

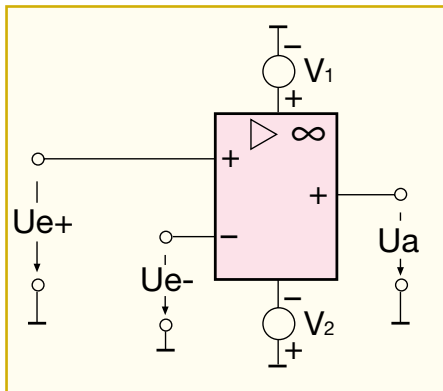


Operationsverstärker in Theorie und Praxis Teil 2

Nachdem wir im ersten Teil unserer Serie die Grundlagen zu Aufbau und Funktion der Operationsverstärker behandelt haben, zeigen wir nun die Grundschaltungen inklusive zahlreicher zugehöriger Anwendungsbeispiele aus der Praxis auf.

Spannungsversorgung

Im Normalfall wird ein Operationsverstärker mit einer positiven und einer negativen Spannung, gegenüber Masse, versorgt (siehe Abbildung 9). Diese Art der



Spannungsversorgung wird symmetrische Spannungsversorgung genannt („dual supply“). Alle Ein- und Ausgänge sind auf Masse bezogen. Steht nur eine Betriebsspannung zur Verfügung (z. B. Batterie), muss eine virtuelle Masse geschaffen werden, die in den meisten Fällen der halben Betriebsspannung entspricht. Wie dies schaltungstechnisch lösbar ist, wird im weiteren Verlauf dieses Artikels an einem praktischen Beispiel gezeigt. Zum besseren Verständnis einer OP-Schaltung ist die duale Spannungsversorgung vorteilhafter, weshalb sich alle weiteren Erläuterungen

Bild 9: Die normale Spannungsversorgung von OPs erfolgt symmetrisch.

in diesem Artikel auf die symmetrische Spannungsversorgung beziehen. Zur besseren Übersicht wird die Spannungsversorgung nicht mit eingezeichnet.

Invertierender Verstärker

Diese Grundschaltung (Abbildung 10), auch Umkehrverstärker genannt, zählt zu den Grundbetriebsarten des OPs, man findet sie in mannigfaltigsten Schaltungsanordnungen. Hier wird eine am invertierenden Eingang (-) liegende Spannung (U_e) verstärkt und liegt am Ausgang (U_a) um 180° phasengedreht bzw. mit umgekehrter Polarität vor. Der Verstärkungs- bzw. Dämpfungsfaktor wird durch das Verhältnis von R_2 (Gegenkopplung) zu R_1 bestimmt. Der Operationsverstärker ist bestrebt, die beiden Eingänge im Gleichgewicht zu halten, d.h., die Spannungsdiffere-

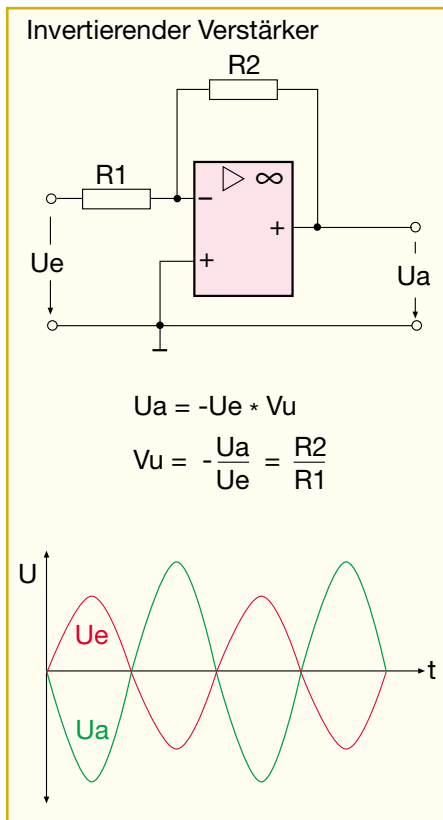


Bild 10: Grundschtaltung des invertierenden Verstärkers

renz zwischen dem invertierenden und dem nicht invertierenden Eingang ist im Normalfall immer 0. Aus diesem Grund liegt der rechte Anschluss von R1 spannungsmäßig gesehen auf Massepotenzial, weil der nicht invertierende Eingang (+) ebenfalls mit Masse verbunden ist. Da der Eingang eines Operationsverstärkers sehr hochohmig ist, wird der Eingangswiderstand somit im Wesentlichen von der Größe von R1 bestimmt. Unter der Annahme, dass in den Eingang des OPs kein Strom fließen kann, da dieser ja sehr hochohmig ist, muss der Strom, der durch R1 fließt, zwangsläufig auch durch R2 fließen. Der Spannungsabfall über R2 entspricht somit der Ausgangsspannung Ua.

