

6. Komparatoren

6.1 Grundlagen

Der Komparator (Vergleicher, Comparator) ist ein Differenzverstärker, dessen Ausgangsstufe als Schaltstufe betrieben wird. Der typische Komparator hat fünf Anschlüsse: zwei Eingänge, einen Ausgang und zwei Anschlüsse für die Versorgungsspannung (Abbildung 6.1). Seine Aufgabe besteht darin, die Signalpegel an den Eingängen miteinander zu vergleichen und eine digitale Vergleichsaussage zu liefern.

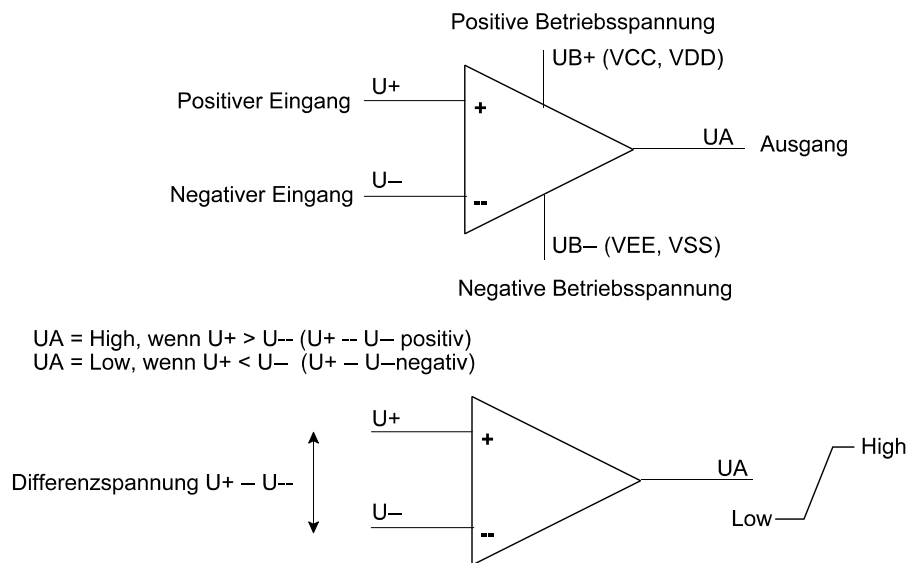


Abb. 6.1 Der Komparator als Schaltsymbol. In den meisten Schaltplänen werden die Versorgungsspannungsanschlüsse nicht mitgezeichnet.

Der Schaltzustand des Ausgangs hängt von der Potentialdifferenz an den Eingängen ab (Differenzspannung, Gegentaktspannung). Der Komparator setzt die Differenzspannung $U+ - U-$ in einen binären Ausgangspegel (Low oder High) um. Die meisten Komparatoren wirken folgendermaßen:

- Ist die Differenzspannung positiv ($U+ - U- > 0 \text{ V}$), so führt der Ausgang einen High-Pegel. Die Differenzspannung ist dann positiv, wenn der Plus-Eingang auf einem höheren Potential als der Minus-Eingang liegt ($U+ > U-$).
- Ist die Differenzspannung negativ ($U+ - U- < 0 \text{ V}$) so führt der Ausgang einen Low-Pegel. ($U+ < U-$). Die Differenzspannung ist dann negativ, wenn der Plus-Eingang auf einem niedrigeren Potential als der Minus-Eingang liegt ($U+ < U-$).

Invertierung

Das Schaltverhalten kehrt sich um, wenn man die Eingangssignale vertauscht.

Wann schaltet der Komparator um?

Weist die Differenzspannung zwischen den Eingängen einen hinreichend großen Betrag auf, so führt der Ausgang des Komparators mit Sicherheit einen der beiden Pegel (Low oder High). Ein idealer Komparator müsste dann schlagartig umschalten, wenn die Differenzspannung exakt gleich 0 V ist. Der reale Komparator ist jedoch keine Schnappschaltung, sondern nur ein Verstärker. Das Schaltverhalten am Ausgang ist lediglich eine Wirkung der Übersteuerung. Wenn die Differenzspannung sehr niedrig ist, wird der Verstärker nicht mehr übersteuert. Er arbeitet dann im linearen Bereich. Der zugehörige Kennwert (der die Breite des linearen Bereichs angibt) ist die Offsetspannung (Offset Voltage) V_{OS} (Abbildung 6.2). Es ist sicher, dass der Komparator im linearen Bereich umschaltet, es ist aber nicht sicher, bei welchem exakten Wert der Differenzspannung dies geschieht. Die Vergleichsaussage ist deshalb mit einem Fehler behaftet, der der Offsetspannung entspricht.

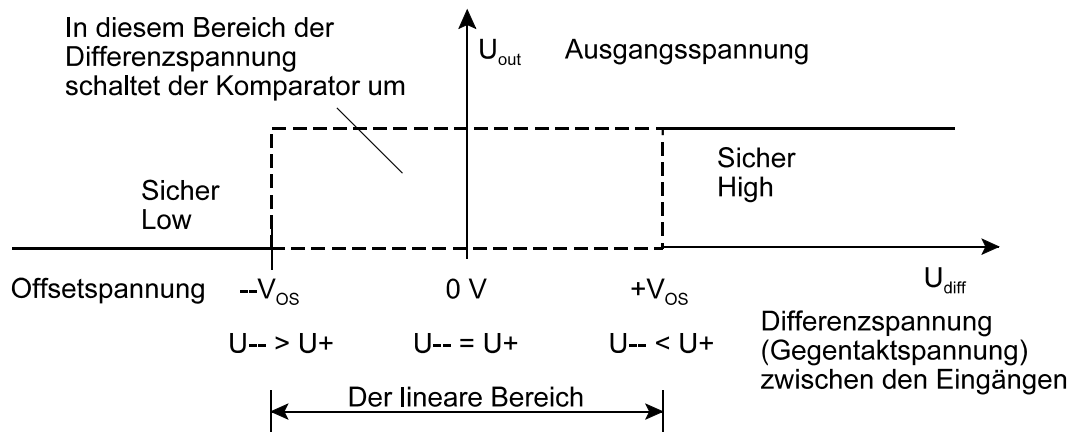


Abb. 6.2 So schaltet ein Komparator um.

Ein häufiger Anwendungsfall

Viele Anwendungen bestehen im Grunde darin, eine Eingangsspannung mit einer Bezugsspannung (Referenzspannung) zu vergleichen (Abbildung 6.3 und 6.4). Referenzspannungen können u. a. mit Spannungsteilern, Zenerdioden, Dioden in Flußrichtung oder Referenzspannungsquellen (Reference Voltage Sources) erzeugt werden.

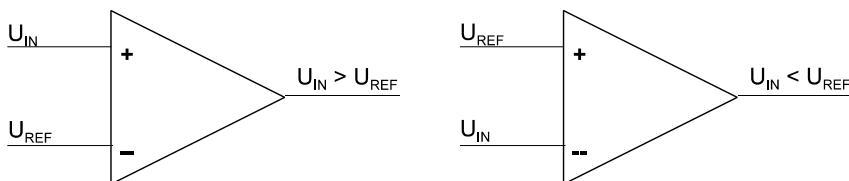


Abb. 6.3 Eine Eingangsspannung U_{IN} wird mit einer Referenzspannung U_{REF} verglichen. Die gewünschte Vergleichsaussage ergibt sich durch entsprechendes Anschließen an die Eingänge des Komparators.

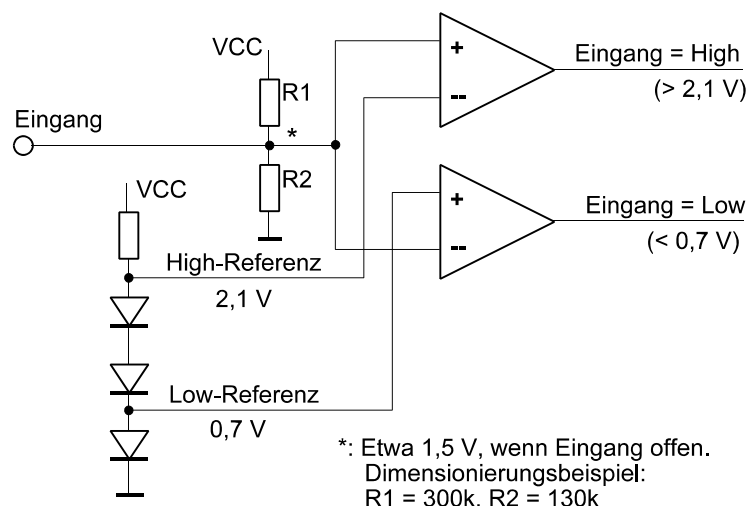


Abb. 6.4 Einsatzbeispiel. Ein Digitalsignal wird bewertet (Grundschtung eines typischen Logikprüfstifts).

Im Beispiel von Abbildung 6.4 geht es darum, zu erkennen, ob das Eingangssignal auf einem der zulässigen digitalen Signalpegel liegt oder nicht. Hierzu wird das Eingangssignal mit einer Referenzspannung für den maximalen Low-Pegel und mit einer Referenzspannung für den minimalen High-Pegel verglichen. Die Referenzspannungen werden hier durch die Flußspannungen von Siliziumdioden dargestellt. Ist der Eingang offen, so hält ihn der Eingangsspannungsteiler (R1, R2) auf einem Signalpegel, der näherungsweise in der Mitte des verbotenen Bereichs liegt. Ist das Eingangssignal ein korrektes Logiksignal, so ist die Eingangsspannung entweder kleiner als 0,7 V (Low-Pegel) oder größer als 2,1 V (High-Pegel)¹. Im ersten Fall schaltet der untere Komparator ein, im zweiten der obere. Ansonsten liegt der Signalpegel im verbotenen Bereich oder der Signalweg ist offen.

Wie es im Komparator aussieht

Die Grundschtung des Pegelvergleichs ist der Differenzverstärker. Wichtig ist, dass bereits eine kleine Potentialdifferenz zwischen den Eingängen einen großen Spannungshub am Ausgang bewirkt. Im Idealfall ist es ein Umschalten zwischen zwei gegebenen Potentialen, beispielsweise zwischen Low = Masse und High = positiver Betriebsspannung. Die Grundsatzlösung besteht darin, eine so hohe Verstärkung zu verwirklichen, dass bereits niedrigste Differenzspannungen (Gegentaktspannungen) zwischen den Eingängen eine Übersteuerung hervorrufen. Der Verstärkungsfaktor einer einzelnen Differenzverstärkerstufe reicht oftmals nicht aus (Abbildung 6.5a). Zudem entspricht der ausgangsseitige Low-Pegel nicht der negativen Betriebsspannung. Abbildung 6.5b veranschaulicht eine Komparatorgrundschtung, in der dem eingangsseitigen Differenzverstärker eine weitere Verstärkerstufe und eine Ausgangsstufe nachgeordnet sind.

1: Die Werte des Beispiels entsprechen näherungsweise der TTL-Pegelspezifikation.

Abbildung 6.6 zeigt die sehr vereinfachte Innenschaltung eines Komparatorschaltkreises. Die Eingänge sollen hochohmig sein, um die Signalquellen nicht allzu sehr zu belasten. Hierzu ist eine Pufferstufe mit zwei PNP-Transistoren vorgesehen. Die Verstärkung der Schaltung von Abbildung 6.5b ist nicht immer hoch genug. Deshalb hat man zwei Differenzverstärkerstufen hintereinandergeschaltet. Die Arbeitsströme der Differenzverstärker werden von Konstantstromquellen geliefert. Hierdurch kann der Schaltkreis in einem weiten Bereich der Versorgungsspannungen eingesetzt werden, ohne dass sich die Kennwerte allzu sehr ändern.

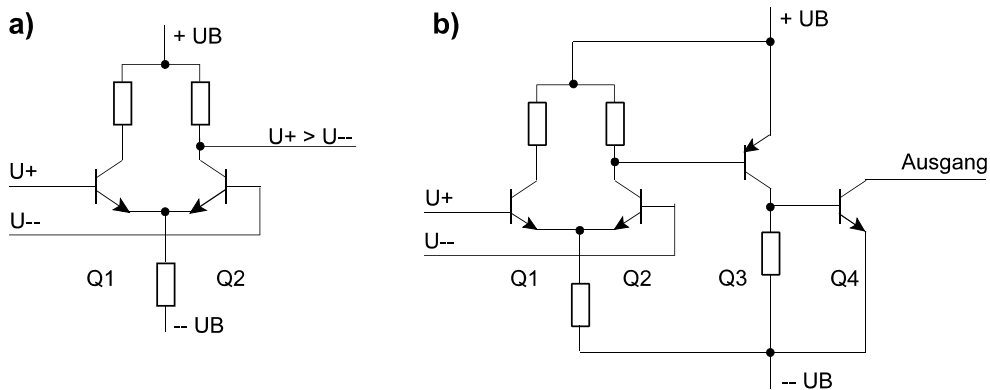


Abb. 6.5 Komparatorgrundschaltungen. a) Differenzverstärker. Ist $U_+ > U_-$, wird Q1 mehr aufgesteuert und Q2 weniger. Infolgedessen führt der Kollektor von Q2 ein höheres Potential. b) Komparator mit zusätzlicher Verstärkung. Der PNP-Transistor Q3 hat zwei Aufgaben: er dient als Verstärker, und er setzt den Ausgangspegel des Differenzverstärkers Q1, Q2 auf einen Pegel um, mit dem die Ausgangsstufe Q4 angesteuert werden kann. Je niedriger das Potential an der Basis von Q3, umso mehr wird er aufgesteuert. Je mehr Q3 aufgesteuert wird, desto mehr Strom kann in die Basis von Q4 fließen und somit auch Q4 aufsteuern. Q3 wird aufgesteuert, wenn $U_+ < U_-$. Demgemäß ergibt sich ein Low-Pegel am Ausgang. Ist hingegen $U_+ > U_-$, so wird Q3 gesperrt. Ein außen angeschlossener Pull-up-Widerstand ergibt dann einen High-Pegel.

