 \text{ Volt}$ ) liegen. Wenn sich die Eingangsspannungen im Bereich von ( $+U_b - 1,5\text{V}$ ) und  $+U_b$  befinden ist die entsprechende Spannungsanzeige rot unterlegt weil der optimale Eingangsspannungsbereich verlassen ist. Der OP funktioniert zwar auch mit Eingangsspannungen bis  $+U_b$ , jedoch nicht absolut zuverlässig. Zumindest sollte in einer Komparatorschaltung eine der beiden Eingangsspannungen unter ( $+U_b - 1,5\text{V}$ ) liegen.

Diese Schaltung wird überall dort eingesetzt wo zwei Spannungen miteinander verglichen werden müssen und das Ergebnis angezeigt werden soll. Hierzu gibt es verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten:

- Ein festeingestellter Sollwert wird mit einem variablen Istwert verglichen (Sensortaster, Thermoschalter, Lichtschranke, Batterietester, Zeitschalter...)
- Zwei variable Sensoren werden verglichen

- **Thema\_Koparator, Schaltbild**

Bei der folgenden Schaltung erzeugen wir die Eingangsspannungen mit Potentiometern, die als Spannungsteiler zwischen  $+U_b$  und  $-U_b$  geschaltet sind.



Verändern Sie auch hier die Werte und beobachten Sie die Auswirkungen auf die Schaltung. Versuchen Sie, die Poti-Einstellungen zu berechnen, um eine bestimmte Eingangsspannung zu erzielen. Z.B. Wie muss Poti 1 eingestellt sein, damit sich für U1 die Spannung 6 Volt ergibt?

Diese Schaltung lässt sich leicht mit dem OP-Workshop (10-351 oder 10-355) von Ellmitron nachbauen.

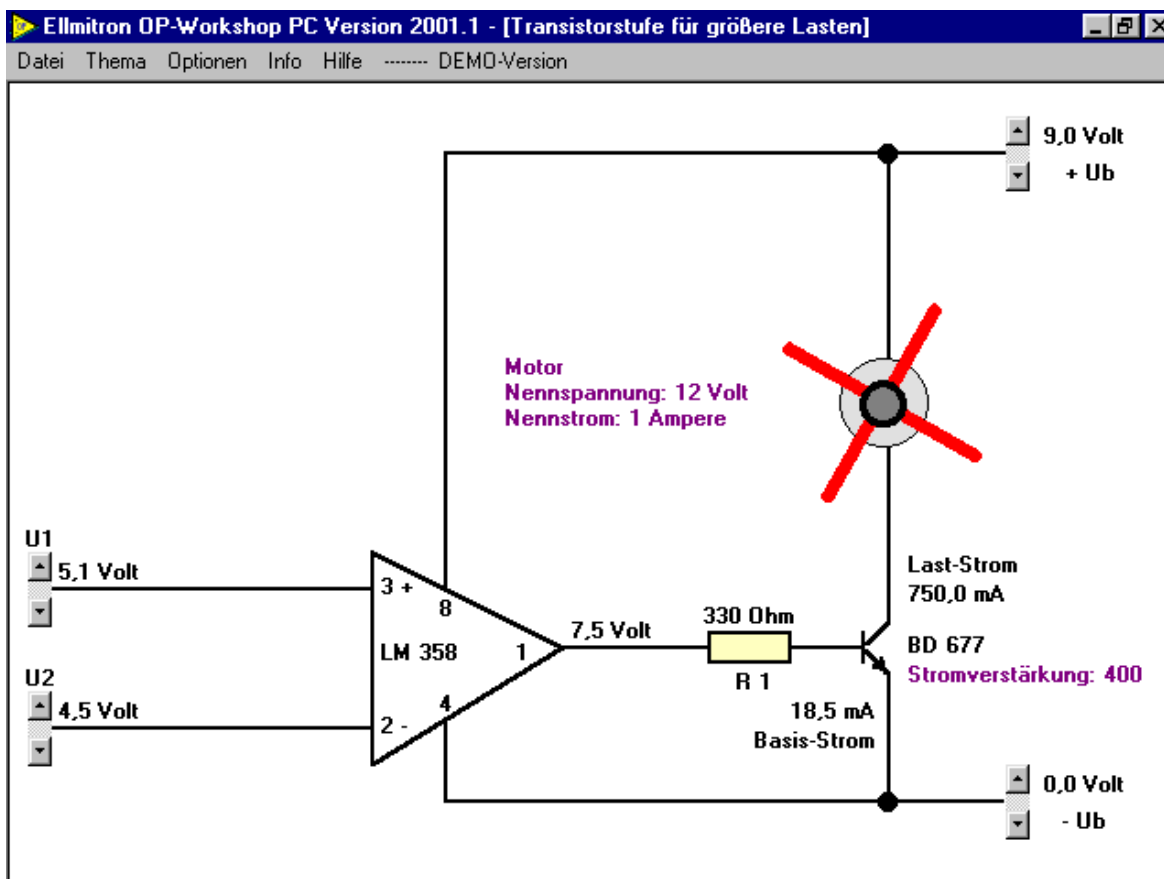
Wenn sich die Eingangsspannungen im Bereich von  $(+U_b - 1,5V)$  und  $+U_b$  befinden ist die entsprechende Spannungsanzeige rot unterlegt weil die Eingangsspannungen mindestens 1,5 Volt unter  $+U_b$  liegen sollten. Der OP funktioniert zwar auch mit Eingangsspannungen bis  $+U_b$ , jedoch nicht absolut zuverlässig. Zumindest sollte in einer Komparatorschaltung eine der beiden Eingangsspannungen unter  $(+U_b - 1,5V)$  liegen.

- **Thema\_Transistorstufe**

Meistens bleibt es bei praktischen Anwendungsschaltungen nicht nur beim Anzeigen eines Schaltzustandes sondern man möchte eine Last (Motor, Lampe, Kühlung oder Heizung etc.) schalten. Da der Ausgangsstrom eines OP's maximal 20mA beträgt, kann er die zu schaltende Last nicht direkt ansteuern. Zu diesem Zweck wird dem OP eine Transistorstufe nachgeschaltet. Sehr gut eignet sich hier der Darlington-Transistor BD-677. Er hat eine hohe Stromverstärkung und kann Lasten bis 1 Ampere zuverlässig schalten. In der folgenden Schaltung wird ein kleiner Lüfter angesteuert.

Verändern Sie auch hier die Werte und beobachten Sie die Auswirkungen auf die Schaltung. Wie groß darf der Basiswiderstand höchstens sein damit der Transistor (BD-677) noch sicher durchschaltet? Wo liegt ein Nachteil dieser Schaltung?





Beachten Sie bei der Dimensionierung des Basiswiderstands die Knickspannung des Transistors und die Stromverstärkung. Ein Darlington-Transistor hat eine Knickspannung von ca. 1,4 Volt und ein normaler Transistor (wie z.B. BC 548) eine Knickspannung von ca. 0,7 Volt. Die Spannung, die am Basis-Widerstand abfällt, beträgt also in obiger Abb.  $7,5 \text{ Volt} - 1,4 \text{ Volt} = \underline{6,1 \text{ Volt}}$

Somit beträgt der Basisstrom  $6,1 \text{ Volt} : 330 \text{ Ohm} = 0,01848 \text{ Ampere} = \underline{18,5 \text{ mA}}$

Die Stromverstärkung des BD-677 ist in unserer Schaltung auf 400-fach festgelegt. Dieser Wert kann angenommen werden wenn Lasten wie kleine Motoren, Lampen u.Ä. geschaltet werden. Er ist jedoch vom Laststrom abhängig und kann von Bauteil zu Bauteil variieren. Es ist daher ratsam, den Basiswiderstand so zu wählen, dass die Schaltfunktion auch schon bei geringerer Verstärkung erfüllt werden kann. Wenn der Transistor nicht ganz durchschalten kann erhöht sich dessen Verlustleistung unnötig. Verlustleistung ist die Leistungssumme, die im Transistor in Wärme umgewandelt wird. Je größer die Verlustleistung ist, desto mehr wird der Transistor belastet.

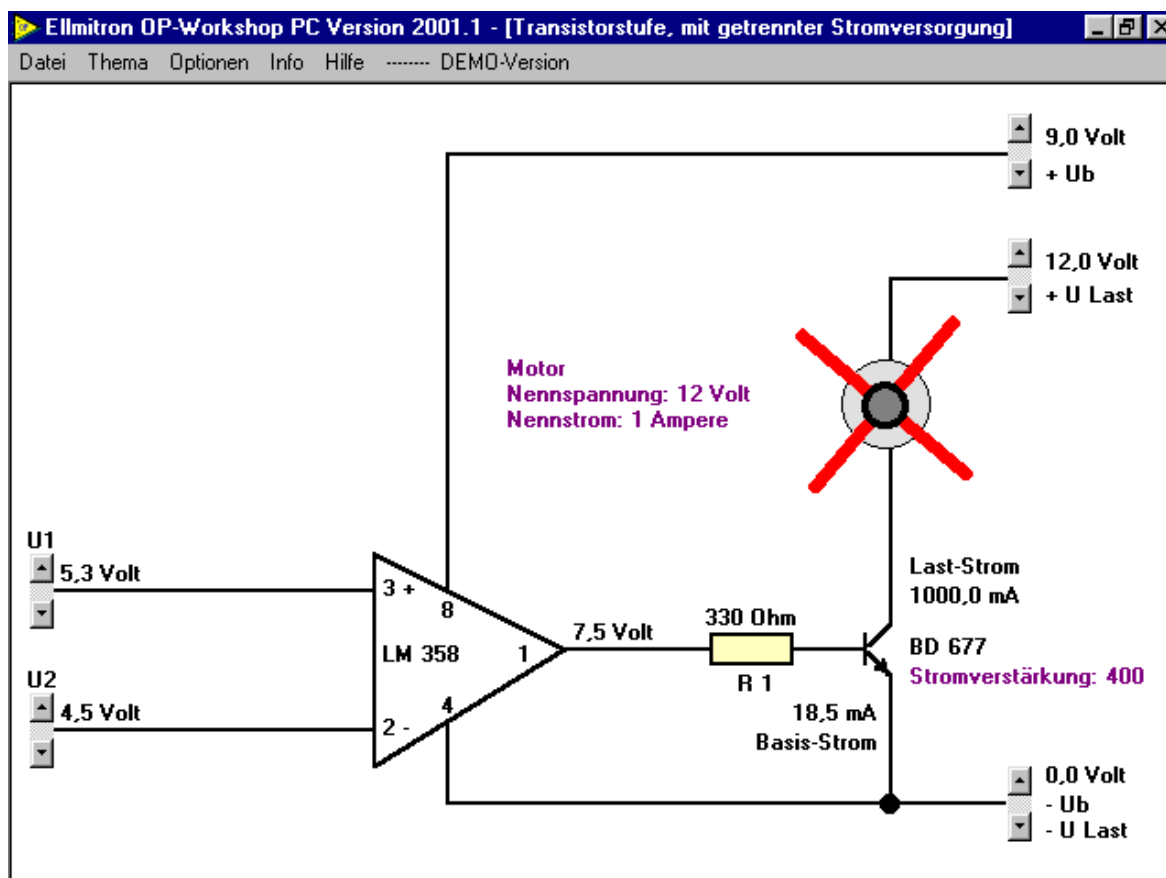
Ideal ist, wenn:  $\text{Basisstrom} * \text{Stromverstärkung} > \text{Laststrom}$

Wenn dieses Verhältnis nicht gegeben ist, wird ein großer Teil des Laststromes im Transistor in Wärme umgewandelt und kann das Bauteil zerstören oder verbraucht zumindest unnötige Energie. Wählen Sie daher einen geeigneten Basiswiderstand, so dass der Transistor immer ganz durchschalten kann.