Hierdurch ergibt sich durch die Knotenregel folgende Formel:

$$\frac{U_e}{R1} + \frac{U_a}{R2} = 0$$

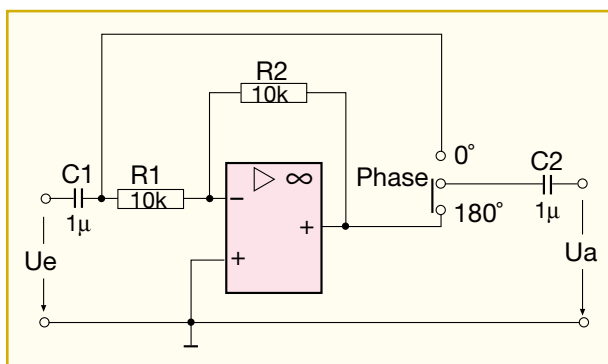


Bild 11: Phasendrehung eines NF-Signals

Stellt man die Formel um, ergibt sich für die Spannungsverstärkung V_U folgende Formel:

$$V_U = -\frac{U_a}{U_e} = \frac{R2}{R1}$$

Mit dem Minuszeichen wird die Phasendrehung zwischen Ein- und Ausgang dargestellt.

Die erste Anwendungsschaltung in Abbildung 11 entstammt einem Subwoofer-Filter und dient dort dazu, bei Bedarf die Phase des Audiosignals um 180° zu drehen, damit sich ein homogener Höreindruck einstellt. Mit dem Schalter S 1 kann die Phasenlage zwischen 0° und 180° gewählt werden. Mit $R1 = R2$ ist der Verstärkungsfaktor auf 1 eingestellt.

Nicht invertierender Verstärker

Diese Schaltung (auch Elektrometerverserker genannt) gehört ebenfalls zu den OP-Grundschtaltungen. Aus der in Abbildung 12 aufgeführten Verstärkungsgleichung ist zu ersehen, dass hier die Verstärkung immer positiv (> 1) und durch das Verhältnis R1 (Gegenkopplung) zu R2 bestimmt ist. Für den Verstärkungsfaktor ergibt sich folgende Formel:

$$V_U = 1 + \frac{R1}{R2}$$

Kennzeichnend ist einmal, dass die Ausgangsspannung in Phase bzw. die Polarität gegenüber der Eingangsspannung unverändert ist, und zweitens ein sehr hoher Eingangswiderstand, der nur vom Eingangswiderstand des OPs bestimmt wird.

In Abbildung 13 ist eine Anwendung aufgeführt. Die meisten dieser Verstärkerschaltungen sind, ihrem Einsatzzweck entsprechend, frequenzabhängig gegengekoppelt. Der Kondensator im Gegenkopplungszweig bestimmt die obere Grenzfrequenz der Schaltung. Er wirkt für eine Wechselspannung wie ein sich mit der Frequenz verändernder Widerstand. Je höher die Frequenz wird, desto weiter fällt der Widerstandswert. Zieht man jetzt die Verstärkungsformel heran, so kann man schnell ausrechnen, dass die Verstärkung mit dem sinkenden Wert aus der Parallelschaltung