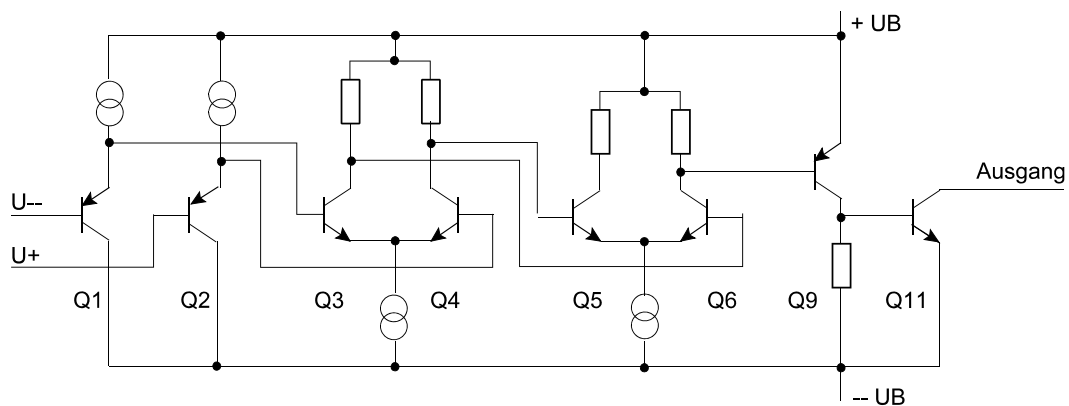


Abb. 6.6 Ein Komparator Schaltkreis. Q1, Q2 sind eingangsseitige Pufferstufen. Q3, Q4 und Q5, Q6 sind zwei hintereinandergeschaltete Differenzverstärker. Q9 und Q11 entsprechen Q3 und Q4 in Abbildung 6.5b.

Ausgangsstufen

Die typische Ausgangsstufe ist der einzelne Transistor (Open-Collector- oder Open-Drain-Ausgang). Ein solcher Komparator muss mit einem Arbeitswiderstand (Pull-up-Widerstand) beschaltet werden. Der Low-Pegel entspricht der negativen Betriebsspannung. Der High-Pegel ergibt sich durch Anschließen des Arbeitswiderstands an eine entsprechende positive Betriebsspannung. Die Steilheit der Low-High-Flanke hängt vom Arbeitswiderstand und von der kapazitiven Belastung ab (wie bei den Open-Collector-Gattern)..

Pegelzuordnung

- Eine positive Potentialdifferenz ($U_+ > U_-$) ergibt einen High-Pegel. Der Ausgangstransistor ist gesperrt; der High-Pegel wird über den Arbeitswiderstand gehalten.
- Eine negative Potentialdifferenz ($U_+ < U_-$) ergibt einen Low-Pegel. Der Ausgangstransistor ist durchgesteuert, so dass der Ausgang näherungsweise auf das Potential des jeweiligen Emitter- oder Sourceanschlusses gezogen wird (Masse oder negative Betriebsspannung).

Mehrere Komparatoren lassen sich im Sinne eines Wired AND zusammenschalten. Der gemeinsame Ausgang wird nur dann High, wenn an allen Komparatoren die U_+ -Eingänge auf einem höheren Potential liegen als die jeweiligen U_- -Eingänge. Bauelemente mit invertierter Pegelzuordnung haben üblicherweise ein Negationszeichen (Kreis, Punkt oder Raute) im Schaltsymbol.

6.2 Kennwerte

Betriebskennwerte

Spannungsverstärkung (Voltage Gain)

Die Spannungsverstärkung wird als Verhältnis der Ausgangsspannungsänderung zur Änderung der Differenzspannung an den Eingängen angegeben (typischerweise in V/mV; der Verstärkungsfaktor ergibt sich, indem an diesen Wert mit 1000 multipliziert).

Antwortzeit oder Verzögerungszeit (Response Time, Propagation Delay)

Dieser Kennwert gibt an, wie schnell der Komparator seinen Ausgangspegel umschaltet, wenn sich die Differenzspannung zwischen den Eingängen ändert. Wie lange das Umschalten dauert, hängt von den jeweiligen Betriebsbedingungen ab. Den Datenblattangaben liegen deshalb Messbedingungen zugrunde, die eine Art Industriestandard darstellen.

Wann hat der Ausgang umgeschaltet?

Hierbei bezieht man sich auf einen Schwellenwert zwischen den beiden Signalpegeln (Logic Threshold Value). Typische Schwellenwerte:

- die Hälfte des Signalhubes (CMOS),
- 1,5 V (TTL),
- VCC – 1,3 V (ECL).

Zu den Messbedingungen gehört weiterhin die Belastung des Ausgangs, beim typischen Open-Collector-Ausgang gegeben durch die Werte des Arbeitswiderstands und der Betriebsspannung, an die er angeschlossen ist (High-Pegel).

Dispersion

Dieser Fachbegriff bezeichnet die Abhängigkeit der Antwort- oder Verzögerungszeit von den jeweiligen Betriebsbedingungen:

- Overdrive Dispersion: Die Antwortzeit nimmt mit zunehmender Übersteuerung ab – sofern diese in Grenzen bleibt.
- Common Mode Dispersion: Je größer der Spannungshub an den Eingängen (Gleichtaktspannung), desto länger die Antwortzeit.
- Slew Rate Dispersion: Die Antwortzeit ist um so kürzer, je schneller sich die Differenzspannung zwischen den Eingängen ändert.

Eine gewisse Übersteuerung sollte sein, aber was zuviel ist, ist zuviel. Welchen Einfluss diese Betriebsbedingungen tatsächlich haben, hängt auch von der Betriebsspannung ab. Je geringer die Dispersion, desto besser der Komparator.

Wie werden die Eingänge umgeschaltet?

Um die Antwortzeit zu messen, schaltet man die Differenzspannung zwischen den Eingängen schlagartig um (Spannungssprung). Abbildung 6.7 veranschaulicht das Prinzip. Der eine Eingang wird auf einen Referenzpegel gelegt (üblicherweise auf Massepotential), am anderen liegt zunächst ein Potential, das den Ausgang sicher auf dem jeweiligen Pegel hält. Dann wird umgeschaltet. Die Potentialänderung beim Umschalten setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, aus dem Spannungssprung (Input Step) und der Übersteuerung (Overdrive). Der Spannungssprung führt vom anfänglichen Pegel bis exakt zur Referenzspannung, die Übersteuerung geht noch etwas darüber hinaus. Ein typischer Industriestandard (Abbildung 6.8): Amplitude des Spannungssprungs (Step Size) = 100 mV, Übersteuerung (Overdrive) = 10 mV. Eine unter solchen Bedingungen gemessene Antwortzeit ist lediglich ein Orientierungswert zum Ausschauen. Die tatsächlichen Schaltzeiten hängen von mehreren Einflussgrößen ab.

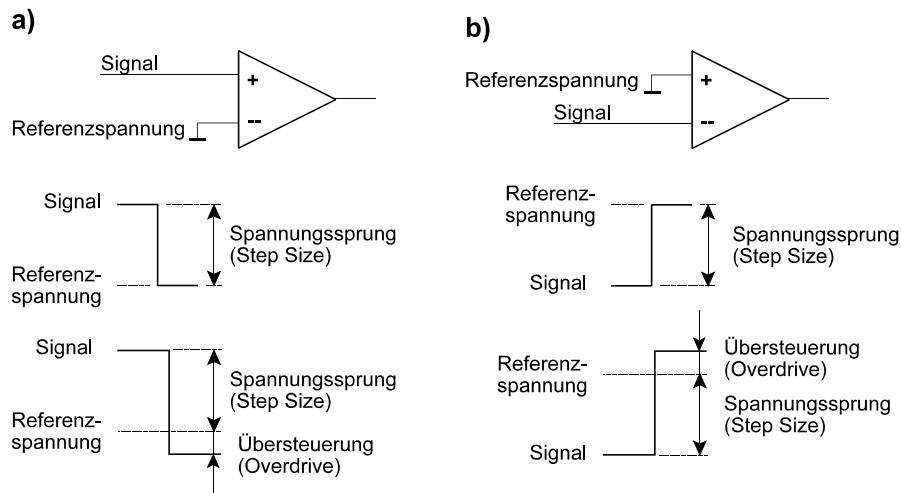


Abb. 6.7 Unter diesen Bedingungen wird die Antwortzeit gemessen. a) Umschalten am positiven Eingang. Der Ausgang schaltet von High nach Low. b) Umschalten am negativen Eingang. Der Ausgang schaltet von Low nach High. Der Spannungssprung führt vom anfänglichen Eingangspegel bis zur Gleichheit mit der referenzspannung, die Übersteuerung noch etwas darüber hinaus.

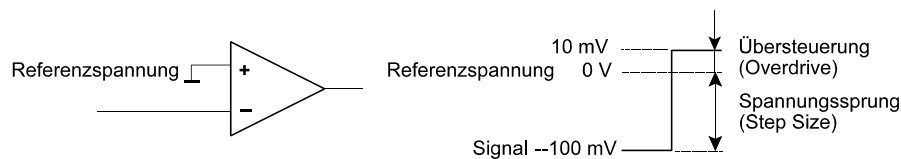


Abb. 6.8 Ein typischer Industriestandard der Antwortzeitmessung (am Beispiel des negativen Eingangs).

Eingangskennwerte (1) – wann schaltet der Komparator um?

Eingangs-Offsetspannung (Input Offset Voltage)

Die Offsetspannung ist der Betrag der zwischen beiden Eingangsspannungen (Differenzspannung, Gleichtaktspannung), die zum Umschalten des Ausgangs notwendig ist. Die Offsetspannung kennzeichnet die Breite des linearen Bereichs (mit anderen Worten, der Schaltschwelle) und damit die Genauigkeit und Empfindlichkeit des Komparators.

Eingangs-Offsetstrom (Input Offset Current)

Das ist der Betrag der Differenz der Eingangsströme, die fließen müssen, um den Ausgang zu schalten.

Für beide Offsetwerte gelten bestimmte Messbedingungen, beispielsweise ein ausgangsseitiger Spannungshub von 1 V bei einem Ausgangsstrom von 1 mA. Den Angaben im Datenblatt liegen die ungünstigsten Werte der Eingangsimpedanz und der Spannungsverstärkung zugrunde.

Eingangsruhestrom (Input Bias Current)

Der Eingangsruhestrom ist der Durchschnittswert der beiden Eingangsströme.

Eingangskennwerte (2) – welche Pegel dürfen an den Eingängen anliegen?*Eingangsspannung (Input Voltage)*

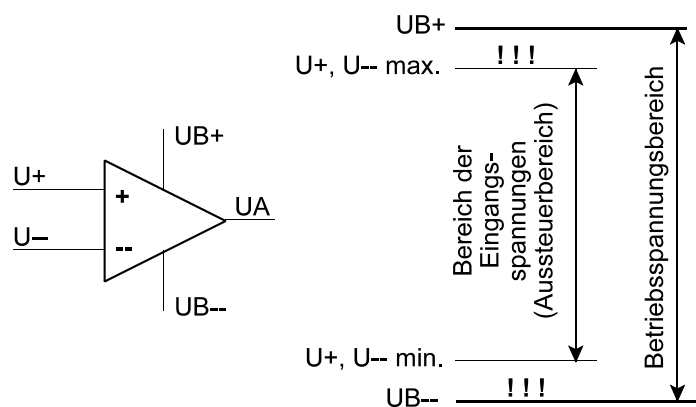
Dieser Kennwert gehört zu den absoluten Grenzwerten (Absolute Maximum Ratings). Er gibt an, welche Eingangsspannung der Schaltkreis aushält. Bei manchen Typen entspricht der jeweils anliegenden Betriebsspannung, wobei üblicherweise die positive Betriebsspannung um 0,7 V über- und die negative um $-0,7$ V unterschritten werden darf. Diese Auslegung ermöglicht es, die Eingänge mit Klammerdioden zu schützen.

Aussteuerbereich (Input Voltage Range, Input Common-Mode Range)

Dieser Kennwert gibt an, in welchem Bereich der Eingangsspannungen der Komparator richtig arbeitet.

Eingangs- und Betriebsspannungen

Der typische Aussteuerbereich liegt stets zwischen den beiden Betriebsspannungen (Abbildung 6.9). Datenblattwerte beziehen sich auf bestimmte Betriebsspannungen (beispielsweise ± 15 V) oder auf bestimmte Abstände von den Betriebsspannungen.



!!!: Diese Bereiche nicht ausnutzen.

Abb. 6.9 So sollte der Komparator betrieben werden. Korrekte Vergleichsergebnisse erhält man nur dann, wenn die Eingangsspannungen stets innerhalb des Bereichs der Betriebsspannung bleiben (Aussteuerbereich). Die jeweiligen Einzelheiten stehen im Datenblatt.

Spitzfindigkeiten

Welche Vergleichsaussage liefert der Komparator, wenn Eingangsspannungen nicht im vorgeschriebenen Aussteuerbereich liegen? Das hängt vom Schaltkreistyp und den Spannungswerten ab. Was kann vorkommen?

- Die Vergleichsaussage bleibt nach wie vor richtig.
- Die Vergleichsaussage kehrt sich um (Output Phase Reversal).
- Die Vergleichsaussage ist undefiniert.
- Der Schaltkreis geht kaputt.

Die meisten Schaltkreise funktionieren nicht mehr, wenn auch nur eine Eingangsspannung negativer ist als die negative Betriebsspannung. Wenn zu viel Strom fließt, gehen sie kaputt. Enthält der Schaltkreis mehrere Komparatoren, so kann ein inkorrektes Signal an einem der Eingänge auch die Funktion der anderen Komparatoren beeinträchtigen.

Praxistipps:

1. Einsatzfälle, in denen es nicht so sehr auf Genauigkeit ankommt. Wichtig ist nur, dass das Vergleichsergebnis immer korrekt bleibt. Beispiel: das Wandeln von Logikpegeln mit Low = Massepotential = negativer Betriebsspannung. Weil so etwas oft vorkommt, sind viele Schaltkreise für solche Betriebsfälle ausgelegt². Damit sich eine zutreffende Vergleichsaussage ergibt, genügt es, wenn eine der Eingangsspannungen im zulässigen Bereich liegt und die andere nicht negativer ist als die negative Betriebsspannung. Trotzdem: Im Datenblatt genau nachsehen – vor allem die Erläuterungen der Messbedingungen und die zugehörigen Fußnoten.
2. Betriebsfälle der Art eingeschaltete Umgebung und ausgeschalteter Komparator (Teilabschaltung, Partial Power Down). Dann ist dafür zu sorgen, dass nichts passiert (beispielsweise durch Strombegrenzung).
3. Ansonsten immer im zulässigen Bereich bleiben. Manmal sind für Bereichsüberschreitungen besondere Funktionseigenschaften im Datenblatt zugesichert. Man sollte sie nicht ausnutzen, denn es kann vorkommen, dass Nachfolgetypen oder ähnliche Schaltkreise anderer Hersteller diese Eigenschaften nicht aufweisen.

Ausgangskennwerte

Die Ausgangsstufe soll wie eine Schaltstufe wirken, also zwischen zwei Signalpegeln (Low und High) umschalten. Die zugehörigen Kennwerte ähneln deshalb denen der Digitalschaltkreise. Im Gegensatz zum reinen Digitalschaltkreis hängt aber das Verhalten der Ausgangsstufe von der (analogen) Ansteuerung der Eingänge ab. Die Werte gelten deshalb nur unter den jeweiligen Messbedingungen.