Der Nachteil dieser Schaltung ist die gemeinsame Stromversorgung von Steuer und Lastkreis. Bei einer einfachen Schaltfunktion ist dies kein Problem, wenn jedoch winzige Spannungsunterschiede bereits die Schaltfunktion auslösen sollen und der Laststrom sehr hoch ist, kann das Einschalten der Last bei der Stromversorgung einen kleinen Spannungseinbruch bewirken, der wiederum zum Ausschalten der Last führen kann. Dadurch könnte die Spannung der Stromversorgung wieder ansteigen und was wiederum

zum Einschalten der Last führen würde usw. Die Schaltung würde ungewollt ins „Schwingen“ geraten und könnte nicht einwandfrei arbeiten. Aus diesem Grund verwendet man bei größeren Lasten möglichst eine getrennte Stromversorgung wie in unserer nächsten Schaltung.

- **Thema\_Transistorstufe, mit getrennter Stromversorgung**



*Wo liegen die Vorteile gegenüber einer gemeinsamen Stromversorgung von Steuer- und Lastkreis? Was muss man unbedingt beachten wenn man die Stromversorgung von Steuer- und Lastkreis trennt?*

Einen Vorteil haben wir bereits in der vorigen Schaltung angesprochen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass man hier die Spannung für den Lastkreis frei einstellen kann und nicht an die Grenzen des Operationsverstärkers gebunden ist. So kann die geschaltete Lastspannung durchaus auch 40 Volt und mehr (je nach verwendetem Transistor) betragen. Der Steuerkreis bleibt in jedem Fall unbeeinflusst von Spannungsänderungen im Lastkreis.

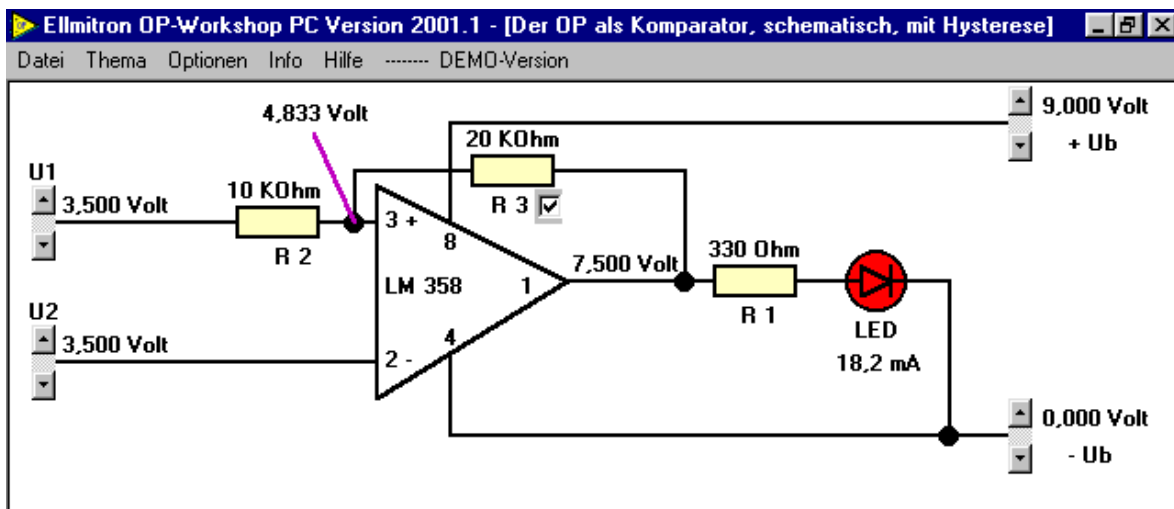
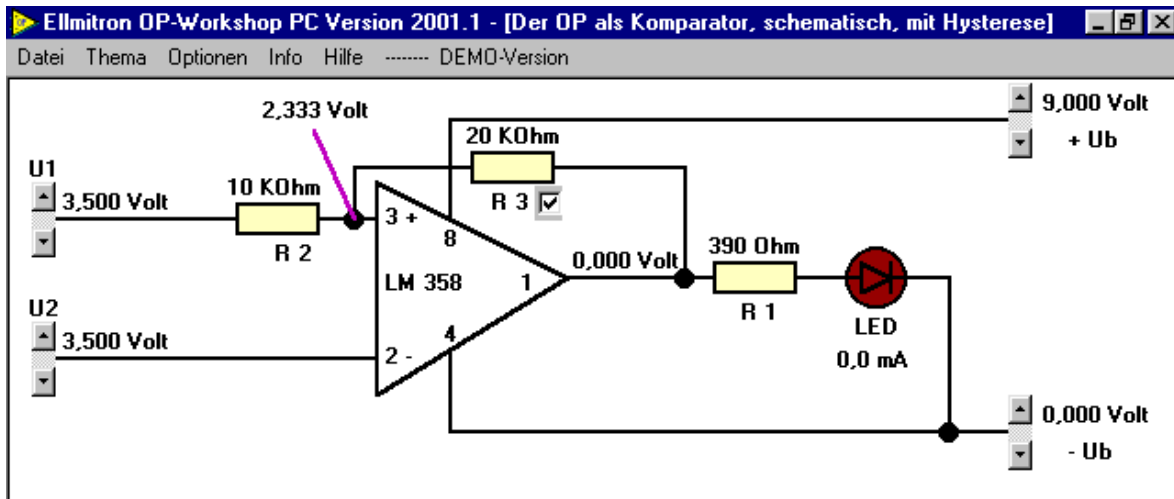
*Verringern Sie die Lastspannung und beobachten Sie die Drehzahländerung des geschalteten Motors. Die Werte am OP bleiben wie erwartet nicht beeinflusst.*

Bei getrennten Stromversorgungen muss man unbedingt darauf achten, dass die Massen miteinander verbunden sind. Wenn  $-U_b$  des Steuerkreises und  $-U_{Last}$  nicht miteinander verbunden sind, kann kein Laststrom fließen.

- Thema\_Komparator mit Hysterese

Um Schaltzustände zu stabilisieren und Schaltungen vor ungewolltem „Schwingen“ zu schützen oder um zwei Sollwerte zu definieren kann der Komparatorschaltung eine Hysterese hinzugefügt werden.

Vergleichen Sie die beiden folgenden Abbildungen. Was fällt Ihnen auf?



In beiden Abbildungen liegen die gleichen äußeren Bedingungen vor, der Ausgang ist jedoch einmal nach 0 Volt und einmal nach +7,5 Volt geschaltet. Der Grund hierfür ist die durch den Widerstand R 3 hinzugefügte Rückkopplung der Ausgangsspannung auf den +Eingang.

Durch eine Rückkopplung des Ausgangs auf den +Eingang wird beim Schalten des Ausgangs nach +Ub eine Anhebung und beim Schalten nach -Ub eine Absenkung des Schwellwertes (Spannung am +Eingang) bewirkt.

Die dadurch entstehende Differenz zwischen Ein- und Ausschaltpunkt (Hysterese) ist vom Grad der Rückkopplung abhängig. Ohne Rückkopplung entspricht der Ein- und Ausschaltpunkt der eingestellten Spannung U 1.

Stellen Sie U 2 auf 3,5 Volt. Entfernen Sie R 3, indem Sie auf das Kontrollkästchen klicken und verändern Sie U 1. Beobachten Sie wann der OP schaltet. Stellen Sie nun U1

auf 2 Volt und fügen Sie den Widerstand R 3 (20 KOhm) wieder hinzu. Die Spannung am +Eingang fällt auf 1,333 Volt. Senken Sie nun die Spannung U 2 auf 1,3 Volt. Die Spannung am +Eingang steigt auf 3,833 Volt. Die Hysterese beträgt 2,5 Volt. Wiederholen Sie diesen Vorgang einmal mit folgenden Widerstandswerten (R 2 = 10 KOhm und R 3 = 200 KOhm) und einmal mit folgenden Widerstandswerten (R 2 = 15 KOhm und R 3 = 20 KOhm). Was hat sich jeweils verändert?

Es hat sich herausgestellt dass das Verhältnis zwischen R 2 und R 3 maßgeblich für die Hysterese ist. R 2 und R 3 bilden einen Spannungsteiler zwischen U 1 und dem Ausgang des OP. Wird R 2 größer oder R 3 kleiner, dann wird der Einfluss des Ausgangs auf den Eingang größer (Hysterese wird größer). Wird R 2 kleiner oder R 3 größer, so wird die Hysterese kleiner.

Die Hysterese berechnet sich wie folgt:

$$\text{Hysterese} = (\text{Ausgangsspannungshub} * R 2) : (R 2 + R 3)$$

Der Ausgangsspannungshub ist die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Ausgangsspannung des OP (hier 7,5 Volt)

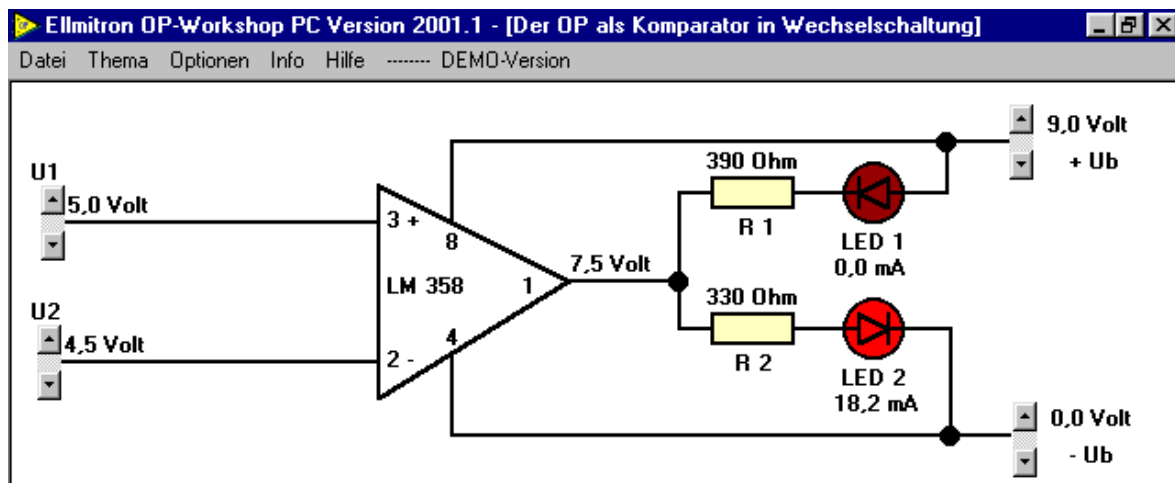
Für unser Beispiel oben ergibt sich:

$$\text{Hysterese} = (7,5 \text{ Volt} * 10.000 \text{ Ohm}) : (10.000 \text{ Ohm} + 20.000 \text{ Ohm}) = 2,5 \text{ Volt}$$

Berechnen Sie geeignete Widerstandswerte für eine Hysterese von 1 Volt.