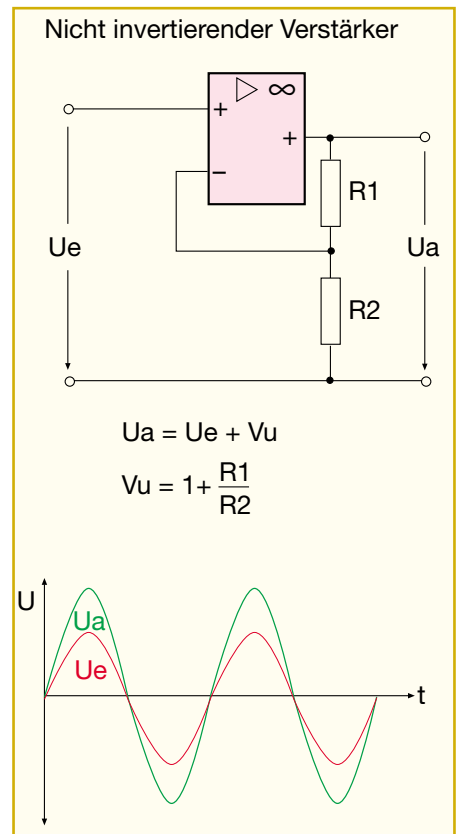


Bild 12: Grundschtaltung des nicht invertierenden Verstärkers

von R1 und Kondensator C2 gegen 1 abnimmt. Die Grenzfrequenz errechnet sich wie folgt:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C}$$

Die Bezeichnung R1 bezieht sich stets auf die Grundschtaltung, wie sie in Abbildung 12 zu sehen ist.

Spannungsfolger/Impedanzwandler

Der Spannungsfolger (Abbildung 14) ist eine Variante des nicht invertierenden Verstärkers. Er findet meist seine Anwendung als Puffer-Verstärker bzw. Impedanzwandler. Denn der Eingangswiderstand des OPs ist hier sehr hoch, der Ausgangswiderstand hingegen niederohmig.

Sein Verstärkungsfaktor beträgt immer 1, die Eingangsspannung wird also nicht verstärkt.

In der Praxis kommt der Spannungsfolger zum Beispiel in Ausgangsstufen von Schaltungsanordnungen zum Einsatz. Durch die hohe Eingangsimpedanz wird die vorangehende Schaltung nicht belastet und folgende Stufen sind niederohmig anschließbar (Impedanzwandler).

Abbildung 15 zeigt eine typische Anwendung zur Erzeugung einer Referenzspannung, die in Operationsverstärkerschaltungen mit einfacher Spannungsver-

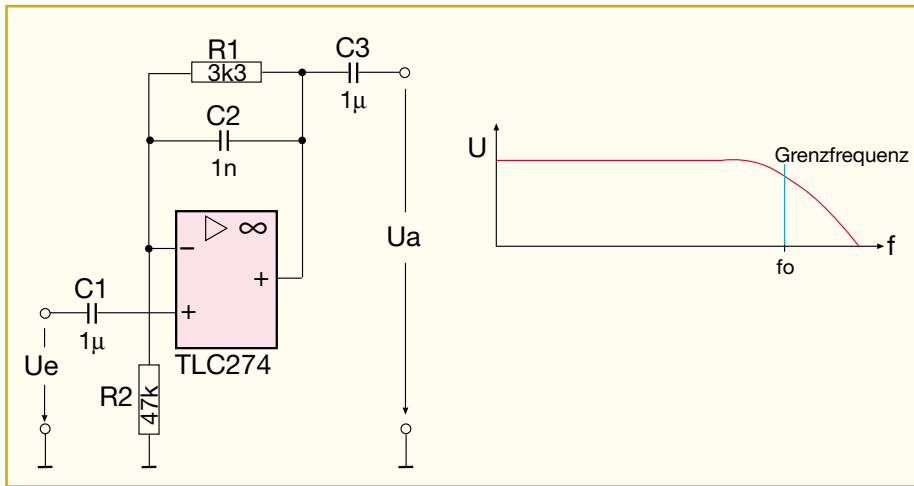


Bild 13: Anwendungsbeispiel für den nicht invertierenden Verstärker mit frequenzabhängiger Verstärkung

sorgung („single supply“) als virtuelle Masse bzw. Referenzpunkt eingesetzt werden kann.

Mit dem Spannungsteiler aus R 1 und R 2 wird die Betriebsspannung halbiert, so dass am Eingang des Spannungsfolgers

ferenz zur Verfügung – daher die Bezeichnung Puffer. Wie man unschwer erkennt, ist am Ausgang des OPs ein Widerstand R 3 zwischengeschaltet, der ein Schwingen der Schaltung verhindern soll. Der Widerstandswert sollte zwischen 10 und

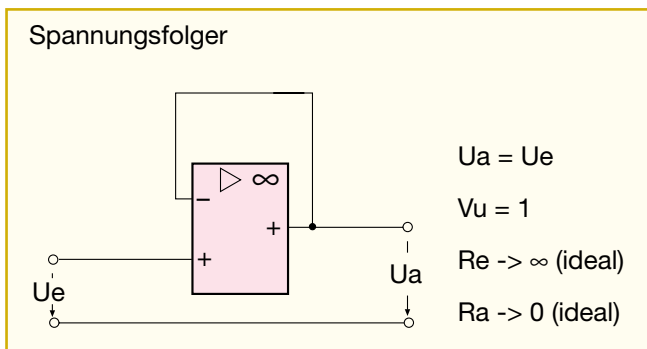


Bild 14: Grundschaltung des Spannungsfolgers

Pin 3 eine Spannung von $U_B/2$ ansteht. Am Ausgang der Schaltung stellt sich ebenfalls eine Spannung von $U_B/2$ ein, die durch den OP gepuffert wird.