Die typische Ausgangsstufe ist – dem Prinzip nach – ein einzelner Transistor (Open Collector- oder Open-Drain-Ausgang). Es sind beide Schaltzustände zu betrachten:

2: Eine wichtige Anwendungseigenschaft: der Komparator kann – bei Speisung mit positiver Betriebsspannung gegen Masse – auch noch Eingangspegel von 0 V (Massepotential) korrekt auswerten (Ground Sensing in Single Ended Applications).

1. Ausgeschaltet (High-Pegel)

Der Pegel wird über den außen anzuschließenden Arbeitswiderstand (Pull-up-Widerstand) gehalten. In diesem Betriebsfall sind zwei Grenzwerte von Bedeutung:

- Welche Spannung hält die Stufe aus? Entweder entspricht der Höchstwert der maximalen Betriebsspannung (s. unten) oder es ist ein eigener Höchstwert angegeben, der beispielsweise als *Output to Negative Supply Voltage* bezeichnet wird .
- Welcher Strom fließt durch den ausgeschalteten Transistor (Leckstrom)? Der Kennwert heißt *Output Leakage Current*. Er wird auf eine bestimmte Differenzspannung zwischen den Eingängen und auf eine bestimmte Ausgangsspannung bezogen.

2. Eingeschaltet (Low-Pegel)

Hier ist der Ausgangstransistor durchgesteuert. Die grundsätzlichen Fragen:

- Welchen Strom kann der Transistor aufnehmen (Treibvermögen)?
- Welche Spannung fällt dabei über dem Transistor ab (maximaler Low-Pegel)?

Beides hängt miteinander zusammen. Der eine Parameter ist der Kennwert, der andere gehört zu den Messbedingungen. Demgemäß gibt es zwei Kennwerte:

1. Maximaler Ausgangsstrom (*Output Sink Current*)

Dieser Kennwert betrifft den maximalen Laststrom, den die Ausgangsstufe aufnehmen kann, wenn die Eingänge mit einer bestimmten Differenzspannung angesteuert werden und eine bestimmte Ausgangsspannung nicht überschritten wird. Der Kennwert sagt im Grunde aus, welche Stromstärke der Transistor aufnehmen kann, wenn der Komparator definiert mit $U_+ < U_-$ angesteuert wird (Bedingung für Low am Ausgang) und wenn der Low-Pegel etwas höher sein darf (z. B. 1,5 V; der genaue Wert gehört zu den Messbedingungen).

2. Sättigungsspannung (*Saturation Voltage*)

Dieser Kennwert gibt an, welcher Low-Pegel am Ausgang auftritt, wenn die Eingänge mit einer bestimmten Differenzspannung angesteuert werden. Der Kennwert sagt im Grunde aus, welche Differenzspannung wenigstens erforderlich ist, um einen bestimmten Low-Pegel mit Sicherheit zu halten. Aus den Messbedingungen im Datenblatt kann man zweierlei ablesen:

- welche Differenzspannung wenigstens erforderlich ist, um einen bestimmten Low-Pegel mit Sicherheit zu halten, wenn ein – aus Sicht der Anwendungspraxis – angemessener Strom durchfließt,
- welchen Laststrom die Ausgangsstufe höchstens aufnehmen kann, wenn sich ein Low-Pegel = Sättigungsspannung einstellen soll.

Versorgungskennwerte

Maximale Betriebsspannung (Total Supply Voltage)

Dieser Kennwert gehört zu den absoluten Grenzwerten (Absolute Maximum Ratings). Er gibt an, welche Spannung zwischen den Betriebsspannungsanschlüssen höchstens anliegen darf.

In welchem Bereich der Betriebsspannung der Schaltkreis zweckmäßigerweise eingesetzt wird, ergibt sich aus den Messbedingungen der Betriebskennwerte (Electrical Characteristics) und den Anwendungshinweisen (Application Hints o. ä.).

Leistungsaufnahme (Power Consumption)

Die Leistungsaufnahme hängt von den Eingangsspannungen ab. Der Kennwert betrifft den unbelasteten Komparator im ungünstigsten Betriebsfall.

Betriebsstromaufnahme (Supply Current)

Der durch die Betriebsspannungsanschlüsse fließende Strom ändert sich in Abhängigkeit von der Betriebsspannung und von den Eingangsspannungen. Der Kennwert betrifft den unbelasteten Komparator im ungünstigsten Betriebsfall (maximale Betriebsspannung, ungünstigste Pegel an den Eingängen).

6.3 Wenn der Komparator umschaltet

6.3.1 Die Differenzspannung im linearen Bereich

Ein Komparator sollte so arbeiten wie in Abbildung 6.10 gezeigt. Verbleibt aber die Differenzspannung längere Zeit im linearen Bereich, kann der Ausgang zeitweise undefinierte Pegel annehmen. Da die Spannungsverstärkung sehr hoch ist, kann der Komparator ins Schwingen geraten (Abbildung 6.11).

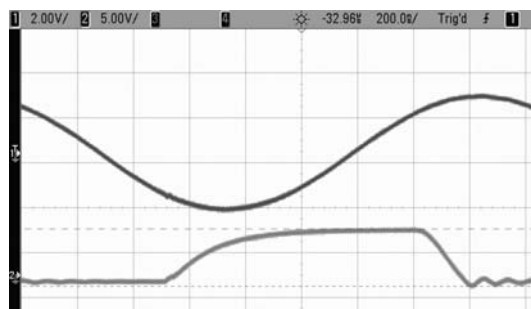


Abb. 6.10 So sollte es sein. Hier wird ein sinusförmiges Eingangssignal in einen Rechteckimpuls gewandelt. Dass die Low-High-Flanke vergleichsweise langsam ansteigt, ist in Ordnung; es ist eine typische Eigenart des Open-Collector-Ausgangs. Zeitraster: 200 ns/Div.

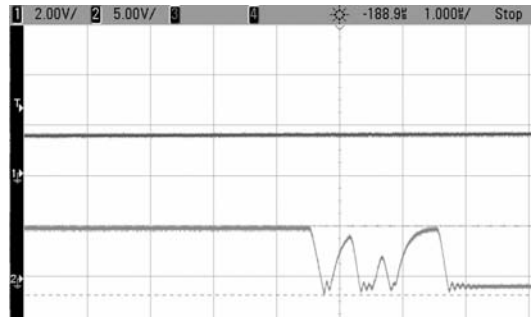


Abb. 6.11 Hier gehen dem Umschalten des Ausgangs einige Schwingungen voraus. Es sind mehrere MHz. Zeitraster: 1 μ s/Div.

Abbildung 6.12 veranschaulicht das Problem. Ein Eingangssignal wird mit einer Referenzspannung verglichen. Die Schaltschwelle liegt im linearen Bereich $V_{REF} \pm V_{OS}$. Verbleibt die Eingangsspannung längere Zeit in diesem Bereich, entstehen Schwingungen am Ausgang (Abbildung 6.12a). Wird hingegen der lineare Bereich in einer so kurzen Zeit durchlaufen, dass der Komparator gar nicht so schnell hin- und herschalten kann, ergibt sich nur eine einzige Signalflanke (Abbildung 6.12b).

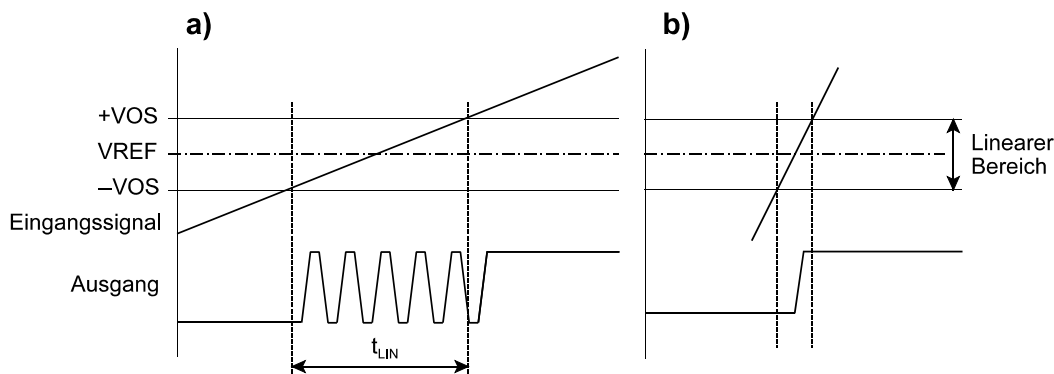


Abb. 6.12 Das Ausgangssignal in Abhängigkeit vom Verlauf der Differenzspannung.

Gemäß Abbildung 6.12b dürfte es dann nicht zu Schwingungen kommen, wenn die Zeit, in der das Signal den linearen Bereich durchläuft, kürzer ist als die Antwortzeit des Komparators:

$$t_{LIN} < t_{RESP}$$

Damit ergibt sich die minimale Anstiegsgeschwindigkeit zu

$$\frac{2 \cdot V_{OS}}{t_{RESP}}$$

Das ist aber nur eine ungenaue Übersichtsrechnung, weil sich beide Parameter im laufenden Betrieb ändern können.

Manchmal ändert sich die Differenzspannung nur sehr langsam (man denke u. a. an Temperatursensoren wie beispielsweise Heiß- oder Kaltleiter). Dabei kann der Signalverlauf so schwanken, dass der lineare Bereich nicht in einer Richtung durchlaufen, sondern in Gegenrichtung wieder verlassen wird (Abbildung 6.13). Hierdurch können sich vielfältige Schwingungserscheinungen ergeben (Abbildung 6.14). Ähnliche Ausgangssignalverläufe entstehen, wenn das Eingangssignal von Störungen überlagert ist.

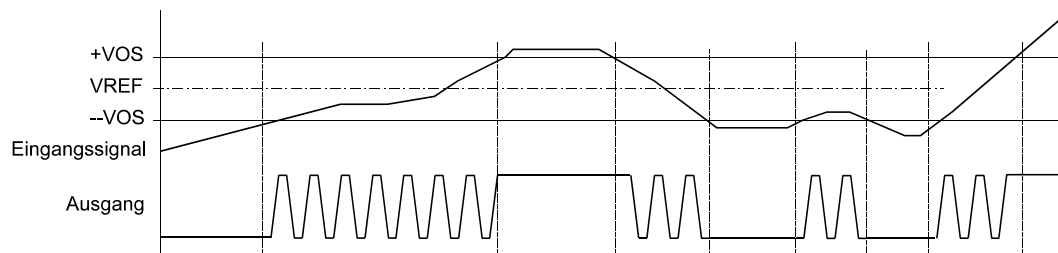


Abb. 6.13 Ein sehr langsamer Eingangsspannungsverlauf. Es geht hin und her...

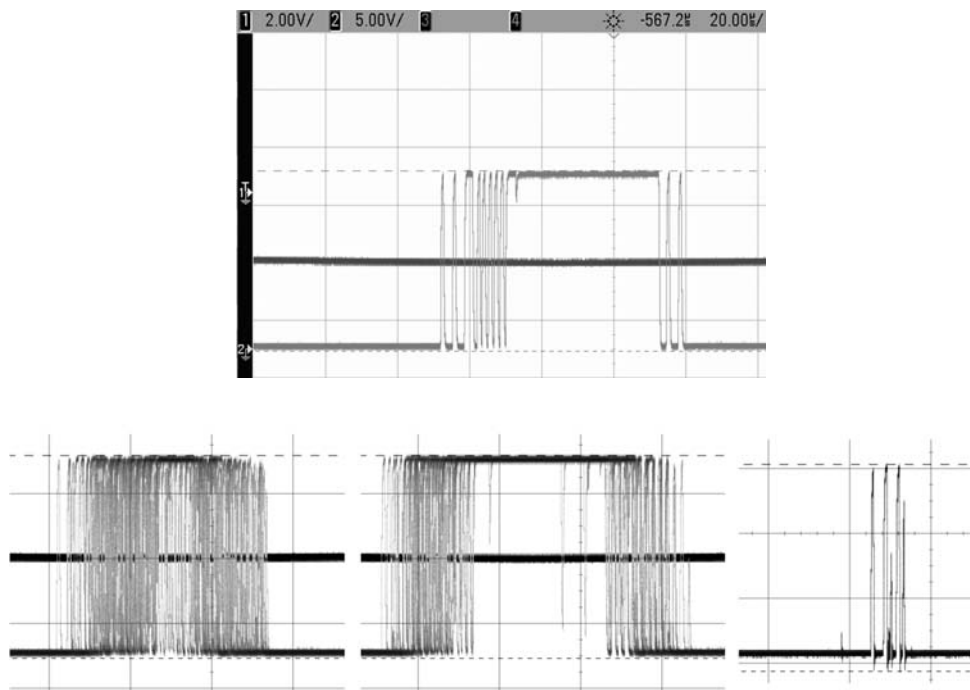


Abb. 6.14 Schwingungen am Ausgang eines Komparators – eine kleine Auswahl aus der Praxis. Zeitraster : 20 μ s/Div.

Welchen Schaden können solche Schwingungen anrichten?

Es kommt darauf an, wie sie aussehen und wie der Komparator eingesetzt wird. Aufgrund der Schwingungen können die folgenden Fehlermechanismen wirksam werden:

- Störstrahlung,
- Störeinkopplung auf benachbarte Leitungswege,
- Beeinflussung der Signalquellen,
- inkorrekte Auswertung der Ausgangssignale
- Zerstörung des Schaltkreises.

Es gibt mehrere Grundsatzlösungen:

1. Die Schwingungen werden vermieden. Hierzu wird eine sogenannte Hysterese eingeführt (Näheres im folgenden Abschnitt).
2. Die Schwingungen werden hingenommen. Mit nachgesetzten Fangschaltungen werden saubere Signale erzeugen (Impulsbewertung, Latching).
3. Die Schwingungen werden ausgeblendet, indem der Komparator nach dem Abtastprinzip betrieben wird (Strobing).

Die Lösungen 2 und 3 kommen dann in Betracht, wenn es möglich ist, die Schwingungen auf kurze Signalwege zu beschränken und zu vermeiden, dass Störungen in andere Signale und in die Stromversorgung eingekoppelt werden. Sie laufen darauf hinaus, das Umschalten des Komparators lediglich zu registrieren – sei es durch Fangen (Latching) oder durch Abtasten (Strobing) – und dann bedarfsweise zu untersuchen, ob es sich um ein korrektes Umschalten handelt oder nicht (Impulsdauerbewertung).