- **Thema\_Komparator mit zwei LED's in Wechselschaltung**

Die folgende Wechselschaltung ermöglicht die Anzeige von beiden Schaltzuständen. Wenn der OP nach + schaltet wechselt die Anzeige dabei von LED 2 zu LED 1.



Warum können mit dieser Schaltung beide Schaltzustände angezeigt werden? Warum sind die Vorwiderstände der LED's nicht gleich?

In dieser Schaltung ist LED 1 zwischen dem OP-Ausgang und +Ub angeschlossen und LED 2 zwischen dem OP-Ausgang und -Ub. Wenn der OP-Ausgang nun nach -Ub geschaltet ist kann nur ein Strom durch R 1 und LED 1 fließen, ist er nach (+Ub-1,5 Volt) geschaltet, so kann nur ein Strom durch R 2 und LED 2 fließen.

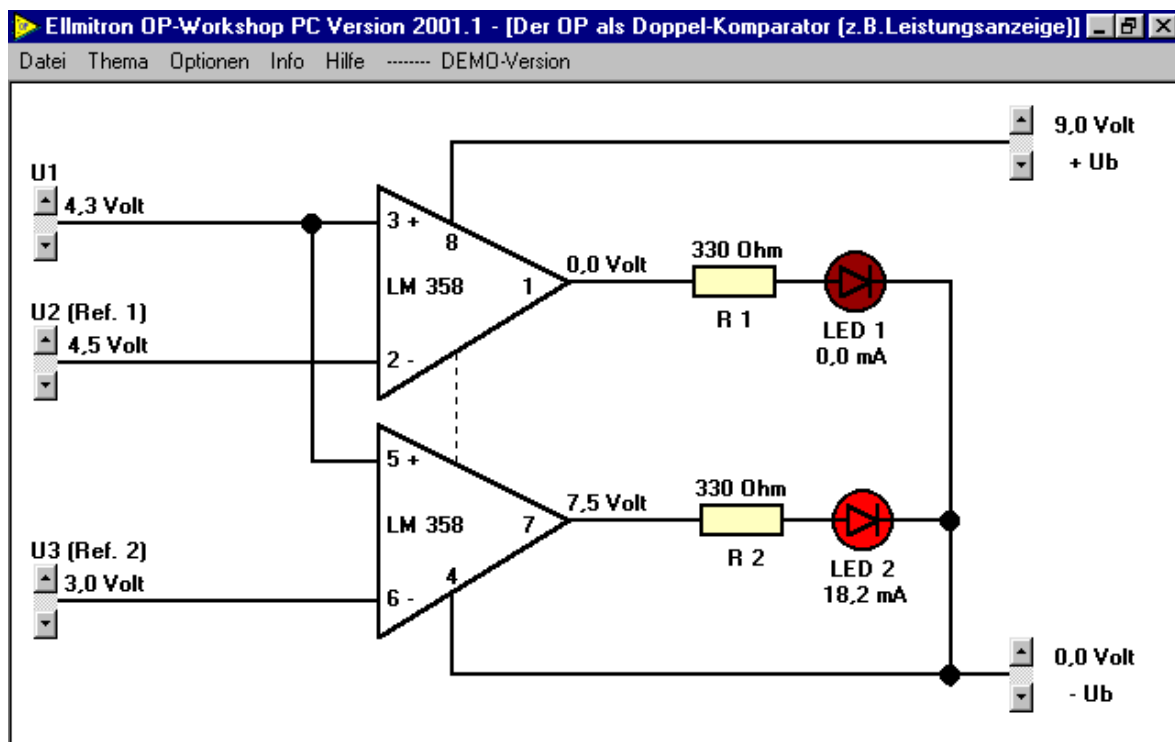
Die beiden unterschiedlichen Vorwiderstände kommen dadurch zustande, dass einmal nur 7,5 Volt an R 2 und LED 2 anstehen (wenn der OP nach (+Ub – 1,5 Volt) geschaltet ist) und einmal 9,0 Volt an R 1 und LED 1 (wenn der OP nach -Ub geschaltet ist).

Die Spannung, die jeweils am Widerstand abfällt ist um die Knickspannung der LED niedriger. In unserem Beispiel würden an R 1  $9,0 \text{ Volt} - 1,5 \text{ Volt} = 7,5 \text{ Volt}$  abfallen und an R 2  $7,5 \text{ Volt} - 1,5 \text{ Volt} = 6,0 \text{ Volt}$ . Würde man gleiche Vorwiderstände verwenden, könnte dies in unterschiedlicher Helligkeit der LED's resultieren.

Besonders träte dieser Effekt bei niedrigen Betriebsspannungen auf. Z.B. Bei einer Betriebsspannung von  $4,5 \text{ Volt}$  würde an R 1  $3,0 \text{ Volt}$  abfallen und an R 2  $1,5 \text{ Volt}$ . D.h. bei gleichen Widerstandswerten würde durch LED 1 ein doppelt so hoher Strom fließen als durch LED 2.

- **Thema\_Komparator mit zwei OP's (Leistungsanzeige)**

Im folgenden Thema sollen zum ersten mal beide im LM-358 enthaltenen Operationsverstärker zum Einsatz kommen. Es ist im Prinzip eine doppelte Komparatorschaltung.



*Erhöhen Sie langsam die Spannung U 1 und beobachten Sie, wie sich die Schaltung verhält. Wozu wäre eine solche Schaltung geeignet? Was bieten sich damit für weitere Möglichkeiten?*

Wenn Sie die Spannung U 1 erhöhen, wird zunächst LED 2 und dann LED 1 einschalten. Der Grund ist, dass wir mit U 2 und U 3 zwei Schwellwerte an den jeweiligen -Eingängen vorgegeben haben. Beide +Eingänge der Operationsverstärker erhalten jedoch die gleiche Spannung U 1. Wird diese erhöht, so wird zunächst der Schwellwert U 3 und dann der Schwellwert U 2 erreicht und der jeweilige OP schaltet nach ( $+U_b - 1,5 \text{ Volt}$ ).

*Stellen Sie für U 1 eine Spannung von 0 Volt, für U 3 ein Spannung von 4,5 Volt und für U 2 eine Spannung von 3,0 Volt ein. Erhöhen Sie wieder langsam die Spannung U 1 und beobachten Sie, wie sich die Schaltung nun verhält.*

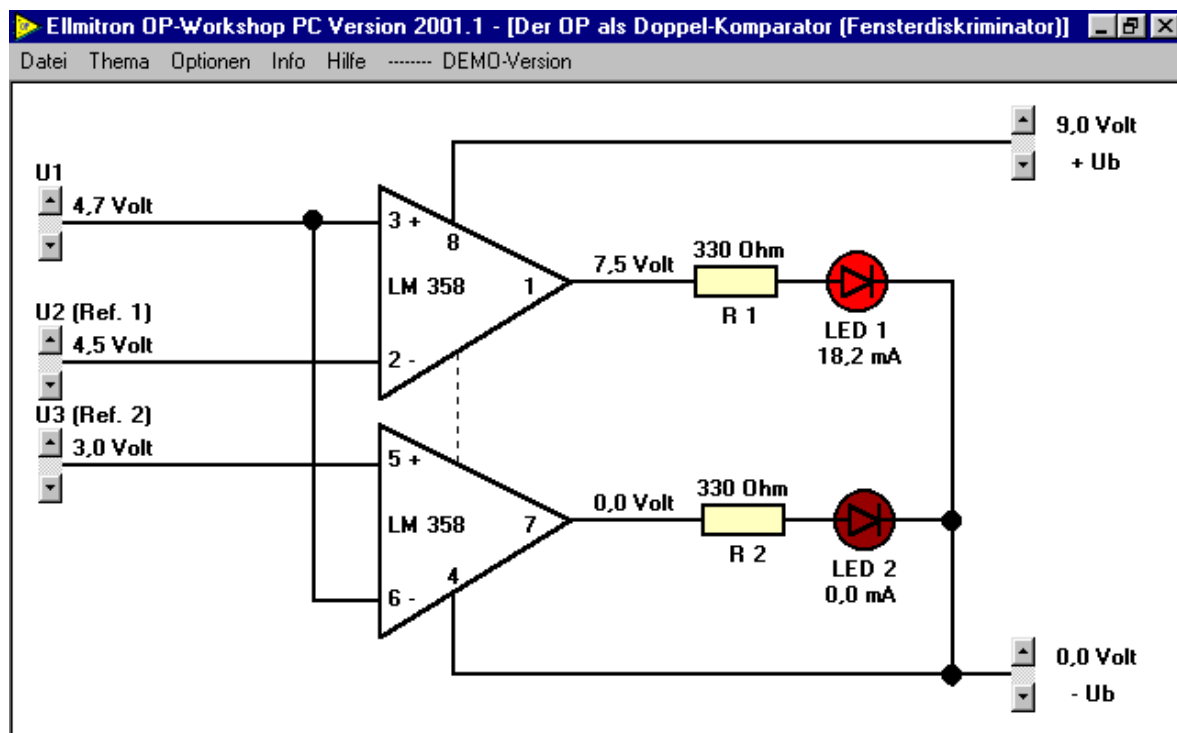
Wenn Sie die Spannung U 1 erhöhen, wird zunächst LED 1 und dann LED 2 einschalten. Der Grund ist, dass nun zunächst der Schwellwert U 2 erreicht wird und erst dann der Schwellwert U 3.

Eine solche Schaltung wird hauptsächlich zur visuellen Überwachung von veränderbaren Werten eingesetzt, z.B. Pegelanzeige bei einem Kassettenrecorder u.ä..

So unkompliziert es war, den zweiten OP einer normalen Komparatorschaltung hinzuzufügen, so unkompliziert ist es auch weitere OP's hinzuzufügen. Um z.B. eine Pegelanzeige zu realisieren, könnten Sie 12 Operationsverstärker (6 \* LM-358) nach obige Schaltung miteinander verbinden. Wenn die Schwellwerte in geeigneter Weise abgestuft werden, und U 1 auf alle 12 +Eingänge geschaltet ist, würden nacheinander die 12 LED's eingeschaltet werden. Durch entsprechende farbliche Gestaltung kann auch auf kritische Werte hingewiesen werden (z.B. die ersten neun LED's grün und die drei letzten LED's rot). Einsatzgebiete neben einer Pegelanzeige könnten sein: Thermometer (jede LED entspricht einer bestimmten Temperatur), Feuchtigkeitsmelder oder Blumengießanzeige (zu trocken, optimal, zu feucht) u.s.w..