Der niederohmige Ausgang des Spannungsfolgers stellt die benötigte Leistung auch bei Belastungsänderungen ohne Rückwirkung auf die eigentliche Spannungsre-

100 Ohm liegen. Bei manchen OP-Typen ist dieser Widerstand schon integriert, wodurch eine externe Beschaltung überflüssig wird. Der Widerstand R 2 lässt sich auch durch eine Z-Diode bzw. Referenzdiode ersetzen. Setzt man hier eine Referenzdiode vom Typ LM 385-2,5 ein, ergibt sich am Ausgang der Schaltung eine stabile Span-

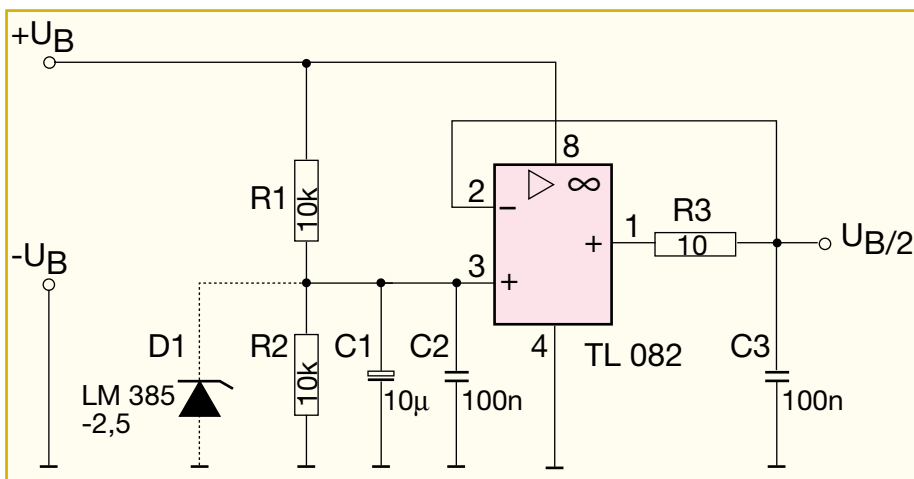


Bild 15: Anwendungsbeispiel für den Spannungsfolger, hier zur Erzeugung einer virtuellen Masse ($U_B/2$)

nung von 2,5 V, die unabhängig von der Betriebsspannung ist.

Komparator

Eine in vielen Variationen genutzte OPV-Grundschaltung ist der Komparator (Abbildung 16), auch analoger Vergleichler (Schwellwertschalter) genannt. Hier fällt zunächst die fehlende Rückkopplung auf, der OP verstärkt also ein Eingangssignal sehr hoch bis zur Leerlaufverstärkung.

Diese hohe Verstärkung bewirkt, dass bereits sehr geringe Differenzspannungen an den Eingängen eine Vollaussteuerung des Verstärkers hervorrufen. Der Ausgang des Komparators kennt nur zwei verschiedene Ausgangszustände, wie man es von der Digitaltechnik kennt: High-Pegel (nahe-

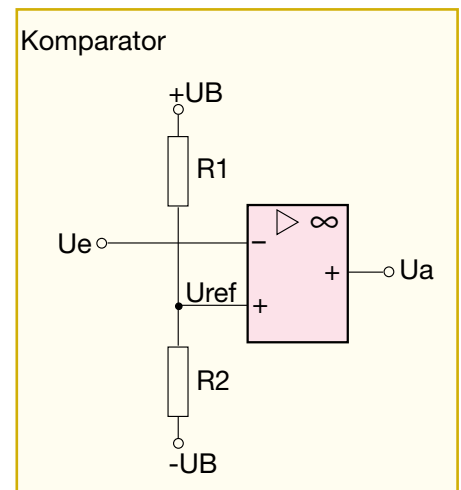


Bild 16: Grundschaltung des Komparators

zu positive Betriebsspannung) und Low-Pegel (negative Betriebsspannung bzw. Masse). Grundsätzlich kann folgende Aussage getroffen werden:

Ist die Spannung am nicht invertierenden Eingang (+) positiver als am invertierenden Eingang (-), so ist die Ausgangsspannung auf High-Pegel. Andererseits führt der Ausgang Low-Pegel, wenn der nicht invertierende Eingang negativer als der invertierende Eingang ist.