6.3.2 Die Hysterese

Dieser Begriff (griech. = zurückbleiben) bezeichnet ein Verändern der Schaltschwelle in Abhängigkeit vom Ausgangssignal. Hierdurch soll vermieden werden, dass die Differenzspannung an den Eingängen längere Zeit im linearen Bereich verweilt. Bei jedem Schaltvorgang wird die Schaltschwelle so verändert, dass, um wieder zurückzuschalten, eine größere Spannungsauslenkung in die Gegenrichtung erforderlich ist. Schaltet das Ausgangssignal ein, wird die Schaltschwelle vermindert, schaltet es aus, wird sie wieder erhöht. Damit wird verhindert, dass kleine Änderungen der Differenzspannung sofort zum Zurückschalten und damit zu Schwingungen führen.

Es sind zwei Wirkungsmechanismen, die Schwingungen hervorrufen können:

1. Die Differenzspannung steigt an oder fällt ab, ohne zwischenzeitlich die Richtung zu wechseln (monotoner Spannungsverlauf), verbleibt aber zu lange im linearen Bereich (zu langsame Signaländerung; vergleiche Abbildung 6.12). Die Schwingungen entstehen vor allem aufgrund der kapazitiven Rückkopplung vom Ausgang auf den Eingang und der hohen Spannungsverstärkung. Die Schwingfrequenz ist hoch (mehrere...viele MHz).

2. Die Differenzspannung wechselt immer wieder zwischen Anstieg und Abfall (nichtmonotoner Spannungsverlauf), so dass beim Umschalten der lineare Bereich mehrfach erreicht und auch wieder verlassen wird (vergleiche Abbildung 6.13). Typische Ursachen sind extrem langsame Signalverläufe und überlagerte Störungen. Hinreichend intensive Störüberlagerungen föhrendazu, dass der Ausgang hin- und herschaltet; sie ergeben praktisch eine Art Prelleffekt, ähnlich dem Prellen (Bouncing) eines Kontakts. Bei langsamen Schwankungen an den Eingängen können diese Prellimpulse mit den selbst erzeugten hochfrequenten Schwingungen überlagert werden.

Das Hystereseband

Das Ausgangssignal des Komparators schaltet von Low nach High, wenn die Differenzspannung am Eingang eine erste Schaltschwelle U_{ON} überschreitet, und es schaltet von High nach Low zurück, sobald die Differenzspannung am Eingang eine zweite Schaltschwelle U_{OFF} unterschreitet. Der Bereich zwischen U_{ON} und U_{OFF} wird als Hystereseband bezeichnet, manchmal auch einfach nur als Hysterese (Abbildung 6.15 bis 6.17).

$$\text{Hystereseband } U_{HYS} = \Delta U_{IN} = U_{ON} - U_{OFF}$$

Dabei muss $U_{OFF} < U_{ON}$ sein. Die Bezeichnungen richten sich hier nach dem Zustand, der beim Umschalten jeweils erreicht werden soll. U_{ON} = Schaltschwelle zum Einschalten (Ausgang schaltet von Low nach High), U_{OFF} = Schaltschwelle zum Ausschalten (Ausgang schaltet von High nach Low).

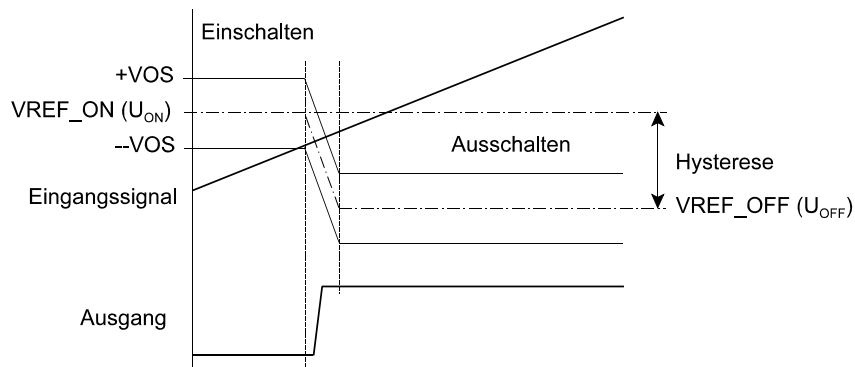


Abb. 6.15 Hysterese am Beispiel eines monoton ansteigenden Eingangssignals. Ist das Eingangssignal in den linearen Bereich eingetreten und hat infolgedessen der Ausgang eingeschaltet, wird die Schaltschwelle soweit abgesenkt, dass sich das Signal nunmehr mit Sicherheit oberhalb des linearen Bereichs bewegt. Hierdurch wird der Komparator soweit übersteuert, dass er gar nicht mehr ins Schwingen kommen kann.

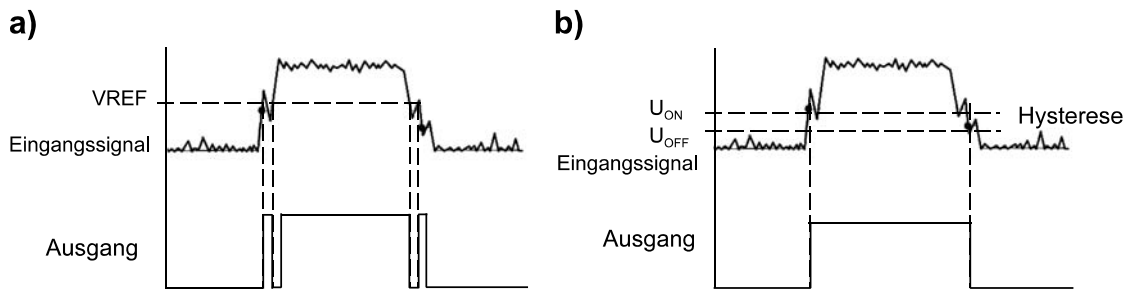


Abb. 6.16 Hysterese am Beispiel eines mit Störungen überlagerten Eingangssignals. a) Infolge der Störungen wird der lineare Bereich beim Umschalten mehrmals durchlaufen. Es entstehen Prellimpulse am Ausgang. b) Nach dem ersten Einschalten wird die Schaltschwelle soweit abgesenkt, dass die überlagerten Störungen kein erneutes Umschalten bewirken können. Ausgeschaltet wird erst dann, wenn das Eingangssignal die zweite Schaltschwelle unterschreitet. Dann wird die Schaltschwelle wieder erhöht.

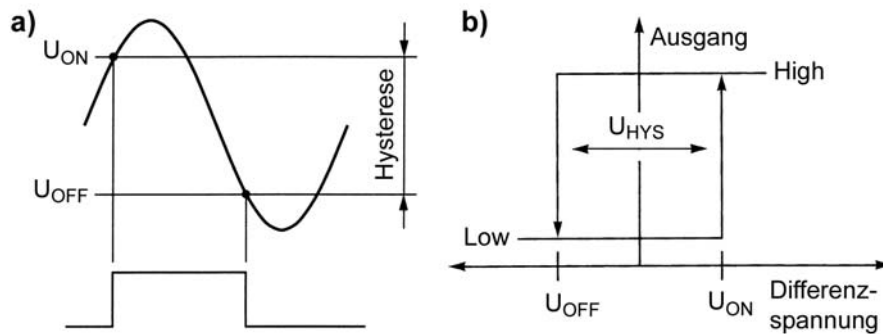


Abb. 6.17 Zum Begriff des Hysteresebandes. a) Die Schaltschwellen und der Ausgangsimpuls U_{ON} = Schaltschwelle von Low nach High (Einschalten), U_{OFF} = Schaltschwelle von High nach Low (Ausschalten). b) Das Hystereseband (U_{HYS}) in der Ausgangskennlinie (: Differenzspannung zwischen den Eingängen gegen Ausgangspegel).

Wie breit soll das Hystereseband sein?

Es kommt darauf an, wofür der Komparator eingesetzt wird und wie die Eingangssignale aussehen (Abbildung 6.18). Wozu soll eine Hysterese eingeführt werden? Geht es um die Eingangssignale und den Komparator, um die Ausgangssignale oder um Genauigkeit?

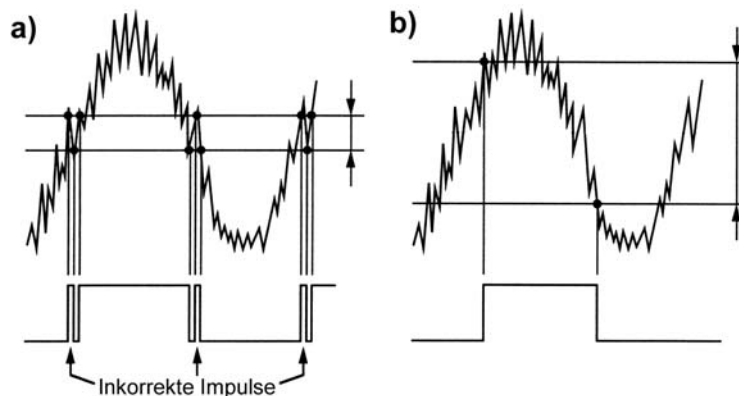


Abb. 6.18 Hysteresebänder. Das Eingangssignal ist mit intensiven Störungen überlagert. a) Schmales Hystereseband. Beide Schaltschwellen werden mehr als einmal durchlaufen. Ohne Impulsdauerbewertung (Entprellung) ist das Ausgangssignal offensichtlich unbrauchbar. b) Breites Hystereseband (deutlich breiter als die Störampplitude).

Die Hysterese soll Folgeschäden abwenden

Es kommt lediglich darauf an den Komparator zu schützen und Rückwirkungen auf vorgeordneten Schaltungen zu vermeiden (das betrifft u. a. Signalquellen mit höheren Impedanzen, Analogschalter und längere Signalwege). Hierzu genügt es, die hochfrequenten Schwingungen zu vermeiden. Prellimpulse ähnlich Abbildung 6.18a schaden nicht grundsätzlich. Sie lassen sich mit Filterschaltungen, Digitalschaltungen oder Software beseitigen³. In solchen Fällen kann schon ein schmales Hystereseband helfen.

Die Ausgangssignale sollen prellfrei sein

Es sollen nur saubere Ausgangsimpulse abgegeben werden (wie in Abbildung 6.18b). Um diese Aufgabe allein durch die Hysterese zu lösen, muss das Hystereseband breiter sein als die ungünstigste Störampplitude. Ein zu breites Hystereseband kann aber die Genauigkeit der Signalerfassung beeinträchtigen (der Impuls erscheint breiter als er eigentlich sein dürfte). Praxistipp: Nicht versuchen, die Wirkung der Störungen mittels eines besonders breiten Hysteresebandes wegzuschaffen, sondern sich anderweitig behelfen, beispielsweise mit Impulsen ähnlich Abbildung 6.18a leben und eine Impulsdauerbewertung in Hard- oder Software vorsehen oder Störungen, die dem Signal überlagert sind, eingangsseitig ausfiltern (Tiefpass zum Glätten des Signalverlaufs).

Der Komparator soll präzise umschalten

Je breiter das Hystereseband, desto geringer die Genauigkeit (Abbildung 6.19). Ist die Eingangsspannung größer oder kleiner als die Referenzspannung? Ohne Hysterese ist diese Aussage mit einem Fehler \pm Offsetspannung behaftet. Mit Hysterese kommt das Hystereseband hinzu:

3: Prinzip der Entprellung. Vgl. das Entprellen (Debouncing) von Kontakten.

- Eine Eingangsspannung $> U_{ON} + V_{OFFS}$ bewirkt einen High-Pegel (Einschalten).
- Eine Eingangsspannung $< U_{OFF} - V_{OFFS}$ bewirkt einen Low-Pegel (Ausschalten).

Der Fehler liegt somit im Bereich von $U_{OFF} - V_{OFFS}$ bis $U_{ON} + V_{OFFS}$.

Kunstschaltungen (beispielsweise mit zwei Komparatoren) sind aufwendig und haben eigene Toleranzen. Deshalb hält man oftmals das Hystereseband so schmal wie möglich (mit anderen Worten, gerade so breit, dass keine hochfrequenten Schwingungen entstehen). Ohne Versuche geht es nicht. Alles hängt wechselseitig voneinander ab, und der Schaltungsaufbau spielt eine wichtige Rolle.

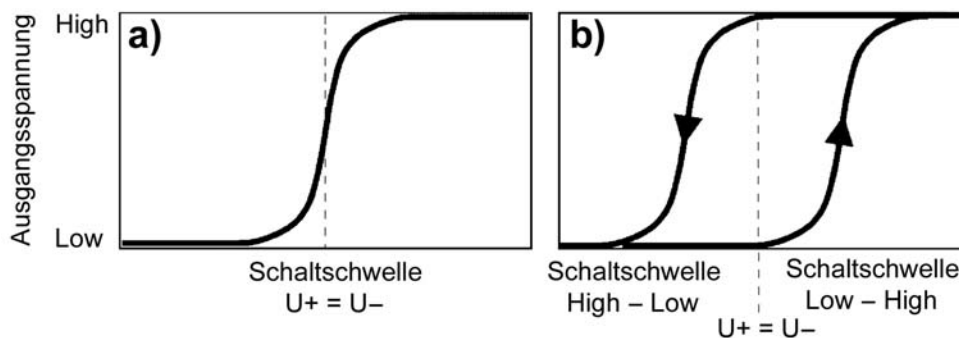


Abb. 6.19 Schaltkennlinien (nach [6.8]). Ohne Hysterese (a) schaltet der Komparator präziser als mit (b).

Praxistipps:

1. Ein naheliegendes Minimum: Hysterese gleich der spezifizierten Offsetspannung.
2. Richtwert zum Experimentieren: 50 bis 100 mV oder zwei- bis dreimal die höchste Stör-Amplitude.
3. Im Versuch mit einem etwas weiteren Hystereseband beginnen (so, dass mit Sicherheit keine hochfrequenten Schwingungen auftreten) und die Hysterese dann soweit vermindern, bis es zu schwingen anfängt. Endgültige Hysterese = $3 \cdot$ Versuchsergebnis⁴.
4. Die Datenblätter und Anwendungsschriften der Hersteller enthalten nähere Hinweise, auch auf Trick- und Kunstschaltungen.
5. Manchmal ist es eine Alternative, auf die Hysterese ganz zu verzichten und das Problem mit anderen Mitteln zu lösen.

6.3.3 Grundschaltungen

Manche Schaltkreise haben eine eingebaute Hysterese. Wenn sie nicht ausreicht oder wenn nichts eingebaut ist, braucht man zusätzliche Bauelemente. Abbildung 6.20 zeigt eine naheliegende Implementierung des Prinzips. Die beiden Schaltschwellen werden durch zwei Referenzspannungen vorgegeben. Diese werden in Abhängigkeit vom Ausgangspegel über

4: Das Versuchsergebnis hängt sehr vom Schaltungsaufbau (Layout) ab. Es kann sein, dass sich mit der endgültigen Leiterplatte andere Werte ergeben als mit dem Musteraufbau.

einen Analogmultiplexer ausgewählt. Die beiden Spannungen, die die Schaltschwellen bestimmen, kann man mit drei Widerständen erzeugen (Abbildung 6.21). Eine Alternative zum Analogschalter besteht darin, die Referenzspannung mit Transistoren umzuschalten (Abbildung 6.22 und 6.23).