- **Thema\_Komparator mit zwei OP's (Fensterdiskriminator)**

Im folgenden Thema wird nur eine kleine Veränderung gegenüber der vorherigen Schaltung vorgenommen.



*Erhöhen Sie langsam die Spannung U 1 und beobachten Sie, wie sich die Schaltung verhält. Wozu wäre eine solche Schaltung geeignet?*

Zunächst leuchtet LED 2. Wenn Sie die Spannung U 1 erhöhen, wird zunächst LED 2 ausschalten und später LED 1 einschalten. Der Grund ist, dass wir hier U 3 auf den +Eingang des zweiten OP's geben und seinen –Eingang mit U 1 verbinden. Mit dieser Schaltung lassen sich drei Zustände darstellen.

- Istwert ist kleiner als der untere Schwellwert (U 3) – LED 2 leuchtet
- Istwert liegt zwischen dem unteren und dem oberen Schwellwert – Keine LED leuchtet
- Istwert ist größer als der obere Schwellwert (U 2) – LED 1 leuchtet

Die Schaltung ist also optimal dafür geeignet darzustellen, ob ein Istwert (Sensorspannung, Messspannung o.ä.) zu klein, richtig oder zu groß ist. Eine solche

Schaltung nennt man Fensterdiskriminator. Das Fenster ist dabei der gewünschte Bereich oder der Bereich zwischen Schwellwert 1 und Schwellwert 2. Die Fensterbreite entspricht der Differenz von  $U_2 - U_3$ .

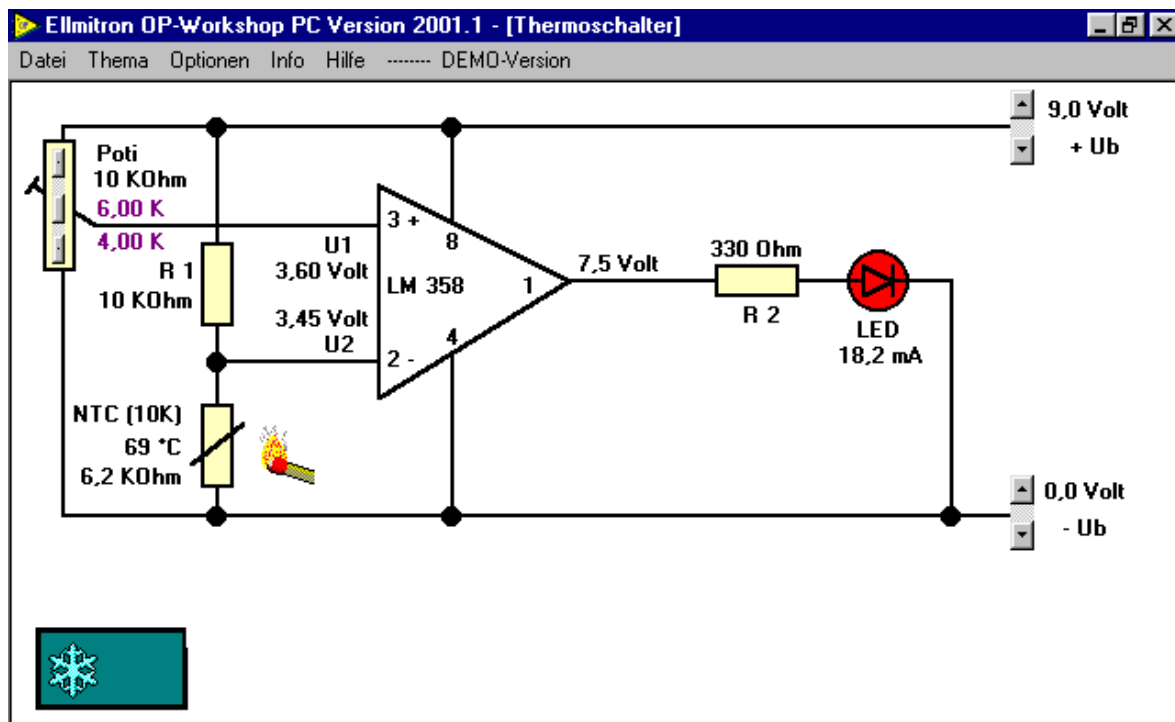
Ein Fensterdiskriminator wird z.B. in Fotoapparaten zur Belichtungsanzeige (unterbelichtet, optimal, überbelichtet) eingesetzt.

Eine andere Anwendung wäre eine Temperaturregelung. So könnte bei Übertemperatur eine Kühlung und bei Untertemperatur eine Heizung eingeschaltet werden.

Zur Ausrichtung von Solarzellen würde sich die Schaltung ebenfalls eignen. Rechtsdrehung wenn Sonne von links, Linksdrehung wenn Sonne von rechts, keine Bewegung wenn Sonne von vorne.

- **Thema\_Thermoschalter**

Mit dem Thermoschalter bauen wir eine richtige gebrauchsfertige Schaltung auf. Der Sollwert (Temperatur) wird hier mit dem Poti eingestellt. Den NTC, der sich in einem Spannungsteiler mit R 1 befindet und den Istwert am –Eingang vom OP liefert, kann man mit dem Streichholz (Heißluftgebläse) erwärmen oder mit dem Eiskristall (Kältespray) kühlen. Klicken Sie dazu einfach das Symbol an und ziehen Sie es in die Nähe des NTC's. Je näher es ihm kommt, desto schneller erfolgt die Temperaturänderung. Die Temperatur wird in °C angezeigt .



Erwärmen Sie den NTC und beobachten Sie, wie sich die Schaltung verhält. Versuchen Sie, die Schaltschwelle für eine bestimmte Temperatur zu berechnen. Die Widerstandswerte des NTC's bei verschiedenen Temperaturen können Sie sich über den Menüpunkt Info\_NTC-Wertetabelle anzeigen lassen. Wo läge der Nachteil dieser Schaltung, wenn man damit z.B. einen Kühlschrank steuern würde?

Zu Beginn liegt der Sollwert ( $U_1$ ) unter dem Istwert ( $U_2$ ). Der OP ist nach 0 Volt geschaltet. Erwärmt man nun den NTC, der mit R 1 einen Spannungsteiler bildet, sinkt der Istwert  $U_2$ . Sobald er unterhalb des Sollwertes liegt, schaltet der OP nach (+ $U_b - 1,5$  Volt).



Bei 50°C z.B. hat der NTC einen Widerstandswert von 7,273 KOhm oder 7273 Ohm. Damit der OP bei dieser Temperatur schaltet, berechnet man nun die Spannung U 2, die sich bei dieser Temperatur ergibt.

$$U_2 = ((+U_b - (-U_b)) * (NTC : (R_1 + NTC)))$$

$$U_2 = ((9 \text{ Volt} - 0 \text{ Volt}) * (7273 \text{ Ohm} : (10.000 \text{ Ohm} + 7.273 \text{ Ohm})))$$

$$U_2 = 9 \text{ Volt} * (7273 \text{ Ohm} : (10.000 \text{ Ohm} + 7273 \text{ Ohm}))$$

$$U_2 = 9 \text{ Volt} * (7273 \text{ Ohm} : 17273 \text{ Ohm})$$

$$U_2 = 9 \text{ Volt} * 0,421 = 3,790 \text{ Volt}$$

Wird diese Spannung als Sollwert (U 1) eingestellt, schaltet der OP bei 50°C ein, da U 2 bei 50°C genau diesen Wert ergibt.

Diese Schaltung würde sich z.B. eignen um einen Kühlungs-Lüfter einzuschalten wenn die Temperatur in einem elektrischen Gerät auf über 50°C steigt. Wird als Solltemperatur 2°C eingestellt, könnte man mit dieser Schaltung einen Kühlschrank steuern.

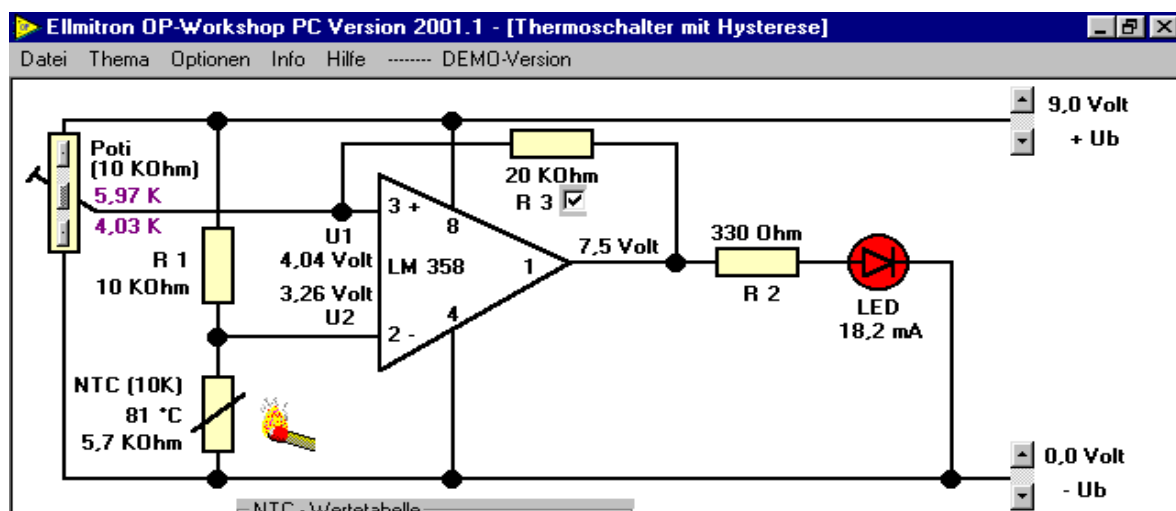
Für die Steuerung eines Kühlschranks wäre die Schaltung allerdings noch wenig geeignet, da sie den Kühlkompressor sofort nach Erreichen des Sollwertes wieder abschalten würde. Da nun die Temperatur wieder steigt und der Sollwert schnell wieder überschritten wird, würde die Schaltung wieder einschalten usw. Die Kühlung würde so viel zu oft hin- und herschalten, was für die Lebensdauer des Gerätes nicht gut wäre. Die Lösung zu diesem Problem finden Sie im nächsten Thema.

*Wie müsste man die Schaltung verändern, damit die Schaltfunktion umgekehrt ist.*

Möchte man eine umgekehrte Funktion erreichen, also das angeschlossene Gerät beim Erreichen des Sollwertes abschalten, so braucht man nur die Eingänge am OP zu vertauschen. Sollwert U 1 auf den –Eingang und Istwert (U 2 auf den +Eingang). Diese Schaltung findet man z.B. in einem Backofen (Sollwert 200°C – bei Erreichen des Sollwertes Heizung aus).