Im Prinzip kann fast jeder Operationsverstärker als Komparator geschaltet werden. Es gibt allerdings auch spezielle OPs, die nur für solche Aufgaben konzipiert wurden, wie z.B. der LM 393, dessen Blockschaltbild in Abbildung 17 dargestellt ist. Im LM 393 sind zwei identische Komparatoren integriert, deren Ausgänge als Open-Kollektor ausgeführt sind, wodurch z. B. eine Pegelwandlung auf digitale Schaltungen möglich wird.

Typische Komparator-Anwendungen sind etwa Dämmerungs- und Temperaturschalter, Spannungsüberwachungen oder die Auslösung von Schaltschwellen, z. B. als Übersteuerungsanzeige im NF-Bereich.

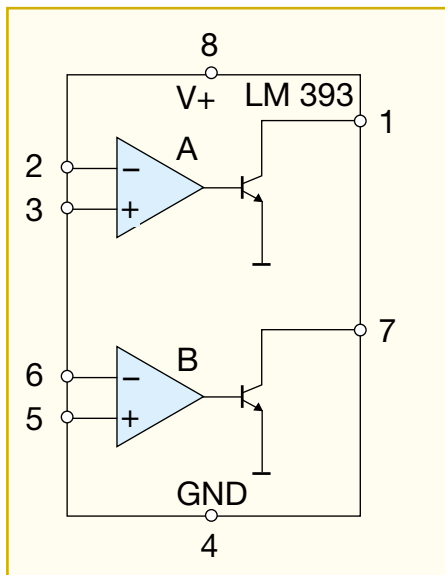


Bild 17: Blockschaltbild des LM 393

In Abbildung 18 finden wir eine typische Schaltung – eine Low-Bat-Anzeige, die die Komparatorfunktion besonders einfach nachvollziehbar macht. Mit dem Referenz-Spannungselement D 1 wird eine Referenzspannung von 2,5 V generiert und dem invertierenden Eingang (-) des OPs zugeführt. Diese Art der Referenzspan-

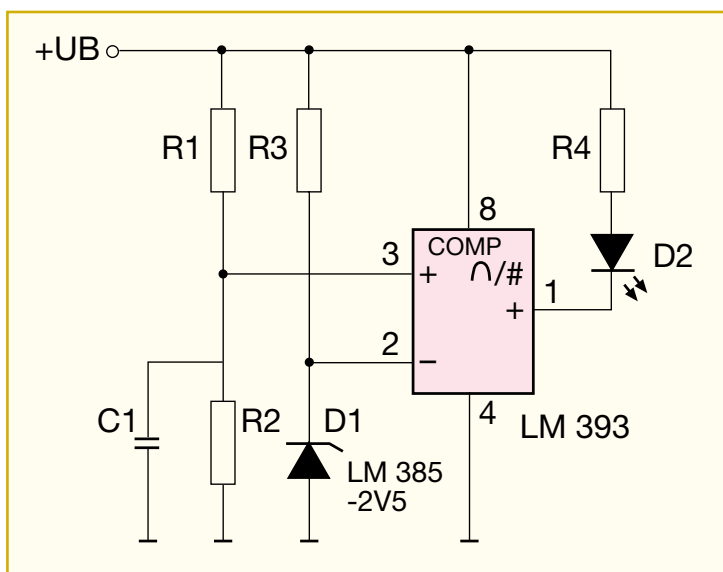


Bild 18: Low-Bat-Anzeige mit einer Komparator-schaltung

nungserzeugung ist deshalb notwendig, damit ein fester Referenzwert weit unterhalb der gewünschten Überwachungsspannung stabil vorliegt. Ein einfacher Widerstandsteiler würde die Referenzspannung ja der sinkenden Batteriespannung nachführen. Damit wäre wohl ein Komparatorverhalten erreichbar, aber eben keine definierte Spannungsschwelle.