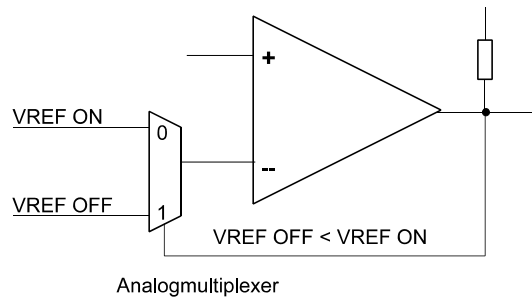


Abb. 6.20 Komparatorschaltung mit Hysterese. Eine naheliegende Prinziplösung. $V_{REF\ ON}$ = Referenzspannung zum Einschalten, $V_{REF\ OFF}$ = Referenzspannung zum Ausschalten.

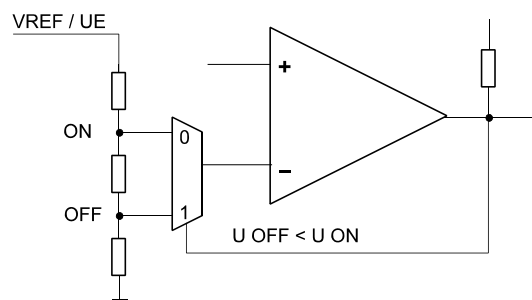


Abb. 6.21 Die Schaltschwellen werden mit einem Spannungsteiler erzeugt, der aus drei Widerständen besteht. An den Spannungsteiler kann wahlweise die Referenzspannung oder die zu vergleichende Eingangsspannung angelegt werden*.

Die Funktionsweise leuchtet ohne weiteres ein. Die Schaltungen sind aber vergleichsweise aufwendig. Typische Praxisschaltungen beruhen auf einer positiven Rückkopplung, die mit Widerständen allein auskommt.

Eine positive Rückkopplung muss die Wirkungen an den Eingängen verstärken. Ein High-Pegel am Ausgang muss also auf den positiven Eingang zurückgeführt werden. Wie sich der Komparator verhält, hängt davon ab, welche Signale man an welchen Eingang anschließt (Abbildung 6.24):

- a) Der nichtinvertierende Komparator. Der Ausgang soll auf High schalten, wenn die Eingangsspannung höher ist als die Referenzspannung. Also muss die Eingangsspannung an den positiven Eingang und die Referenzspannung an den negativen. Die Rückkopplung beeinflusst die Eingangsspannung.

- b) Der invertierende Komparator. Der Ausgang soll auf High schalten, wenn die Referenzspannung höher ist als die Eingangsspannung. Also muss die Referenzspannung an den positiven Eingang und die Eingangsspannung an den negativen. Die Rückkopplung beeinflusst die Referenzspannung.

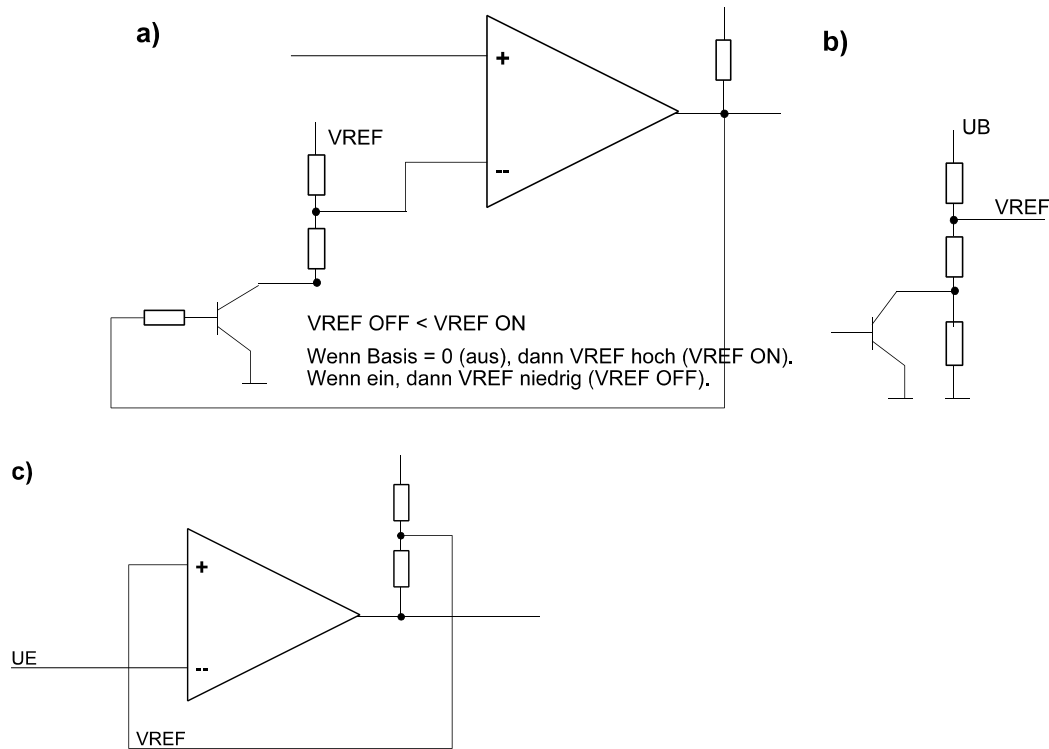
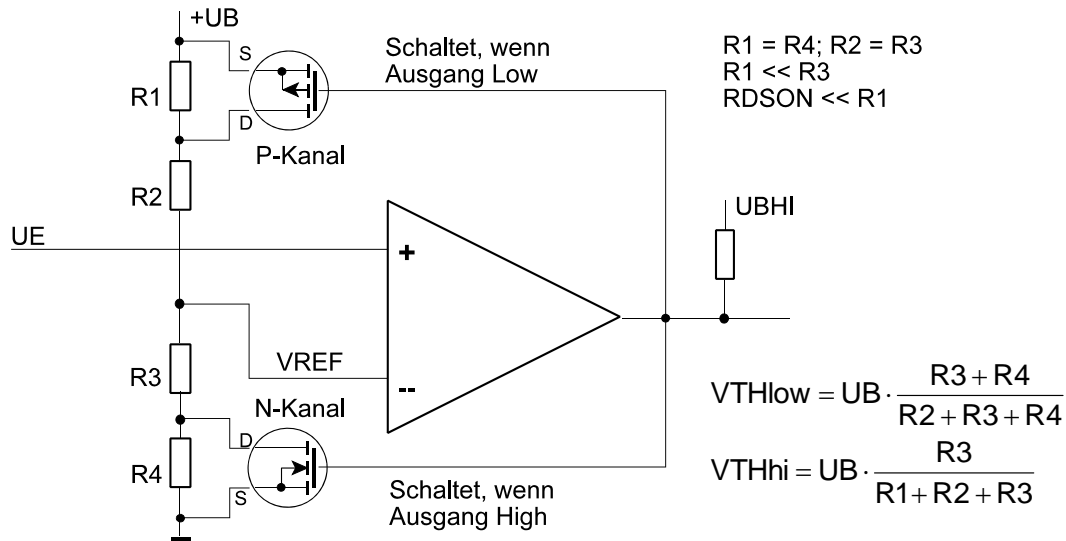


Abb. 6.22 Zum Umschalten der Referenzspannungen genügt auch eine Transistorstufe. Wird der Transistor nicht angesteuert (Low-Pegel an der Basis), ist die Referenzspannung höher. Wird der Transistor durchgesteuert (High-Pegel an der Basis), ergibt sich eine niedrigere Referenzspannung gemäß Spannungsteilerverhältnis. a) Grundschaltung. b) Gewinnung der Referenzspannung über Spannungsteiler (z. B. aus der allgemeinen Betriebsspannung). c) Ausnutzung der Ausgangsstufe (Open Collector oder Open Drain) zum Umschalten der Referenzspannung. Hierzu müssen Referenz- und Eingangsspannung gegenüber a) vertauscht werden. Deshalb verhält sich der Komparator invertierend (Grundschaltung des invertierenden Schmitt-Triggers).



Schwellenwert für Low => High = Teiler aus R2, R3, R4 (höheres Potential)
 Schwellenwert für High => Low = Teiler aus R1, R2, R3 (niedrigeres Potential)

Abb. 6.23 Umschalten der Referenzspannung mit Feldeffekttransistoren. Führt der Ausgang Low-Pegel, wird R1 überbrückt. Hierdurch ergibt sich eine höhere Referenzspannung. Führt der Ausgang High-Pegel, wird R4 überbrückt, wodurch die Referenzspannung niedriger wird.

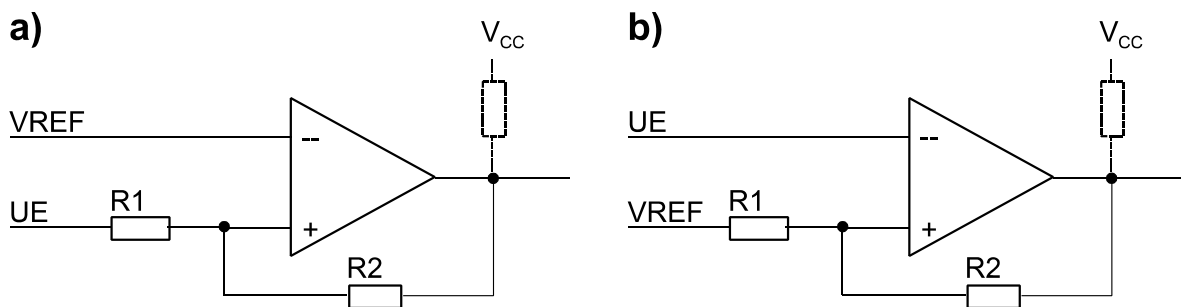


Abb. 6.24 Die Grundschaltung der Hysterese. Komparator a) nichtinvertierend, b) invertierend.

Der Minuseingang ist immer frei, der Plus Eingang immer mit den Rückkopplungswiderständen beschaltet. Die Signalquelle am Plus Eingang sieht eine vergleichsweise niederohmige Impedanz, die sich sprunghaft ändert.

Praxistipps:

1. Es ist die Frage, welches Eingangssignal eine derartige Belastung verträgt. Wenn es eines gibt, dieses an den positiven Eingang anschließen, gleichgültig welches Komparatorverhalten herauskommt. Negation auf der digitalen Ausgangsseite ist billiger als Pufferung auf der analogen Eingangsseite.

2. Diese Überlegung gilt sinngemäß für den Fall, dass ein Signal an mehrere Komparatoren anzuschließen ist. Dieses Signal muss an die Minuseingänge. Den Plusseingängen müsste man einzelne Puffer vorschalten (teuer). Bei gemeinsamer Referenzspannung wählt man also die nichtinvertierende, bei gemeinsamer Eingangsspannung die invertierende Schaltung.

6.3.4 Schmitt-Trigger

Schmitt-Trigger waren die ersten elektronischen Schwellwertschaltungen mit Hysterese. Mittlerweile ist der Name zu einem Allgemein- und Sammelbegriff für solche Schaltungen geworden. Oftmals verbindet man damit die Vorstellung von kostengünstigen Schaltstufen, die beliebig langsame Signale in Impulse mit steilen Flanken umwandeln können. Der typische Schmitt-Trigger hat ein einziges analoges Eingangssignal. Referenzpegel und Hysterese werden im Innern gebildet. Solche Schmitt-Trigger-Schaltungen arbeiten nicht besonders genau, da Schaltschwelle und Hysterese von den Widerstandswerten der Rückkopplung abhängen.

Ein elementarer Schmitt-Trigger

Abbildung 6.25 zeigt eine der einfachsten Schaltungen. Es ist der aus Abbildung 6.5a bekannte Differenzverstärker, dessen zweiter Eingang ähnlich einem invertierenden Komparator mit einem Spannungsteiler beschaltet ist, der vom Kollektor des anderen Transistors gespeist wird.

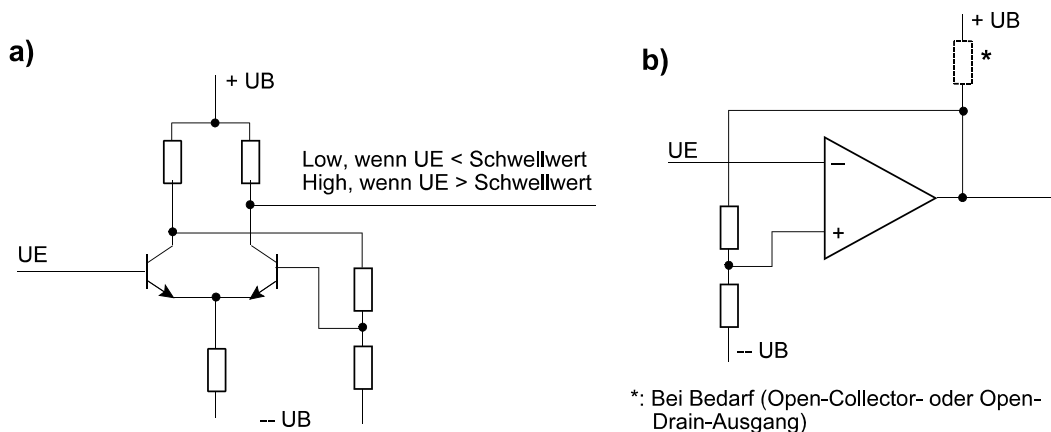


Abb. 6.25 Ein ganz elementarer Schmitt-Trigger. a) Transistorschaltung; b) eine alternative Darstellung.

Wenn man den Differenzverstärker als Komparator darstellt, ergibt sich ein einfacher invertierender Komparator mit Hysterese. Ist die Eingangsspannung UE niedrig, so führt der Ausgang einen High-Pegel. Die Referenzspannung ergibt sich dann gemäß Spannungsteilerverhältnis auf aus der Spannung zwischen dem High-Potential und der negativen Betriebsspannung. Erreicht die Eingangsspannung den Pegel der Referenzspannung, schaltet der Komparator um. Der Ausgang fällt dann in Richtung Low-

Pegel. Demgemäß sinkt die Spannung über den beiden Widerständen des Spannungsteilers und infolgedessen auch die Referenzspannung. Hierdurch wird die Differenzspannung zwischen den Eingängen noch größer (positive Rückkopplung), so dass der Komparator übersteuert wird und ausgangsseitig den endgültigen Low-Pegel schnell erreicht.