### • Thema\_Thermoschalter mit Hysterese

Die Hysterese haben wir bereits im Thema Komparator kennen gelernt. Hier wird sie als sinnvolle Schaltungsergänzung eingesetzt, um ein zu schnelles Hin- und Herschalten des Thermoschalters zu verhindern.





*Entfernen Sie R 3 durch Klicken auf das Kontrollfeld und beobachten Sie wie die Schaltung beim Erwärmen des NTC reagiert. Fügen Sie nun den Widerstand R 3 wieder hinzu beobachten Sie erneut die Schaltfunktion. Evtl. machen Sie sich zum Vergleich Notizen von den jeweils ermittelten Ein- und Ausschaltgrenzen und vergleichen diese.*

Ohne R 3 gibt es nur einen Schwellwert, der beim Überschreiten oder Unterschreiten sofort zu einer Schaltfunktion führt. Mit R 3 gibt es zwei Schwellwerte, einen Einschaltwellwert und einen Ausschaltwellwert. Die Differenz zwischen beiden Werten bezeichnet man als Hysterese.

Wenn die Schaltung für Geräte eingesetzt wird, gibt es zwei Kriterien für die Wahl der geeigneten Hysterese.

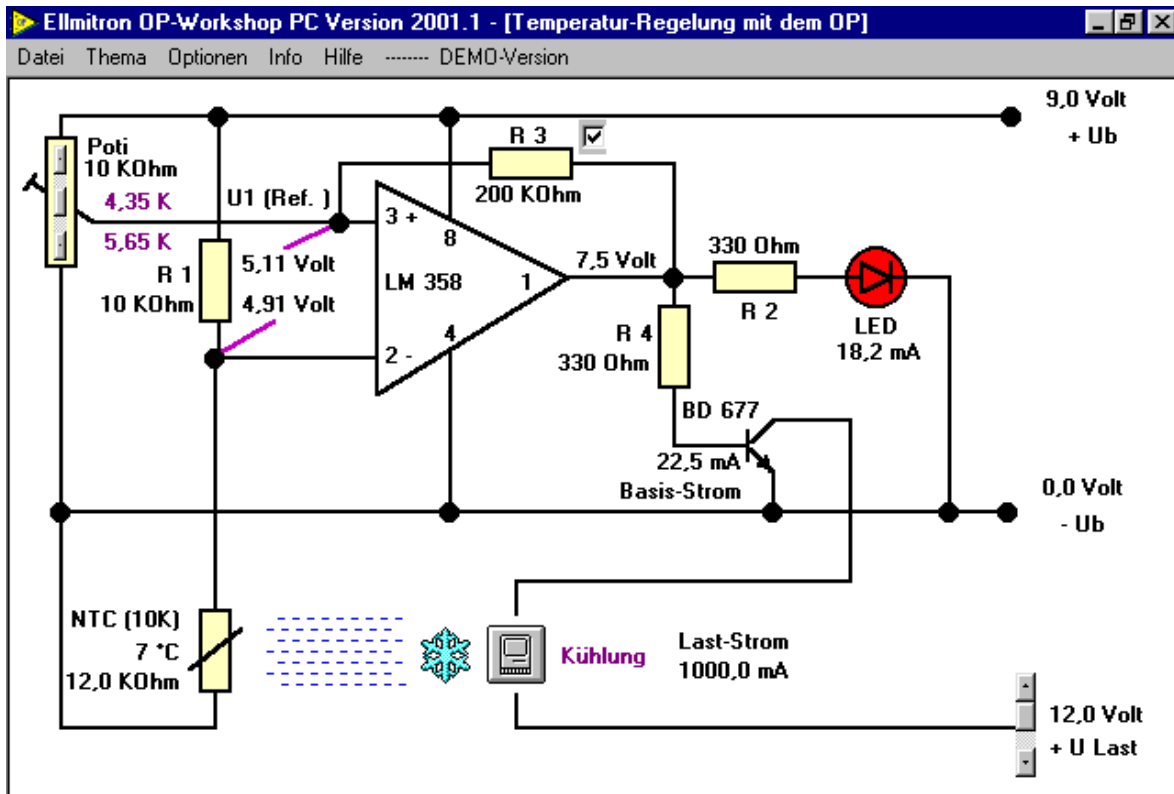
- Wie genau soll die gewünschte Temperatur eingehalten werden  
Je genauer die gewünschte Temperatur eingehalten werden soll, desto kleiner muss die Hysterese sein.  
Anwendungen: medizinische Geräte, chemische Reaktionssteuerung Oszillatoren usw.
- Wie oft darf das Kühlaggregat maximal pro Tag eingeschaltet werden.  
Wenn die Haltbarkeit des Aggregats wichtig ist, sollte es möglichst selten eingeschaltet werden. Daraus ergibt sich aber eine größere Ungenauigkeit der eingehaltenen Temperatur.  
Anwendungen: Haushaltsgeräte wie Kühlschrank, Backofen, Brauchwassererwärmung oder Zentralheizung.

Berechnungen zur Hysterese finden Sie unter dem Thema „Komparator mit Hysterese“.

- Thema\_Temperatur-Regelung mit dem OP

Im folgenden Thema haben wir eine fertige Kühlschrankssteuerung aufgebaut, an der Sie deutlich die Auswirkung der Hysterese auf das Schaltverhalten beobachten können. Mit U<sub>1</sub> ist ein Sollwert von 5,11 Volt vorgegeben, der einer gewünschten Temperatur von ca. 1°C entspricht. Die Hysterese ist so eingestellt, dass sich der Kühlschrank erst wieder auf 3°C erwärmen muss, bis das Aggregat wieder einschaltet. Damit der Vorgang langsamer abläuft, können Sie die Leistung des Aggregats mit +U Last reduzieren.

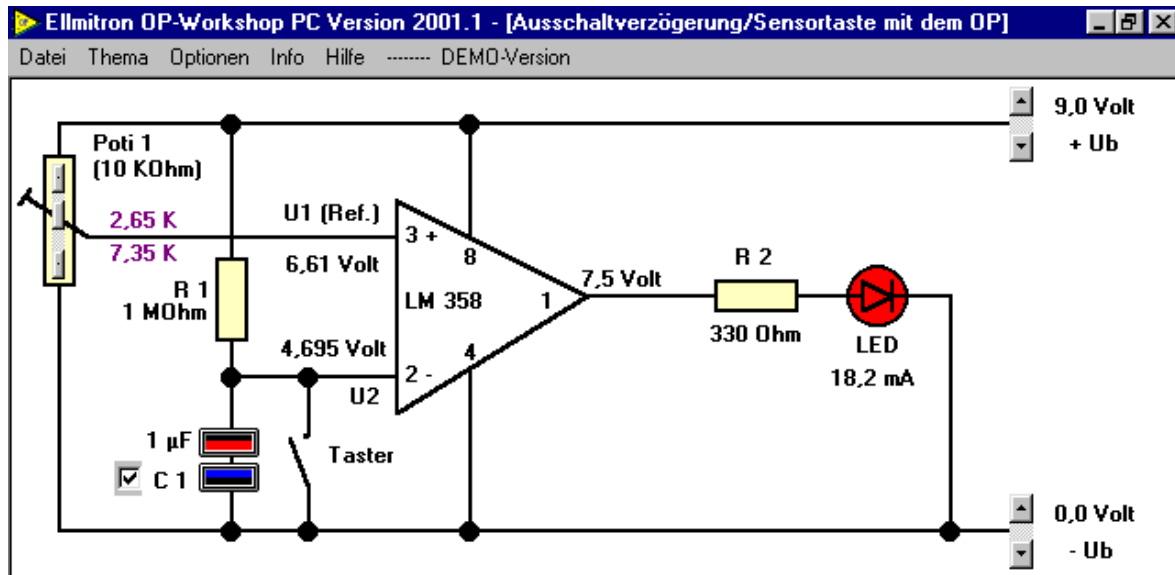
Versuchen Sie, die geeigneten Werte für eine Gefrierschrankssteuerung zu berechnen. Die Temperatur im Gefrierschrank soll zwischen -20°C und -18°C betragen.



- **Thema\_ Ausschaltverzögerung/Sensortaste**

In diesem Thema geht es um eine zeitabhängige Schaltung, die in vielen Geräten zu finden ist.

*Betätigen Sie kurz den Taster und beobachten Sie wie sich die Schaltung verhält.*



Durch den Tastendruck wird der Elko vollständig entladen und die Spannung U 2 sinkt auf 0 Volt. Da U 1 nun deutlich über U 2 liegt, ist der OP nach (+Ub – 1,5 Volt) geschaltet. Sobald der Taster losgelassen wird kann sich der Elko laden, worauf der OP wieder nach 0 Volt schaltet, sobald U 2 über dem Schwellwert U 1 liegt. Diese Schaltung wird Ausschaltverzögerung genannt. Sie wird überall eingesetzt, wo ein kurzes Ereignis einen längeren Prozess auslösen soll. Anwendungen hierfür wären z.B.: Automatischer Händetrockner, Automatische Treppenhausbeleuchtung usw..

*Tauschen Sie den Elko gegen einen höheren Wert (z.B. 10µF) aus. Was beobachten Sie?*

Der Vorgang läuft deutlich langsamer ab, da ein größerer Elko eine längere Ladezeit besitzt. Den gleichen Effekt könnte man auch erreichen indem man den Ladewiderstand R 1 auf 10 MOhm erhöht und den Elko bei 1µF belässt.

Um genau berechnen zu können, wie lange die Ausschaltverzögerung dauern soll, muss man folgendes wissen.

Ein Elko erreicht nach einer Dauer von  $R \cdot C$  etwa 2/3 der Ladespannung. Somit ist es am einfachsten, den Schwellwert U 1 auf 2/3 der Ladespannung (hier 6 Volt) einzustellen. Dann errechnet sich die Ladezeit nach  $R \cdot C$ , wobei R der Ladewiderstand ist.

In unserem Fall ergibt sich eine Ladezeit von  $1.000.000 \text{ Ohm} \cdot 0,000001 \text{ F} = 1 \text{ sec}$

*Versuchen Sie eine Ausschaltverzögerung von 12 Sekunden zu berechnen. Welche Möglichkeiten gibt es hierfür? Was muss man beachten?*

Nach obiger Formel sind verschiedene Kombinationen aus Ladewidertand und Elko möglich. (12 MOhm und 1 µF), (1,2 MOhm und 10 µF) oder (120 Ohm und 100.000 µF). Es gäbe noch viele weitere Möglichkeiten. Theoretisch haben diese Kombinationen jeweils die gleichen Auswirkungen, in der Praxis gibt es jedoch Grenzen, die man beachten sollte.