Die Betriebsspannung +UB ist über einen Spannungsteiler (R 1, R 2) mit dem nicht invertierenden Eingang (+) des OPs verbunden. Sinkt die Spannung +UB so weit ab, dass die Spannung am nicht invertie-

renden Eingang unter den Wert von 2,5 V liegt, schaltet der Komparatorausgang von High- auf Low-Pegel und die Leuchtdiode D 2 leuchtet auf.

Schmitt-Trigger

Will man die Anstiegsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung noch weiter steigern, den Komparator quasi zum schnellen elektronischen Schalter machen, kommt eine Mitkopplung (also eine Rückführung eines Teils des Ausgangssignals auf den nicht invertierenden Eingang) zum Einsatz – man erhält einen Schmitt-Trigger. Allgemein spricht man von Mitkopplung, wenn es sich um eine positive Rückkopplung handelt, die im Gegensatz zur negativen Rückkopplung eine Verstärkungserhöhung bewirkt. Praktisch wird eine Mitkopplung durch einen Widerstand realisiert, der vom Ausgang des Komparators auf den nicht invertierenden Eingang (+) führt (siehe Abbildung 19). Hierdurch ergeben sich unterschiedliche Ein- und Ausschaltpunkte des Komparators. Durch die Mitkopplung wird auch ein weiteres Problem gelöst, das bei einem „normalen“ Komparator auftreten kann: Durch geringfügige Schwankungen der Differenzspannung bzw. der Eingangsspannungen im Bereich

wie beim Komparator beschrieben, zu erreichen.

Ist der Ausgang gekippt, entstehen umgekehrte Spannungsverhältnisse am Eingang, und nun ist ein erneutes Umschalten erst wieder durch eine deutlich höhere Spannungsänderung am Eingang möglich, als dies der Fall ohne Mitkopplung wäre. So wird ein begrenzter Spannungsbereich erzeugt, in dem der Komparator nicht umschaltet. Die Differenz zwischen Ein- und Ausschaltpunkt wird als Hysterese bezeichnet. Je kleiner der Mitkoppelwiderstand ist, desto größer ist die Hysterese. Die Grafik der Abbildung 20 illustriert die beschriebenen Vorgänge noch einmal. Man erkennt deutlich den relativ breiten Spannungsbereich der Hystereseschleife, während der eigentliche Referenzwert genau zwischen U_{Eaus} und U_{Ein} liegt und im Verhältnis nur eine dünne Linie wäre.

Typisches Beispiel für eine Schaltung mit einem Schmitt-Trigger ist ein Dämmungsschalter, der ja nicht bei jeder geringen Helligkeitsänderung, etwa bei vorbeifahrenden Autos oder vorbeiziehenden Wolken, sofort reagieren soll. Deshalb sieht man hier unterschiedliche Schwellwerte für das Ein- und Ausschalten vor. Im gezeigten Beispiel in Abbildung 21 wird der Schwellwert mit dem Poti eingestellt. Die Hysterese liegt schaltungstechnisch bedingt (R 7) bei ca. 100 mV. Die Änderung der Eingangsspannung am invertierenden Eingang (-) Pin 2 wird durch den lichtempfindlichen Widerstand LDR 1 erzeugt. Mit abnehmender Umgebungshelligkeit steigt der Widerstandswert des LDR, wodurch die Spannung an Pin 2 abfällt.

Der Widerstand R 5 und der Elko C 1 bilden einen Tiefpass, der nur langsame Spannungsänderungen passieren lässt und somit zusätzlich kurzzeitige Helligkeitsschwankungen unterdrückt. Wenn die Spannung an Pin 2 unter den Spannungswert der eingestellten Schaltschwelle an Pin 3 absinkt, schaltet der Komparatorausgang (U_a) auf High-Pegel (annähernd 12 V). Gleichzeitig zieht jetzt der Widerstand R 7 die Schaltschwelle in Richtung

der Schaltschwelle können ständige Schaltungsvorgänge ausgelöst werden.