Da man bei der Transistorschaltung das Ausgangssignal von beiden Kollektoren abnehmen kann, erhält man, wie in Abbildung 6.25a gezeigt, ohne zusätzlichen Aufwand ein nichtinvertierendes Schaltverhalten.

Schmitt-Trigger mit Komparatoren

Die Abbildungen 6.26 und 6.27 zeigen typische Kochbuchlösungen.

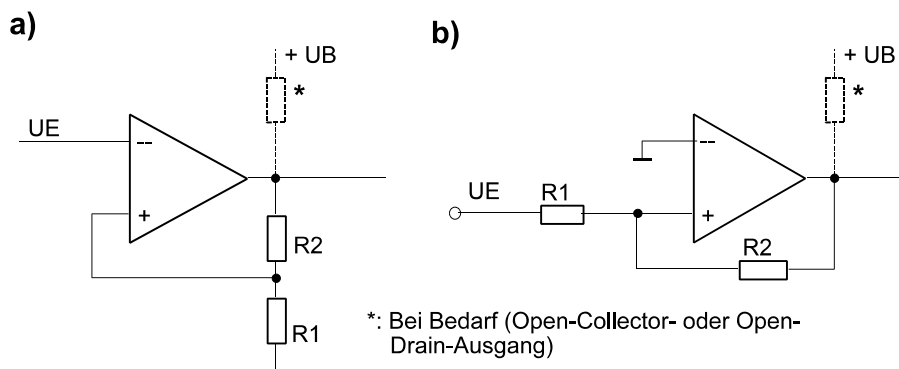


Abb. 6.26 Schmitt-Trigger-Schaltungen mit Komparatoren. a) invertierend; b) nichtinvertierend.

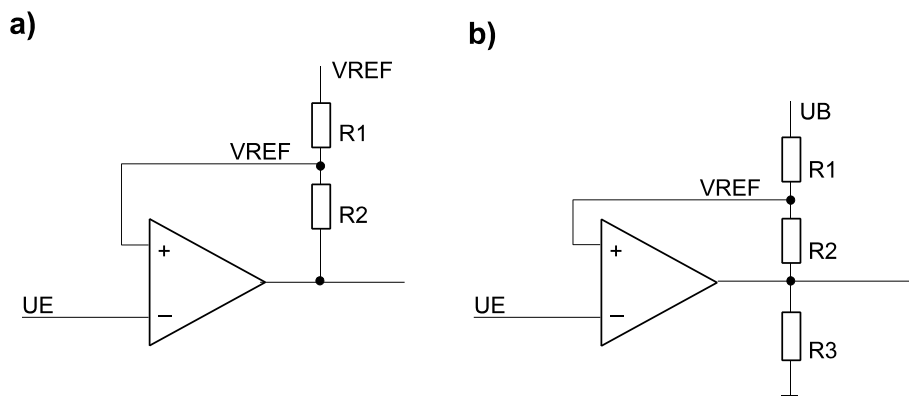


Abb. 6.27 Invertierende Schmitt-Trigger. a) Referenzpegel = High-Pegel des Ausgangs. b) Gewinnung der Referenzspannungspegel über Spannungsteiler (z. B. aus der allgemeinen Betriebsspannung).

6.3 Einsatzhinweise

Komparatoren auswählen

Welche Anforderungen können nur vom Bauelement selbst erfüllt werden, bei welchen ist es möglich, sich mit Schaltungsmaßnahmen zu behelfen, wenn es nicht von Hause aus passen sollte?

Die wichtigsten Anforderungen betreffen die Geschwindigkeit, also die Antwortzeit (Response Time), und die Genauigkeit des Umschaltens (Offsetspannung).

Die Betriebsspannungen und die Pegel der Eingangssignale hängen zusammen. Kann man den Komparator mit vorhandenen Betriebsspannungen versorgen und passen dann die Eingangspegel aus der Einsatzumgebung zum Aussteuerbereich? Es sollte nicht erforderlich sein, eigens Regler, Spannungswandler oder Pegelumsetzer vorzusehen. Wenn es nicht ohne Zusatzausschaltungen geht, ist zu untersuchen, an welcher Stelle man die Anpassung vornimmt (Aufwandsfrage).

Überschreitet der Spannungshub der Eingangssignale die Grenzen des Aussteuerbereichs, kann erforderlichenfalls mit wenig Aufwand abgeholfen werden (Begrenzungs- und Schutzschaltungen). Am Ausgang wird es digital. Deshalb kann man dort alle Anpassungsprobleme mit geringem Aufwand hinbekommen.

Praxistipps:

1. Der Komparator ist eine Art Verbindung vom Analogen zum Digitalen. Wenn man kein Bauelement findet, das alle Anforderungen erfüllt, dann eines auswählen, das zu den Anforderungen der analogen Seite passt*. Anpassungen auf der digitalen Seite kosten nicht viel und sind nicht schwierig (Invertierung, Pegelwandlung, Fangflipflops usw.).
2. Einfach bleiben. Wenn möglich, auf der analogen Seite nur bewährte Grundsatz- und Kochbuchlösungen einsetzen. Alles Kompliziertere im Digitalen erledigen (oder mit Software). Manche Trickschaltungen oder auch Grundsaltungen mit außergewöhnlichen Dimensionierungen (z. B. besonders hochohmig) sind gelegentlich Alleinstellungsmerkmale. Sie funktionieren hervorragend mit dem betreffenden Schaltkreistyp – aber eben nur mit diesem...

Wie sieht die Signalquelle den Komparator?

Wenn der Komparator schaltet, ändert sich dessen differentielle Eingangsimpedanz. Die Signalquellen sehen somit eine Last, die sich im Rhythmus der Schaltvorgänge ändert. Infolgedessen fließen hochfrequente Wechselströme durch die Eingangssignalwege. Hierdurch können Störungen abgestrahlt und in benachbarte Leitungswege eingekoppelt werden. Das macht sich vor allem dann bemerkbar, wenn die Signalwege lang sind und viele Komparatoren gleichzeitig schalten (beispielsweise in Testadaptern).

Praxistipps:

1. Längere Eingangsleitungen sorgfältig verlegen. Zwischen benachbarten Eingangsleitungen Masseleitungen anordnen.
2. Je höher die Impedanz der Signalquelle, desto größer die Gefahr, dass die Schaltung ins Schwingen gerät. Die Anwendungsschriften nennen typische Werte von 1 k Ω an aufwärts.
3. Signalquellen höherer Impedanz über Pufferstufen (Impedanzwandler) anschließen (Abbildung 6.28).
4. Die Impedanzen der Quellen an beiden Eingängen sollte näherungsweise gleich sein. Ggf. Serienwiderstände einfügen (Abbildung 6.29). Beide Widerstände sollten wenigstens ungefähr gleiche Werte haben. Drahtwiderstände sind nicht geeignet. Die Widerstände müssen in unmittelbarer Nähe der Komparatoranschlüsse angeordnet werden (kürzeste Verbindungen). Sind die Signalfrequenzen nicht allzu hoch, kann es zweckmäßig sein, den Eingängen des Komparators einen Kondensator parallelzuschalten (C1 in Abbildung 6.29). Richtwert: 100 pF bis 1 nF.

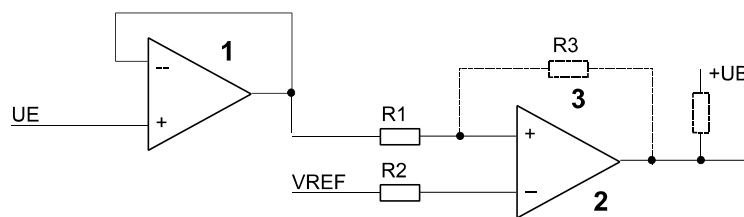


Abb. 6.28 Anschließen von Signalquellen über eine Pufferstufe. 1 - Pufferstufe (Impedanzwandler); 2 - Komparator; 3 - Hysterese (bei Bedarf). Mehrere solcher Schaltungen können parallel angeordnet und mit einer gemeinsamen Referenzspannung versorgt werden*.

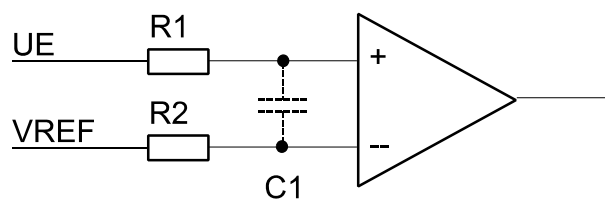


Abb. 6.29 Eine typische Eingangsbeschaltung. Richtwert $R1 = R2$. Genaue Dimensionierung ggf. so, dass beide Eingangsimpedanzen näherungsweise gleich werden. C1 bei Bedarf.

Eingangs- und Betriebsspannungen

Achtung – im Datenmaterial und in den Anwendungshinweisen nachsehen. Es gibt zwei Kennwerte:

1. Welche Spannungen an den Eingängen der Komparator aushält (Input Voltage).
2. In welchem Bereich der Eingangsspannungen der Komparator korrekte Vergleichsergebnisse liefert (Aussteuerbereich, Common Mode Voltage, Differential Input Voltage).

Keine Eingangsspannung darf unter die negative Betriebsspannung fallen. Eine Unter- oder Überschreitung um etwa 0,7 V ist typischerweise eingerechnet, um den Einsatz von Klammerdioden zu ermöglichen.

Bipolare Schaltkreise

Die maximale Eingangsspannung oberhalb der negativen Betriebsspannung ist zumeist als Festwert spezifiziert (Abbildung 6.30a).

Beispiel: Negative Eingangsspannung = negative Betriebsspannung oder 30 V unter der positiven Betriebsspannung, je nachdem, welcher Wert kleiner ist. Positive Eingangsspannung = negative Eingangsspannung + 30 V – und zwar auch dann, wenn die positive Betriebsspannung kleiner ist.

Der Aussteuerbereich liegt zwischen den beiden Betriebsspannungen. Die Obergrenze ist niedriger als die positive Betriebsspannung die Untergrenze höher als die negative (Abbildung 6.30b).

Eingangsspannungsüberhöhung

Viele Typen liefern r auch dann eine zutreffende Vergleichsaussage, wenn eine der Eingangsspannungen im Aussteuerbereich liegt und die jeweils andere diesen Bereich überschreitet.

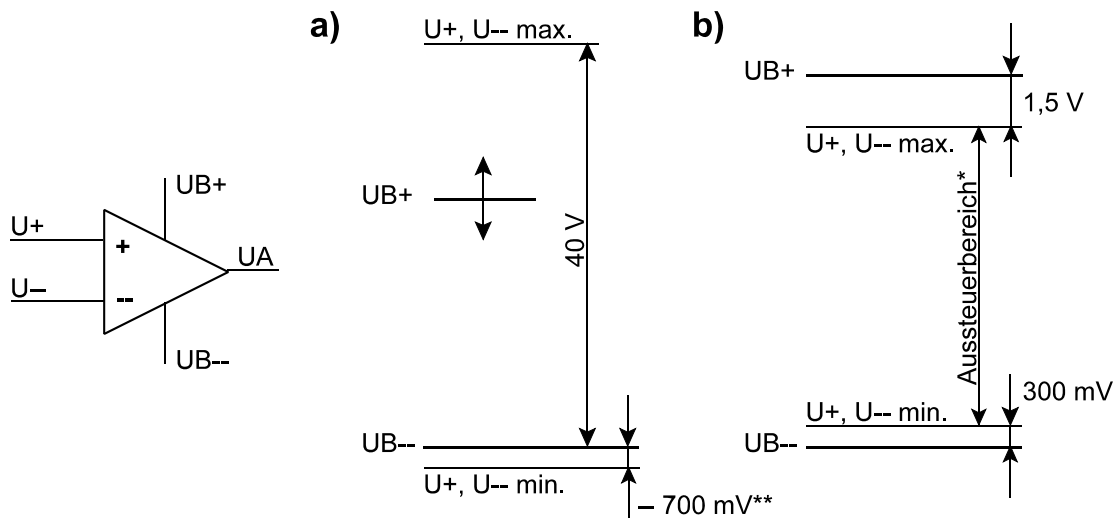
CMOS-Schaltkreise

Typische CMOS-Schaltkreise können mit Eingangsspannungen arbeiten, die die Betriebsspannungen um einige hundert mV über- oder unterschreiten (Abbildung 6.31). Damit sind diese Schaltkreise in der Lage, eine korrekte Vergleichsaussage zu liefern, wenn die Eingangsspannung in die Nähe der positiven oder negativen Betriebsspannung kommt. Somit ist es beispielsweise möglich, die eigene Betriebsspannung zu überwachen und Sensorsignale direkt (ohne Vorverstärkung) mit niedrigen Referenzspannungen zu vergleichen.

Typische Problemstellen:

- Strombegrenzung. Welcher Eingangsstrom ist zulässig? Dieser Grenzwert ist dann zu berücksichtigen, wenn die Eingangsspannungen an die Grenzen des Zulässigen kommen; vor allem, wenn die Signalquellen eine niedrige Impedanz haben. Der Strom ist zumeist auf wenige mA zu begrenzen. Ggf. Serienwiderstände zur Strombegrenzung zwischenschalten (wie in Abbildung 6.44, aber dem Verwendungszweck entsprechend dimensioniert).

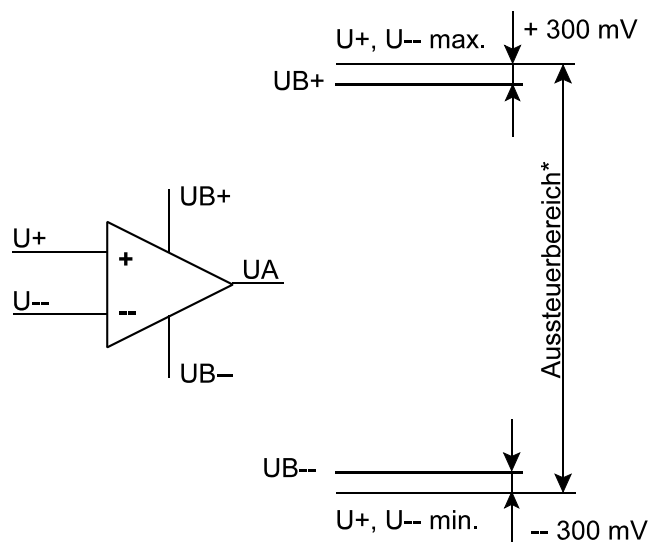
- Große Kapazitäten (μF und mehr) an den Eingängen sind als Quellen mit niedriger Impedanz anzusehen. Ggf. Serienwiderstände zur Strombegrenzung zwischenschalten. Sind die Betriebsspannungen ausgeschaltet, solche Kondensatoren aber noch geladen, kann es vorkommen, dass der zulässige Eingangsspannungsbereich überschritten wird.
- Viele Schaltkreise halten keine umgepolten Betriebsspannungen aus. Ggf. Verpolschutzmaßnahmen vorsehen.