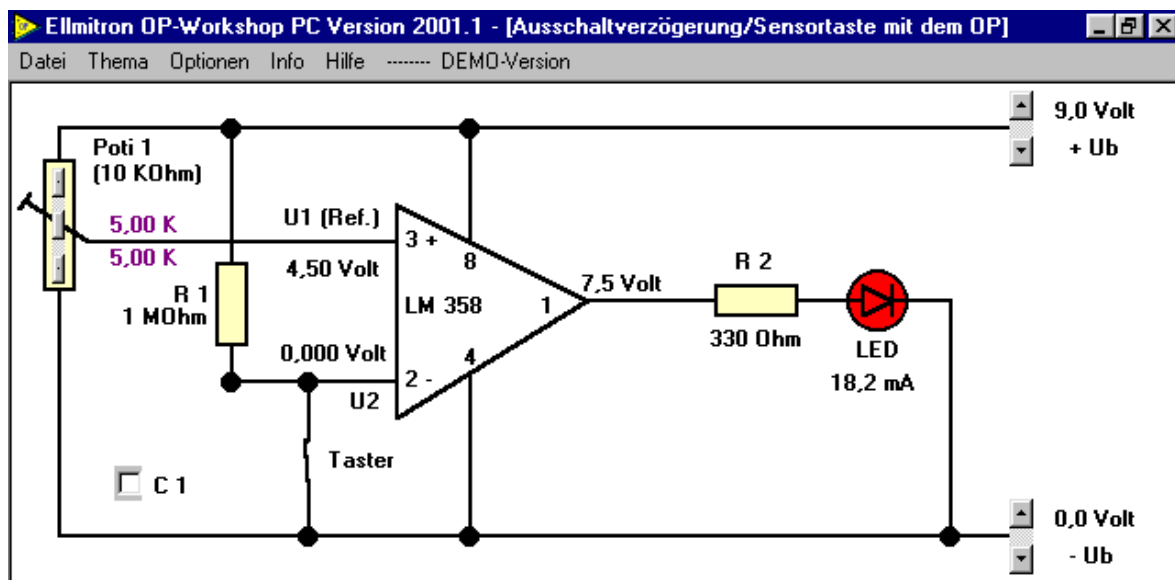
- Zu hoher Ladewiderstand ( $> 10 \text{ MOhm}$ )  
Je höher der Ladewiderstand, desto kleiner der Ladestrom. Ein Elko besitzt eine Selbstentladung, die auf Leckströme zurückzuführen ist. Über den Leckstrom wird ein Elko permanent in sehr geringem Umfang entladen. Diese Leckströme sind sehr gering und fallen gewöhnlich nicht ins Gewicht. Soll ein Elko aber mit einem extrem geringen Ladestrom (Ladewiderstand  $> 10 \text{ MOhm}$ ) geladen werden, muss der Leckstrom mit in die Berechnung einbezogen werden, was in der Regel kaum exakt möglich ist. Wenn der Leckstrom sogar größer als der Ladestrom ist, so kann der Elko überhaupt nicht geladen werden.
- Zu kleiner Ladewiderstand ( $< 1 \text{ KOhm}$ )  
Ein zu kleiner Ladewiderstand hat zwei negative Folgen. Erstens wird der OP-Ausgang durch den hohen Ladestrom zu stark belastet, zweitens könnten sich bereits bei Ladezeiten von 1 sec Elkowerte von über  $1000 \mu\text{F}$  ergeben. Diese Bauteile würden die Schaltung unnötig groß und teuer machen.
- Gute Werte für Ladewiderstände in OP-Schaltungen sind  $10 \text{ KOhm}$  bis  $2 \text{ MOhm}$  und Elko's bis zu  $1000 \mu\text{F}$ .

Wenn Sie in dieser Schaltung den +Eingang und den -Eingang vertauschen, entsteht eine Einschaltverzögerung.

Anwendung: Lautsprecherschutz in Verstärkern usw.

- **Thema\_ Ausschaltverzögerung/Sensortaste**

Entfernen Sie den Elko aus obiger Schaltung. Sie erhalten einen Sensorschalter. Was muss man bei der Dimensionierung von R 1 beachten?



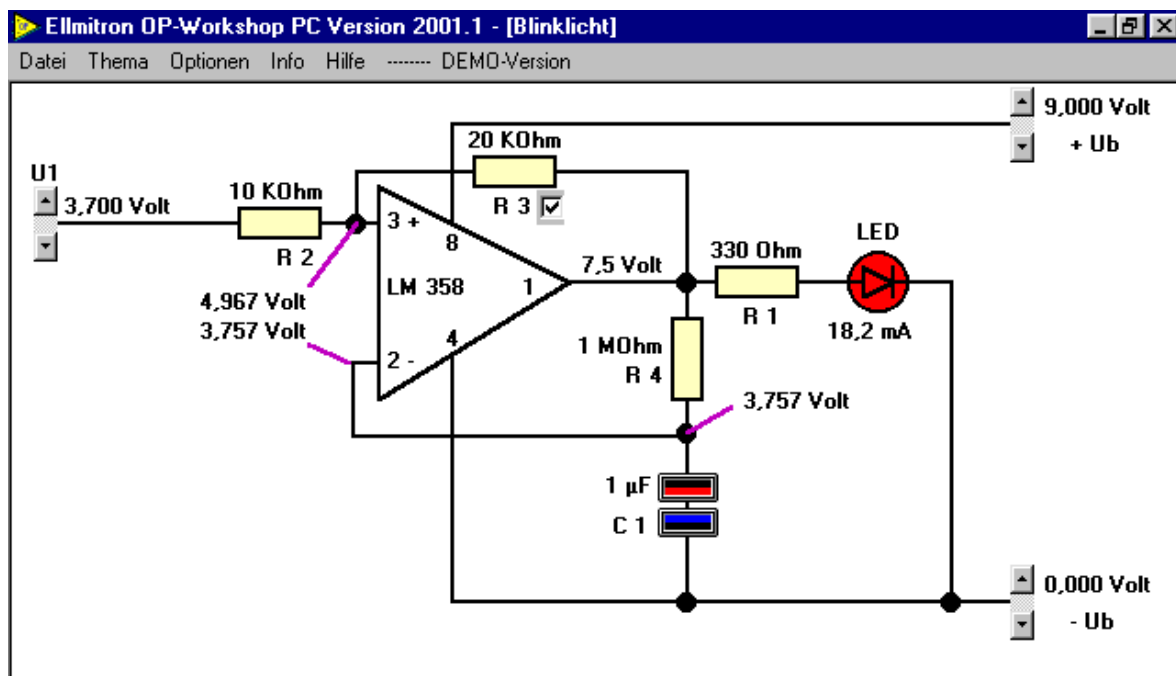
Wird diese Schaltung durch einen Taster oder Reedkontakt ausgelöst, kann man als Widerstand für R 1 Werte von  $1 \text{ KOhm}$  bis  $10 \text{ MOhm}$  verwenden. Wird anstelle des Tasters jedoch eine Sensorfläche eingebaut, muss der Widerstand R 1 so gewählt werden, dass der Schwellwert U 1 bei Berührung unterschritten wird.

Da die Hautoberfläche einen Widerstandswert von 30 bis  $200 \text{ KOhm}$  hat, ist es sinnvoll, für R 1 einen Wert von mindestens  $1 \text{ MOhm}$  zu wählen. Zu hohe Werte ( $> 10 \text{ MOhm}$ ) sind nicht empfehlenswert, da der OP sonst auch sehr leicht Störsignale aufnehmen kann und unkontrolliert schalten würde.

- **Thema\_Blinklicht**

Diese Schaltung entspricht beinahe der Schaltung Ausschaltverzögerung. Hier wird jedoch der Elko nicht direkt über die Betriebsspannung geladen, sondern über den OP-Ausgang. Die Folge ist, dass der Elko beim Einschalten der Betriebsspannung geladen wird, weil die Spannung am +Eingang größer ist als die Spannung am –Eingang. Sobald die Ladespannung die Spannung am +Eingang überschreitet, schaltet der OP nach 0 Volt, wodurch der Elko wieder entladen wird. Die mit dem Widerstand R 3 eingebaute Hysterese verhindert ein unkontrolliertes Hin- und Herschalten und bewirkt, dass der Elko auf einen Ausschaltenschwellwert geladen und auf einen Einschaltenschwellwert entladen werden muss.

*Beobachten Sie den Lade- und Entladezyklus. Verwenden Sie einen Elko mit 10µF oder 100µF damit der Vorgang langsamer abläuft. Entfernen Sie den Widerstand R 3 und sehen Sie, wie sich das Fehlen der Hysterese auf die Schaltung auswirkt.*



Die Frequenz ist hier nicht so einfach zu berechnen, weil sie sowohl vom Elko und vom Ladewiderstand als auch von der Hysterese abhängt. Als Faustregel kann man bei einer Hysterese von 2/3 der Betriebsspannung sagen, dass die Frequenz nach der Formel:

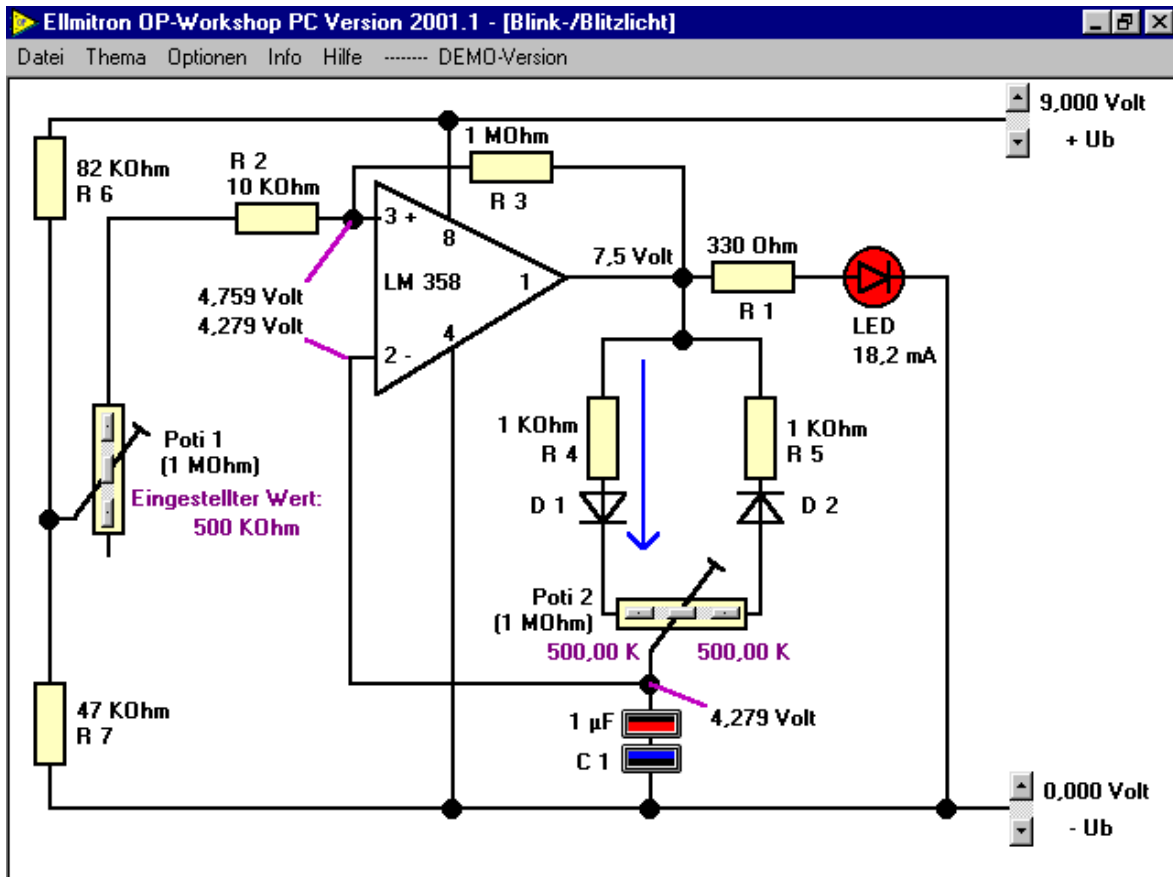
$f \text{ (Hz)} = 1 : (R 4 * C 1)$  berechnet werden kann.