Das Arbeitsprinzip, um die oben beschriebene Wirkung zu erreichen, ist einfach. Je nachdem, welcher Zustand am Ausgang des OPs herrscht, zieht R 2 den nicht invertierenden Eingang entweder in Richtung positiver oder negativer Betriebsspannung. Eine anliegende Eingangsspannung muss also diese durch R 2 künstlich erzeugte Schwelle, die nun weit höher ist als die, die den OP-Ausgang im Normalfall zum Kippen bringen würde, erst überschreiten, um ein Umkippen des Ausgangs,

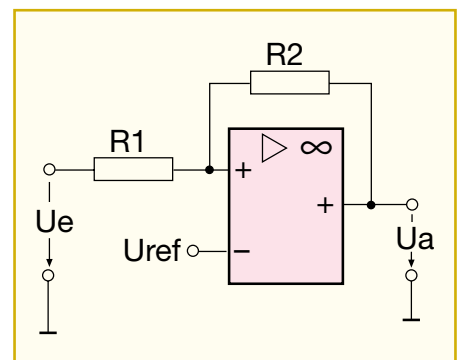


Bild 19: Grundschtaltung des Schmitt-Triggers

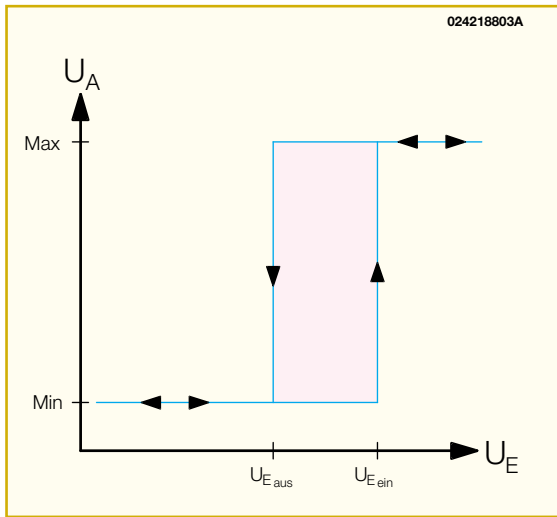


Bild 20: Kennlinie eines Komparators mit Hysterese

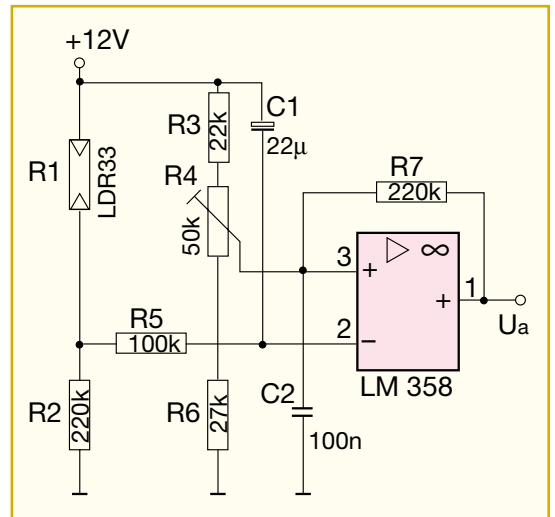


Bild 21: Anwendung des Schmitt-Triggers in einem Dämmerungs-schalter

UB und verändert somit die obere Schaltschwelle.

Fensterkomparator

Kombiniert man zwei Komparatoren zu einem so genannten Fensterkomparator, so kann man hiermit einen ganz bestimmten Spannungsbereich überwachen. In Abbildung 22 ist eine praktische Schaltung in Form einer einfachen Überwachungsschaltung für eine Alarmlinie dargestellt.

Die Meldelinie besteht aus einer zweiadrigen Leitung, die am Ende mit einem Widerstand von 10 kΩ abgeschlossen ist.

Eine solche Leitung wird in der Alarmtechnik auch Sabotageleitung genannt, die sowohl beim Durchtrennen als auch beim Kurzschließen einen Alarm auslösen soll. Die Auswerteschaltung muss also diese beiden Zustände erkennen können. Hierzu ist mit den beiden Komparatoren IC 1 A und IC 1 B ein Fensterkomparator realisiert, dessen Spannungsfenster (Referenzwerte) durch die Widerstände R 3, R 4 und R 5 vorgegeben ist. Solange die Spannung am Eingang innerhalb dieses Fensters liegt, führen beide Komparatoren am Ausgang High-Potential. Weicht der Gesamtwiderstand der Alarmlinie inkl. 10-kΩ-Wider-

stand um mehr als 40 % nach oben oder unten ab, schaltet der jeweilige Komparator auf Low-Potential und der Alarm (hier durch die LED angezeigt) wird ausgelöst. Die beiden Ausgänge der Komparatoren können problemlos miteinander verbunden werden, da es sich ja um Open-Kollektor-Ausgänge handelt. Hierdurch entsteht eine einfach realisierte Oder-Funktion. Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsspannung ist in Abbildung 22 (rechts) dargestellt.