*: Datenblattwert Common Mode Voltage Range

** : Reserve für Klammerung

Abb. 6.30 Eingangsspannungen (1). Typische bipolare Schaltkreise. a) zulässige Eingangsspannungen; b) Aussteuerbereich. Die Zahlwerte sind Beispiele.



*: Datenblattwert Common Mode Voltage Range

Abb. 6.31 Eingangsspannungen (2). Typische CMOS-Schaltkreise. Die Zahlwerte sind Beispiele. Der Schaltkreis kann über den gesamten Bereich der zulässigen Eingangsspannungen angesteuert werden.

Schwingungen vermeiden

Schwingungen können nur vorkommen, wenn der Komparator seinen Ausgangspegel ändert, also umschaltet oder zum Umschalten ansetzt. Sie können entstehen:

- wenn eine kapazitive Rückkopplung vom Ausgang zu den Eingängen wirksam wird,
- wenn der Bereich der Offsetspannung (linearer Bereich) nicht schnell genug durchlaufen wird,
- wenn sich Eingangssignale nur sehr langsam ändern und dabei die Richtung immer wieder wechselt,
- wenn Eingangssignale von Störungen überlagert sind.

Praxistipps:

1. Die wichtigste Aufgabe ist das Unterdrücken der hochfrequenten Schwingungen. Ohne Überlagerung mit solchen Schwingungen haben alle anderen unschön aussehenden Signalverläufe den Charakter von Prellimpulsen, die auf der digitalen Seite einfach zu behandeln sind.
2. Wenn die Eingangssignale hinreichend steile Flanken aufweisen, ist keine Hysterese erforderlich.
3. Ist die Quellimpedanz niedrig genug und die Leiterplatte vernünftig ausgelegt, genügt oftmals eine Hysterese von wenigen mV, die die Genauigkeit nicht untragbar verschlechtert.
4. Richtwert: Mehr als 50 mV Hysterese können die Genauigkeit merklich beeinträchtigen.

Das Ausgangssignal fangen

Der Ausgang des Komparators wird mit einer digitalen Fang- oder Kippschaltung verbunden (Abbildung 6.32). Damit wird das erste Schalten des Ausgangs registriert (Latching). Was der Komparator unmittelbar danach tut, ist gleichgültig – vor allem, ob er schwingt oder nicht*. Das grundsätzliche Entwurfsproblem besteht darin, wann die Schaltung wieder zurückgesetzt wird. Es kann mit einem zweiten Komparator gelöst werden. Eine weitere Möglichkeiten besteht darin, so lange abzuwarten, bis mit Sicherheit alles vorbei ist (Prinzip des Entprellens).

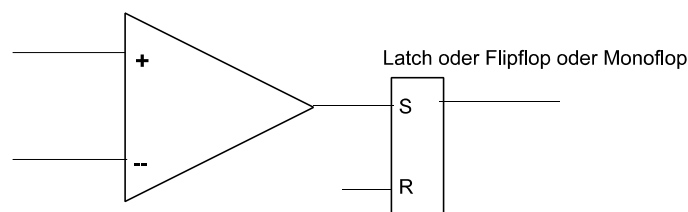


Abb. 6.32 Das Ausgangssignal des Komparators wird gefangen.

Den Komparator abtasten

Abbildung 6.33 veranschaulicht beide Möglichkeiten (die man auch kombinieren kann):

- Das Eingangssignal wird abgetastet und in einem Abtast- und Halteglied gespeichert (Kondensatorladung).
- Der Ausgang wird entweder freigegeben oder auf einen festen Pegel gezogen (Strobing).

Praxistipp: Solche Lösungen kann man auch mit Mikrocontrollern implementieren. Beispiel 1: ein eingebauter Komparator wird nur dann kurzzeitig freigegeben, wenn man ihn braucht. Ein abgeschalteter Komparator kann auch nicht schwingen. Beispiel 2: ein fester Ausgangspegel ergibt sich auch dann, wenn man den entsprechenden Port-Anschluss auf Ausgang stellt und auf Low programmiert.

Durch derartige Maßnahmen kann man den Rückkopplungsweg vom Ausgang zu den Eingängen auftrennen und somit Schwingungen vermeiden (ein Ausgang, der nicht schaltet, kann auch keine Schwingungen hervorrufen). Es hängt jedoch von der Art des Anwendungsproblems ab, ob Abtastverfahren anwendbar sind oder nicht.

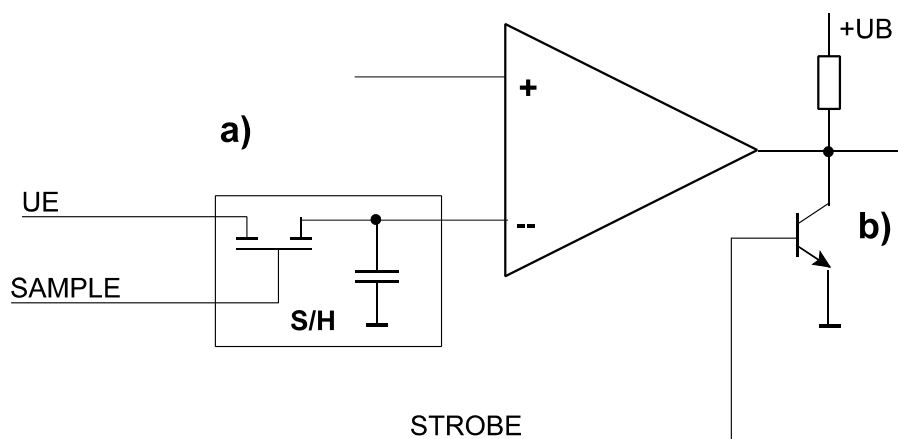


Abb. 6.33 Der Komparator wird abgetastet. a) Abtast- und Halteglied; b) das Strobe-Signal gibt den Ausgang frei oder erzwingt einen festen Ausgangspegel.

6.4 Praxisschaltungen

Pegelwandlung

Die Schaltung von Abbildung 6.34 kann vielfältige Aufgaben der Pegelwandlung wahrnehmen. Es kommt nur darauf an, ein jeweils geeignetes Bauelement auszuwählen und an passende Betriebsspannungen anzuschließen.

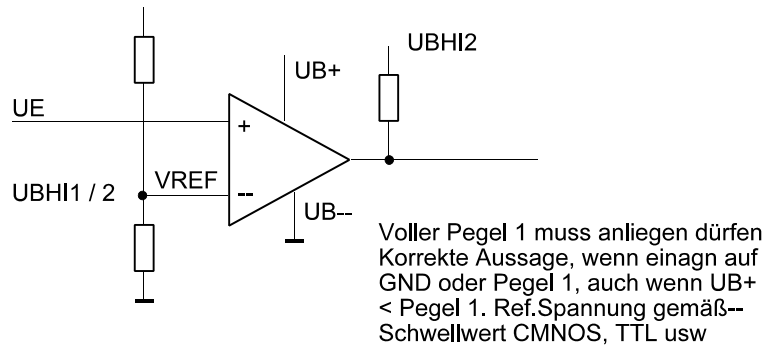


Abb. 6.34 Eine vielseitige Grundschaltung.

Wandlung zwischen digitalen Signalpegeln:

- Betriebsspannung des Arbeitswiderstands = ausgangseitiger High-Pegel.
- Referenzspannung = Schwellenspannung der eingangsseitigen Signalspezifikation (z. B. 1,5 V bei TTL oder halber High-Pegel bei CMOS).
- Betriebsspannung des Komparators: Der Komparator muss den maximalen eingangsseitigen High-Pegel aushalten und dabei eine korrekte Vergleichsaussage liefern. Ist die Betriebsspannung höher als der maximale High-Pegel, so wird es immer funktionieren. Ansonsten hängt es vom Schaltkreistyp ab:
 - Bipolar: Die Referenzspannung muss im zulässigen Aussteuerbereich liegen, also positive Betriebsspannung > Referenzspannung.
 - CMOS mit Open-Drain-Ausgang: positive Betriebsspannung = eingangsseitiger High-Pegel.
 - Ist die Eingangsspannungsüberhöhung zugelassen, darf die Betriebsspannung niedriger sein als der eingangsseitige High-Pegel.

Wenn negative Eingangspegel vorkommen:

- Das negative Eingangssignal klammern oder UB- an eine passende negative Betriebsspannung anschließen.
- Wenn der Komparator an eine negative Betriebsspannung angeschlossen ist, die Ausgangspegel erforderlichenfalls so erzeugen wie vorstehend ***** (Abb. 6.53) beschrieben.

Spannungskontrolle

Aufgaben der Spannungskontrolle sind dann einfach zu lösen, wenn die Betriebs- und Referenzspannungen als gegeben vorausgesetzt werden können. Ist hingegen die zu überwachende Spannung gleich der eigenen Betriebsspannung, braucht man Bauelemente, die in einem solchen Einsatzfall noch korrekte Vergleichsaussagen liefern.

Einfache Spannungskontrollschaltungen geben ein o.k.- oder ein Fehlersignal ab (das eine ist die Invertierung des anderen). Es gilt jeweils eine von zwei Vergleichsaussagen:

- Die Betriebsspannung ist höher als die Referenzspannung. Dann ist sie in Ordnung.
- Die Betriebsspannung ist niedriger als die Referenzspannung. Das ist entweder ein Fehler oder ein zeitweiliger Zustand, der beim Ein- und Ausschalten durchlaufen wird.

Die Betriebsspannung gilt nur dann als in Ordnung, wenn sie in ihrem zulässigen Bereich liegt. Einfache Kontrollschaltungen (Abbildung 6.35) prüfen nur, ob sie einen bestimmten Mindestwert über- oder unterschreitet. Oberhalb des Mindestwertes ist sie in Ordnung (PWR_OK), unterhalb nicht. Das invertierte Bereitschaftssignal PWR_OK gilt als Fehlersignal. Es wird typischerweise verwendet, um die angeschlossenen Schaltungen zurückzusetzen (Power-On / Power-Fail Reset).

$$\overline{\text{PWR_OK}} = \text{PWR_FAIL} = \text{Rücksetzen}$$

Wenn die Betriebsspannung hochläuft (Einschalten) oder wenn sie abfällt (Ausschalten), muss das Bereitschaftssignal inaktiv und das Rücksetzen aktiv sein (PWR_OK = Low).

In der Schaltung von Abbildung 6.35 muss somit während dieser Zeitabschnitte die Referenzspannung immer höher sein als der zu vergleichende Anteil der Betriebsspannung.

Das ist dann ein Problem, wenn die Referenzspannung aus der zu überwachenden Betriebsspannung erzeugt wird. Um die Fehlerbedingung $UB < V_{REF}$ zu erfüllen, muss die Referenzspannung schneller ansteigen und langsamer abfallen als die zu überwachende Betriebsspannung (Abbildung 6.36).

Die Grundsatzlösung:

Mit einer niedrigen Referenzspannung arbeiten und die zu überwachende Betriebsspannung entsprechend teilen. Die Referenzspannung muss schon in voller Höhe anliegen, bevor die zu versorgenden Schaltungen überhaupt arbeitsfähig sind. Richtwert: Referenzspannung < 1 V. Ist die Betriebsspannung unter 1 V, sind die zu versorgenden Schaltungen gar nicht arbeitsfähig.

$$\text{Spannungsteilerverhältnis} = \frac{V_{REF}}{UB_{min}}$$

Beispiel: $V_{REF} = 500$ mV, $UB_{min} = 4,5$ V. Spannungsteilerverhältnis = 0,111, also rund 0,1. Wenn die eigentliche Betriebsspannung auf 2 V hochgelaufen ist, sieht der Komparatoreingang nur 0,2 V usw. Erst bei ca. 5 V Betriebsspannung liegen am Komparator die 0,5 V an, die erforderlich sind, um das Bereitschaftssignal einzuschalten.

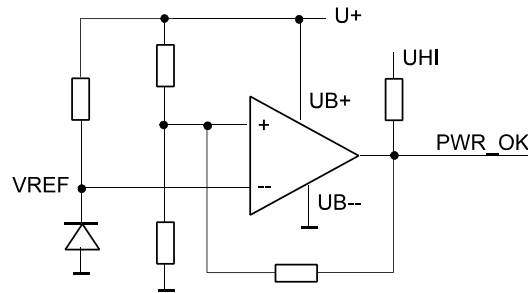


Abb. 6.35 Eine einfache Spannungskontrollschaltung.

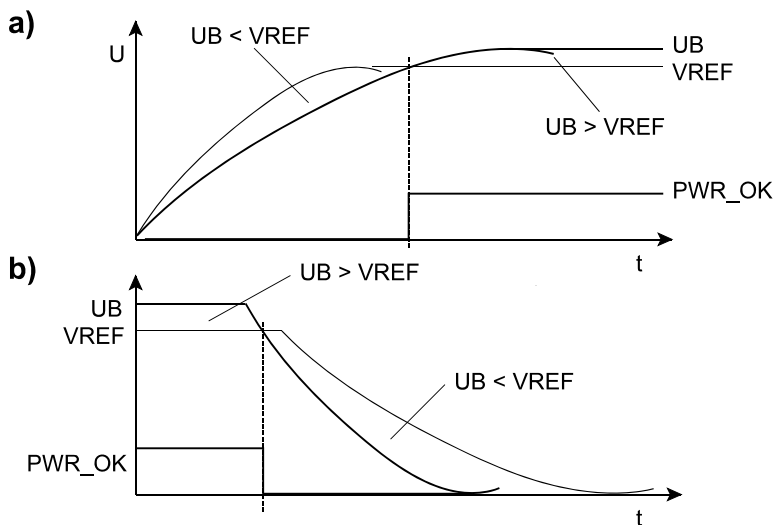


Abb. 6.36 Referenzspannung, Betriebsspannung und Bereitschaftssignal. a) Einschalten; b) Ausschalten.

Praxistipps:

1. Hysterese. Sie ist erforderlich, weil Betriebsspannungen nur vergleichsweise langsam ansteigen und abfallen (viele Millisekunden).
2. Präzision. Eine entscheidende Anforderung. Referenzspannungsquelle und Spannungsteiler dürfen nur geringen Toleranzen aufweisen. Die Diode in Abbildung 6.35 dient nur zur Illustration. In der Praxis braucht man schon etwas Genaueres.
3. Je höher die Referenzspannung, desto mehr gehen die Anforderungen an die Genauigkeit zurück.
4. Das eigentliche Rücksetzsignal bildet man zweckmäßigerweise mit Flipflops oder Zeitstufen. Beispielsweise ist das Rücksetzen beim Einschalten von Anfang an wirksam. Es wird nachdem das Bereitschaftssignal PWR_OK aktiv geworden ist. Auf diese Weise haben alle Einrichtungen (FPGAs, Mikrocontroller usw.) genügend Zeit, um ihren Anfangszustand einzunehmen (Initialisierung).
5. Es gibt Überwachungsschaltkreise, in denen alle diese Spitzfindigkeiten von Grund auf berücksichtigt sind..