Bei R 4 mit 1 MOhm und C 1 mit 1µF ergäbe sich:

$f(\text{Hz}) = 1 : (1.000.000 \text{ Ohm} * 0,000.001 \text{ F}) = 1 \text{ Hz}$

- **Thema\_Blink-/Blitzlicht, (Flashlight - Bausatz 10-358)**

Die nächste und vorerst letzte Schaltung entspricht exakt dem Ellmitron-Bausatz 10-358 (Fahrrad-Flashlight). Er ist eine Weiterentwicklung des Blinklichtes. Hier kann nicht nur die Frequenz, sondern auch die Pulsbreite eingestellt werden.



Beobachten Sie den Lade- und Entladezyklus. Verwenden Sie einen Elko mit  $10\mu\text{F}$  oder  $100\mu\text{F}$  damit der Vorgang langsamer abläuft. Verändern Sie die Poti 2 und beobachten Sie die Auswirkungen, wenn es ganz nach rechts und ganz nach links eingestellt ist.

Wie wird nun aber aus einem Blinklicht ein Blitzlicht? Da die LED leuchtet während der Elko geladen wird und dunkel ist während der Elko entladen wird, muss man nur die Lade- und Entladezeit unterschiedlich gestalten. Dazu wird der Lade-/Entladestrom mittels zweier Dioden durch zwei verschiedene Widerstände kanalisiert. Wählt man nun einen kleinen Ladewiderstand und einen großen Entladewiderstand leuchtet die LED nur während des kurzen Ladevorgangs und ist die längere Entladezeit über dunkel. In unserer Schaltung haben wir den Mittelabgriff von Poti 2 mit dem Elko verbunden. Ist das Poti nun nach links gedreht, ist der Widerstand des Ladezweigs kleiner und der des Entladezweigs größer (Blitzfunktion). In Mittelstellung ist der Widerstand des Lade- und Entladezweigs gleich groß (Blinkfunktion). Der Vorteil dieser Schaltung ist, dass die Einstellung der Pulsbreite keinen Einfluss auf die Frequenz hat weil die Summe des Entlade- und Ladewiderstands immer gleich ist. Die Widerstände R 4 und R 5 dienen nur als Schutz des Op's. Die Frequenz der Schaltung können wir in geringem Umfang mit Poti 1 einstellen, das den Grad der Hysterese verändert. Eine Grobe Frequenzänderung kann durch Ändern der Elkowerte erreicht werden.

- **Thema\_Verstärker, nicht invertierend**

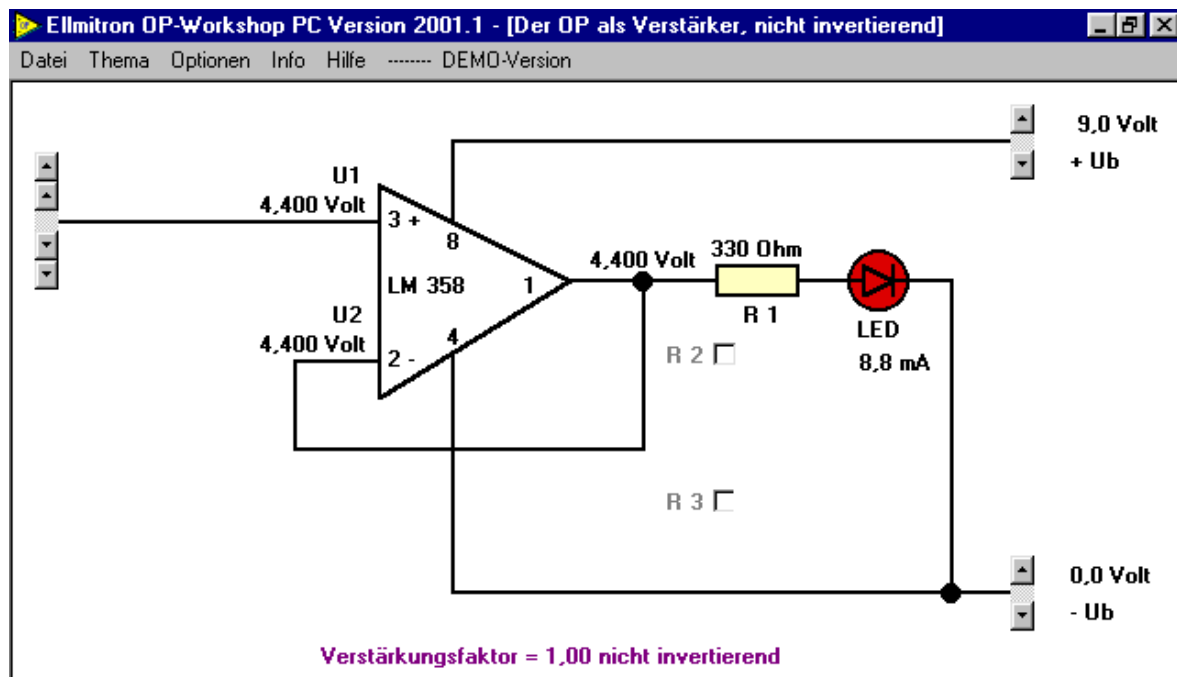
Nun soll zum ersten mal der OP als Verstärker mit geregelter Verstärkung betrieben werden. Bisher wurde er nur als Komparator eingesetzt. Er hat zwei Werte verglichen und entsprechend nach + oder – geschaltet. Tatsächlich hat er dies aber nicht getan, weil er nur zwei Schaltzustände hat, sondern weil er die Differenz der Spannungen an seinen beiden Eingängen so stark (ca. 100.000-fach) verstärkt, dass bereits ein minimaler Unterschied genügt, um den OP an den oberen oder unteren „Anschlag“ (Grenzen der Betriebsspannung) auszusteuern.

Unter geregelter Verstärkung versteht man nun, dass man diesen extrem hohen Verstärkungsfaktor auf einen gewünschten Wert reduziert. Dies geschieht, indem man den Ausgang des OP's auf den –Eingang rückkoppelt. Durch den Grad der Rückkopplung wird der Verstärkungsfaktor bestimmt.

Invertierend bedeutet "das Vorzeichen umkehrend". Ein nicht invertierender Verstärker ändert demnach nichts am Vorzeichen der Eingangsspannung.

Ein invertierender Verstärker mit der Verstärkung 3-fach wandelt eine Eingangsspannung von +1 Volt in eine Ausgangsspannung von -3 Volt.

Ein nicht invertierender Verstärker mit der gleichen Verstärkung wandelt die Eingangsspannung von +1 Volt in eine Ausgangsspannung von +3 Volt.



Verändern Sie die Spannung U 1 und beobachten Sie sowohl die Eingangsspannungen als auch die Ausgangsspannung.

Wir werden beobachten, dass die Spannung am Ausgang immer der Spannung am +Eingang entspricht. Voraussetzung hierfür ist, dass die Ausgangsspannung bei dieser Betriebsspannung überhaupt erreicht werden kann.

Wenn Eingangsspannung und Ausgangsspannung gleich sind, ergibt sich der Verstärkungsfaktor 1 nach folgender Formel:

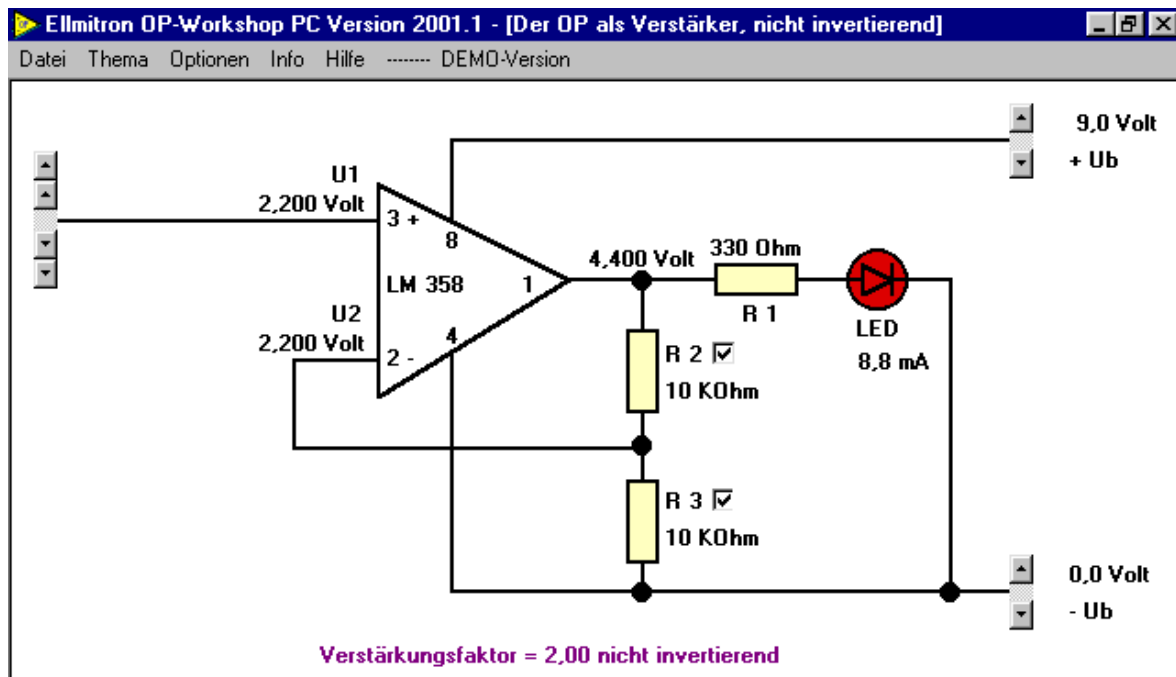
$$\text{Verstärkungsfaktor} = \text{Ausgangsspannung} : \text{Eingangsspannung} = 4,4 \text{ V} : 4,4 \text{ V} = 1\text{-fach}$$

Wie arbeitet nun diese Schaltung?