Im dritten Teil dieser Serie setzen wir die Vorstellung der Grundsaltungen fort. **ELV**

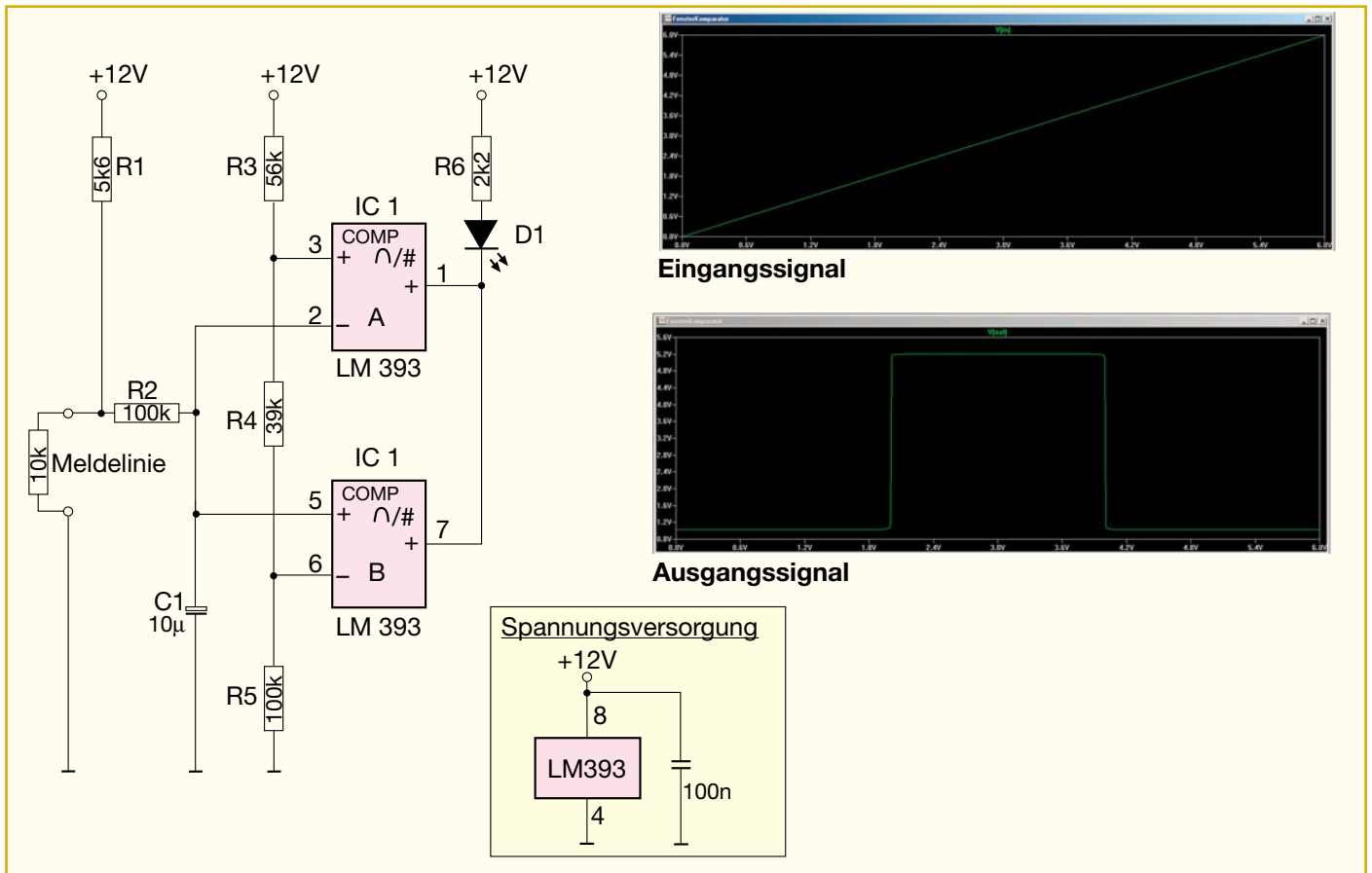


Bild 22: Anwendung eines Fensterkomparators in einer Alarmanlage