Spannung genauer bewerten

Ein einziger Komparator kann nur eine Ja-Nein-Aussage liefern; die Eingangsspannung ist entweder kleiner oder größer als die Referenzspannung. Um subtilere Unterscheidungen zu treffen, sind mehrer Komparatoren erforderlich, die an unterschiedliche Referenzspannungen angeschlossen werden. In der Schaltung von Abbildung 6.37 werden die Referenzspannungen mit einem Spannungsteiler gebildet. Die Vergleichsaussagen der Komparatoren ermöglichen es, den Wert der Eingangsspannung einem vom mehreren Bereichen zuzuordnen (Klassifizierung). Im Beispiel ist die Eingangsspannung entweder kleiner als 1 V oder größer als 1 V oder größer als 1,5 V usw. Da alle Komparatoren, die an die jeweils niedrigeren Referenzspannungen angeschlossen sind, auch einen High-Pegel liefern, ergibt sich eine sogenannte Thermometeranzeige. Wenn man die Ausgangssignale der Komparatoren als Bitmuster interpretiert, ergibt sich die 1-aus-n-Darstellung der Vergleichsergebnisse, indem man die höchstwertige Eins in diesem Bitmuster auffindet (Prioritätscodierung). Die Schaltung von Abbildung 6.37 ist im Grunde ein Analog-Digital-Wandler mit geringer Auflösung.

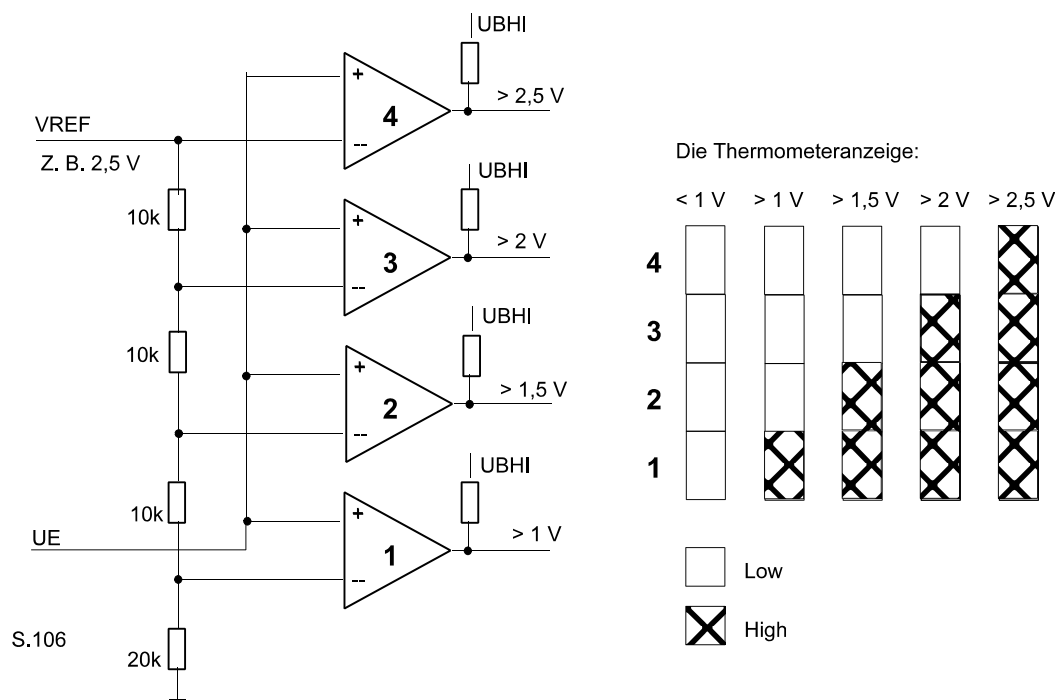


Abb. 6.37 Eine Grundsaltung der Spannungsbewertung.

Fensterkomparatoren

Fensterkomparatoren (Window Comparators) betreffen einen Bereich, der durch zwei Referenzspannungen gegeben ist. Dieser Bereich wird auch als Fenster bezeichnet (Abbildung 6.38). Ein Fensterkomparator bestehen aus zwei Komparatoren, die ausgangsseitig verknüpft sind. Die Vergleichsaussage bezieht sich auf eine Eingangsspannung. Sie liegt entweder innerhalb des Fensters oder nicht. Dann liegt sie außerhalb. Es gibt zwei grundsätzliche Vergleichsaufgaben: die Grenzwertkontrolle und die Pegelkontrolle (Abbildung 6.39).

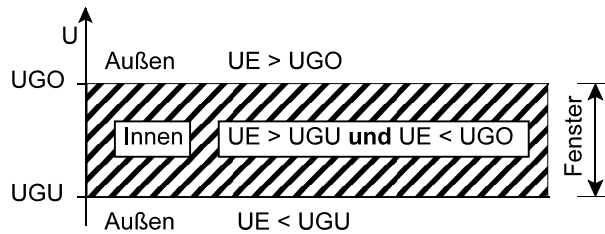


Abb. 6.38 Das Fenster.

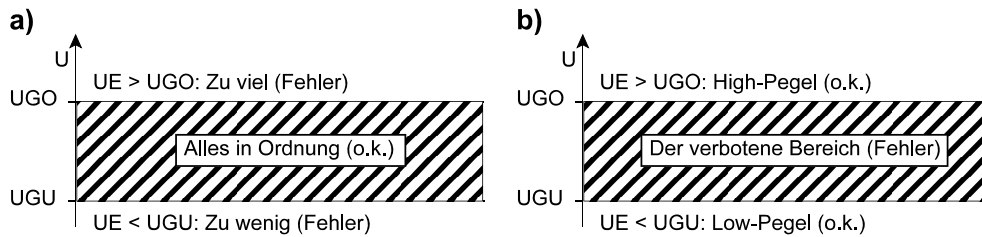


Abb. 6.39 Typische Vergleichsaufgaben von Fensterkomparatoren. a) Grenzwertkontrolle; b) Pegelkontrolle.

Grenzwertkontrolle

Wenn die Eingangsspannung innerhalb des Fensters liegt, ist alles in Ordnung. Diese Form der Vergleichsaussage ist typisch für Kontrollschaltungen, die überprüfen, ob Grenzwerte eingehalten werden oder nicht. Die Schaltung besteht aus zwei Komparatoren, die ausgangseitig konjunktiv verknüpft sind (Abbildung 6.40a). Haben die Komparatoren Open-Collector- oder Open-Drain-Ausgänge, genügt es, die Ausgänge miteinander zu verbinden (Wired AND; Abbildung 6.40b).

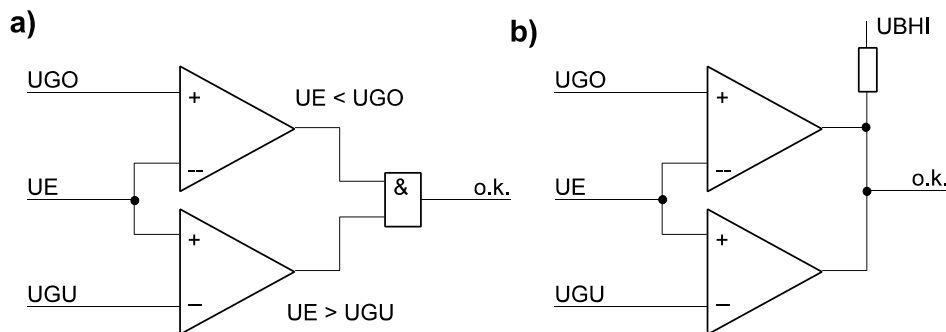


Abb. 6.40 Fensterkomparator zur Grenzwertkontrolle. a) Grundschtaltung; b) mit Wired AND.

Pegelkontrolle

Wenn die Eingangsspannung innerhalb des Fensters liegt, ist es ein Fehler. Diese Form der Vergleichsaussage ist typisch für Leitungsempfänger und Testsysteme. Die Eingangsspannung stellt ein binäres Signal dar, und das Fenster entspricht dem verbotenen

Bereich zwischen den beiden Signalpegeln Low und High. In der Schaltung von Abbildung 6.41a liefern die beiden Komparatoren einzeln Signale, die den Pegeln Low und High des Eingangssignals entsprechen. Wenn das Eingangssignal einen dieser Pegel führt, liegt die Eingangsspannung außerhalb des verbotenen Bereichs. Das Signal ist also in Ordnung. Eine disjunktive Verknüpfung der Komparatorausgänge ergibt die entsprechende Aussage. Die Negation dieser Verknüpfung ergibt eine Fehleraussage. Die Eingangsspannung liegt dann innerhalb des verbotenen Bereichs. Geht es nur um die Fehlerkontrolle (verbotener Bereich Ja/Nein) und verwendet man Komparatoren mit Open-Collector- oder Open-Drain-Ausgängen (Abbildung 6.41b), genügt es, die Ausgänge miteinander zu verbinden und die Komparatoren eingangsseitig invertiert anzuschließen (Wired AND/NOR).

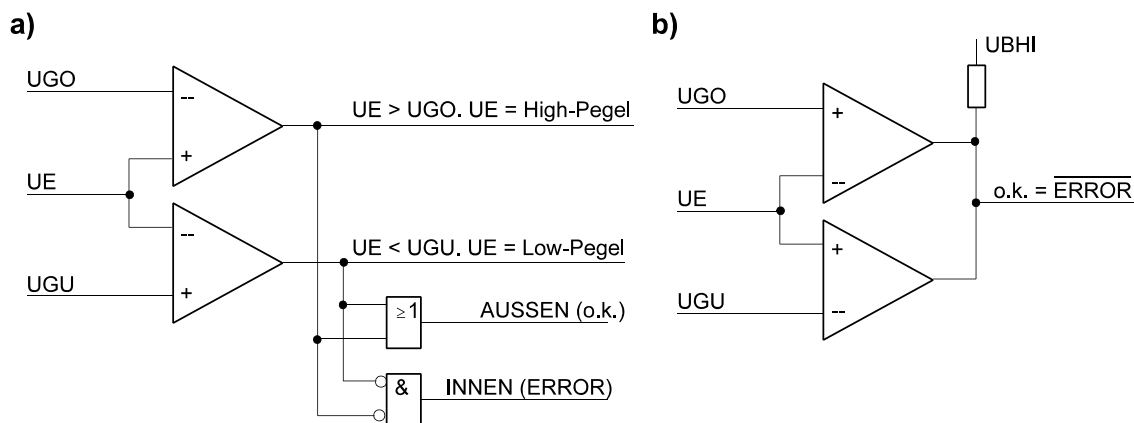


Abb. 6.41 Fensterkomparator zur Pegelkontrolle.

Präzisions-Schmitt-Trigger

Der Präzisions-Schmitt-Trigger ist eine Schwellwertschaltung mit exakt einstellbarer Hysterese. Sie besteht aus zwei Komparatoren und einem RS-Latch (Abbildung 6.42). Für jede der beiden Grenzen des Hysteresebandes gibt es eine eigene Referenzspannung.

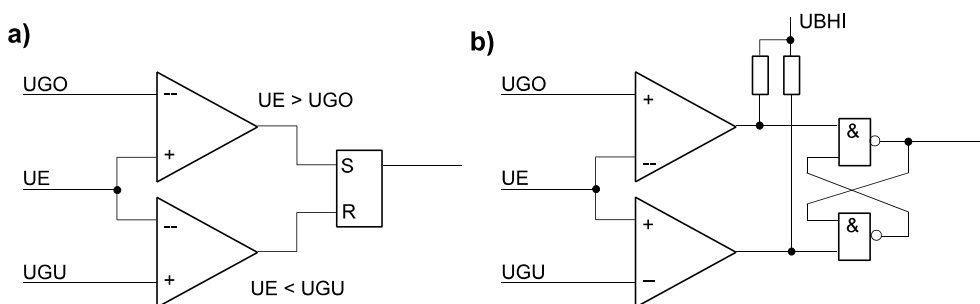


Abb. 6.42 Präzisions-Schmitt-Trigger (Begrenzerschaltung). a) Grundschtaltung; b) mit NAND-Latch.

Sobald U_E den Schwellwert U_{ON} UGO überschreitet, wird das Latch gesetzt. Es wird erst dann zurückgesetzt, wenn U_E den (niedriger eingestellten) Schwellwert U_{OFF} UGU unterschreitet.

Ein aus NAND-Gattern aufgebautes Latch ist invertiert anzusteuern. Hierzu werden beide Komparatoren gegenüber der Grundsaltung von Abbildung 6.42a invertiert angeschlossen (Abbildung 6.42b). Ist $U_E > U_{ON}$, so ist der positive Eingang des oberen Komparators negativ gegenüber dem negativen Eingang; der Ausgang wird folglich Low und setzt das Latch. Sinngemäß wird bei $U_E < U_{OFF}$ der Ausgang des unteren Komparators Low und setzt das Latch zurück. High-Pegel an den Komparatorausgängen beeinflussen das Latch nicht.

Die Schaltung funktioniert nur dann, wenn sich die beiden Schaltschwellen nicht überlappen (Abbildung 6.43). Wenn einer der Komparatoren schaltet und dabei ins Schwingen kommt, so darf das entweder nur den unteren oder nur den oberen Komparator betreffen, niemals aber beide gleichzeitig (vergleiche das Entprellen von Wechselkontakten mittels Latch).

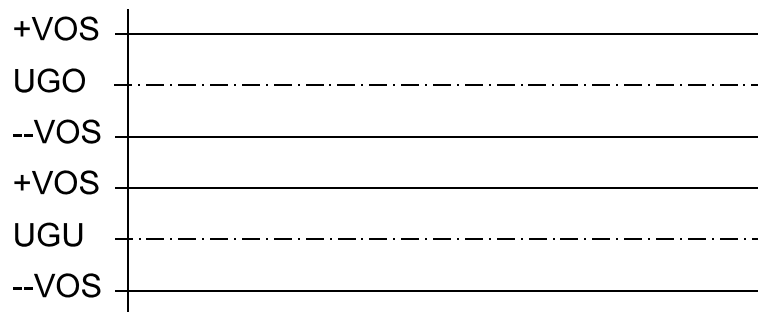


Abb. 6.43 Zur Lage der Schaltschwellen.