Beim Einschalten der Betriebsspannung liegt U 1 zunächst über der Spannung am –Eingang, der OP verstärkt diese Differenz mit seinem internen Verstärkungsfaktor von ca. 100.000-fach und möchte nach (+Ub – 1,5 Volt) schalten. Sobald die Ausgangsspannung jedoch die Spannung U 1 erreicht hat, ist U 1 nicht mehr größer als U 2 und die Ausgangsspannung bleibt bei einem Wert, der U 1 entspricht.

Wie kann man nun eine geregelte Verstärkung mit einem Verstärkungsfaktor von 2-fach erreichen?

Fügen Sie die Widerstände  $R_2$  und  $R_3$  der Schaltung hinzu und schauen Sie, wie die Schaltung nun auf Spannungsänderungen von  $U_1$  reagiert.



Wir werden beobachten, dass die Spannung am Ausgang immer doppelt so hoch ist als die Spannung am +Eingang. Der Grund liegt im Spannungsteiler aus  $R_2$  und  $R_3$ . Er teilt die Ausgangsspannung im Verhältnis 1:2, d.h. am –Eingang liegt nun die halbe Ausgangsspannung.

Wie arbeitet nun diese Schaltung?

Beim Einschalten der Betriebsspannung liegt  $U_1$  zunächst über der Spannung am –Eingang, der OP verstärkt diese Differenz mit seinem internen Verstärkungsfaktor von ca. 100.000-fach und möchte nach  $(+U_b - 1,5 \text{ Volt})$  schalten. Sobald die Ausgangsspannung jedoch so hoch ist, dass  $U_1$  nicht mehr größer als  $U_2$  ist erhöht sich die Ausgangsspannung nicht mehr weiter. Jetzt liegt sie aber schon bei  $2 * U_1$  weil wir nur die Hälfte der Ausgangsspannung dem –Eingang zugeführt haben. Nach obiger Formel ergibt sich ein Verstärkungsfaktor von:

Verstärkungsfaktor = Ausgangsspannung : Eingangsspannung =  $4,4 \text{ V} : 2,2 \text{ V} = 2\text{-fach}$

Der Spannungsteiler für diesen Verstärkungsfaktor berechnet sich wie folgt:

$(R_2 + R_3) : R_3 = (10.000 \text{ Ohm} + 10.000 \text{ Ohm}) : 10.000 \text{ Ohm} = 2\text{-fach}$

Um einen Faktor von 11-fach zu erzielen, brauchen wir also nur dem –Eingang ein elftel der Ausgangsspannung zuzuführen. Versuchen wir  $R_2$  so zu ändern, dass dieser Faktor entsteht. Wir stellen obige Formel entsprechend um:

$$R_2 = (\text{Faktor} * R_3) - R_3$$

$$R_2 = (11 * 10.000 \text{ Ohm}) - 10.000 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = 110.000 \text{ Ohm} - 10.000 \text{ Ohm} = 100.000 \text{ Ohm} = 100 \text{ KOhm}$$

Ändern Sie also den Widerstand  $R_2$  auf  $100 \text{ KOhm}$  und schauen Sie, wie die Schaltung nun auf Spannungsänderungen von  $U_1$  reagiert.



Sie werden sehen, dass die Berechnung stimmt. Für diesen Verstärkungsfaktor sind jedoch auch noch andere Bauteilwerte möglich. Wichtig ist dabei nur, dass das berechnete Teilverhältnis eingehalten wird.

*Versuchen Sie nach obiger Formel auch andere Widerstandskombinationen zu berechnen. Wie groß muss R 2 sein, wenn R 3 auf 4,7 KOhm festgelegt ist? Überprüfen Sie ihre Berechnungen in der Schaltung.*

Auch wenn theoretisch nur das Verhältnis von R 2 zu R 3 den Verstärkungsfaktor bestimmt, sollte man in der Praxis möglichst nur Werte zwischen 1 KOhm und 1 MOhm verwenden. So bleiben unerwünschte Effekte, die in der Natur des Bauteils liegen nebensächlich.

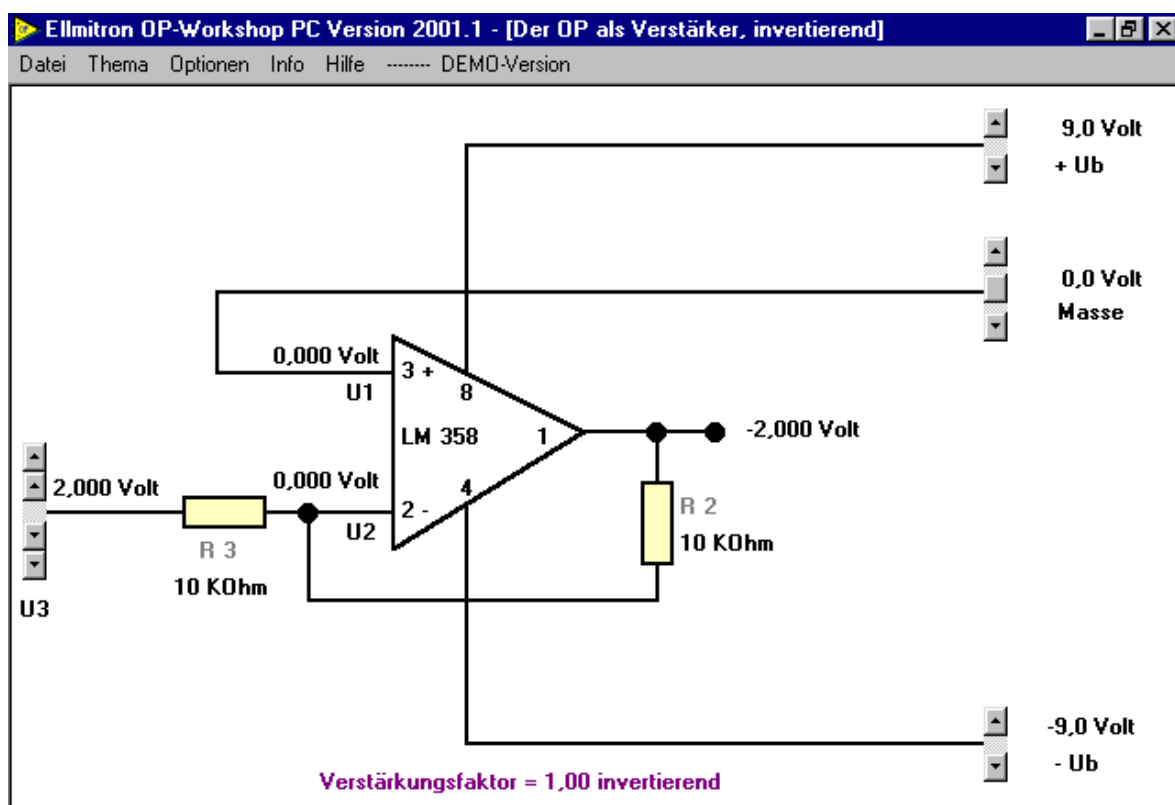
Bei einem Verstärkungsfaktor von 11-fach werden Sie auch schnell gemerkt haben, dass der Verstärker nur noch bei Eingangsspannungen zwischen 0 Volt und 0,6 Volt einwandfrei arbeitet. Es ist daher wichtig, dass die zu erwartende Ausgangsspannung überhaupt im Betriebsspannungsbereich liegt.

*Stellen Sie für U 1 einen Wert von 0,9 Volt ein. Der OP kann jetzt die gewünschte Ausgangsspannung von  $0,9 \text{ Volt} * 11 = 9,9 \text{ Volt}$  nicht mehr erreichen. Erhöhen Sie nun die Betriebsspannung langsam auf 12 Volt. Sie sehen, dass jetzt der OP wieder einwandfrei arbeitet.*

Negative Eingangsspannungen können mit dieser Anordnung nicht verstärkt werden.

- **Thema\_Verstärker, invertierend**

Die folgende Abbildung zeigt einen invertierenden Verstärker mit dem OP. Er ermöglicht die Verstärkung von positiven und negativen Eingangsspannungen. Die Betriebsspannung ist hier symmetrisch angelegt, d.h. Der OP wird von einer positiven und einer negativen Spannungsquelle gespeist. Die Referenzspannung am +Eingang liegt auf 0 Volt.



*Verändern Sie die Spannung U 1 und beobachten Sie sowohl die Eingangsspannungen als auch die Ausgangsspannung.*

Die Ausgangsspannung entspricht hier immer der Spannung U 3, jedoch mit invertiertem (umgekehrten) Vorzeichen.

Beim Einschalten der Betriebsspannung liegt hier U 2 über U 1. Der OP verstärkt diese Differenz mit seinem internen Verstärkungsfaktor von ca. 100.000-fach und möchte nach -Ub schalten. Sobald die Ausgangsspannung jedoch so hoch ist, dass U 2 nicht mehr größer als U 1 ist, sinkt die Ausgangsspannung nicht mehr weiter. Jetzt liegt die Ausgangsspannung bei  $-1 \cdot U 3$ . Der Verstärkungsfaktor der Schaltung ergibt sich wieder nach der schon bekannten Formel:

Verstärkungsfaktor = Ausgangsspannung : Eingangsspannung =  $-2 \text{ V} : 2 \text{ V} = -1\text{-fach}$

Ein Verstärkungsfaktor von  $-1\text{-fach}$  ist gleichbedeutend mit  $1\text{-fach}$  invertierend. Auch bei dieser Schaltung wird der Verstärkungsfaktor durch das Verhältnis R 2 zu R 3 bestimmt, allerdings wird es nach folgender einfacher Formel berechnet:

Verstärkungsfaktor, invertierend =  $R 2 : R 3 = 10.000 \text{ Ohm} : 10.000 \text{ Ohm} = 1\text{-fach}$

Für andere Verstärkungsfaktoren berechnet man R 2 nach folgender Formel:

$R 2 = R 3 \cdot \text{Verstärkungsfaktor}$

*Überprüfen Sie die von Ihnen berechneten Dimensionierungen in der Schaltung.*

Ein invertierender Verstärker mit symmetrischer Betriebsspannung kann auch negative Eingangsspannungen verarbeiten. Er ist ideal für die Verstärkung von NF-Signalen geeignet. Hat man keine symmetrische Betriebsspannung zur Verfügung, kann man auch den +Eingang auf die Hälfte der einfachen Betriebsspannung einstellen, muss aber dann den Eingang und den Ausgang über Kondensatoren ein bzw. auskoppeln. Dies wird evtl. in einer späteren Programmversion aufgegriffen.