

Kollegium Kalksburg
Mag. Erich Steiner

Philipp Lust
1993/94

DER OPERATIONS- VERSTÄRKER

Fachbereichsarbeit aus Physik

Inhalt

A. Vorwort	4
B. Grundlagen der Elektronik	
1. Spannung und Strom	6
2. Der Widerstand.....	6
a. Reihenschaltung von Widerständen.....	7
b. Parallelschaltung von Widerständen.....	9
3. Der Kondensator.....	10
C. Halbleiter	
1. Aufbau von Halbleitern.....	14
2. Die Diode.....	15
3. Der (npn-) Transistor	18
D. Der Operationsverstärker	
1. Was ist ein Operationsverstärker?.....	22
2. Prinzipieller Aufbau eines Op-Amps	24
3. Der Operationsverstärker als Komparator	26
a. Der Schmitt-Trigger-Komparator	27
b. Thermostat.....	30
4. Der Op-Amp als (invertierender) Verstärker	32
a. Mischpult.....	35
E. Resumé	39
F. Anhang	
1. Schaltzeichen	40
2. Pinbelegungen und technische Daten einiger verwendeter Halbleiter.....	41
a. Operationsverstärker μ A741, LM741, CA741, SN72741.....	41
b. npn-Transistor BC548.....	42
3. Farbcodes von Widerständen	42

4. Abkürzungen für Einheiten	43
5. Einige wichtige Formeln	43
6. Umrechnungsfaktoren	44
7. Für den Nachbau empfohlene Bauteile	44
8. Literaturverzeichnis	45

A. Vorwort

Ich beschäftige mich bereits seit einigen Jahren hobbymäßig mit Elektronik. Mittlerweile habe ich schon einige nützliche Schaltungen gebaut, in denen sehr oft auch ein Operationsverstärker vorgekommen ist. Um mein Wissen über dieses elektronische Bauteil zu erweitern und zu festigen, habe ich mich entschlossen, eine Fachbereichsarbeit über dieses Thema zu schreiben.

Ein Operationsverstärker kann Spannungsdifferenzen verstärken. Er besteht aus vielen Widerständen und Transistoren, die in einem integrierten Schaltkreis zusammengefaßt sind. Um die Funktion des Operationsverstärkers leichter verständlich zu machen, möchte ich zuerst auf die Grundlagen der Elektronik und den Aufbau einfacherer Halbleiter wie z.B. des Transistors eingehen. Danach erkläre ich den prinzipiellen Aufbau und die heutzutage wichtigsten Anwendungen des Operationsverstärkers.

Ein Transistor ist ein einfacher Halbleiter, der Ströme verstärken kann. Ein Operationsverstärker hat ähnliche Eigenschaften, jedoch kann er die Ströme um viel größere Faktoren verstärken. Er wurde für spezielle Fälle, in denen ein Transistor nicht ausreicht, entwickelt. Anstatt in solchen Fällen eine Schaltung aus mehreren Transistoren aufzubauen, konnte man dann einfach auf *einen* Operationsverstärker zurückgreifen. Mittlerweile sind Standardoperationsverstärker schon unter 10,-öS zu haben, allerdings gibt es auch Spezialtypen um einige hundert Schilling.

Ursprünglich wurde der Operationsverstärker u.a. in Rechnern eingesetzt. Aus diesem Bereich ist er aber schon längst von der preiswerteren und kompakteren Digitaltechnik verdrängt worden.

Ein ähnliches Schicksal droht ihm im Bereich der Meß- und Regeltechnik. Für diese ist der Operationsverstärker praktisch prädestiniert, weil er direkt zwei Werte, wie z.B. Ist- und Sollwert bei einem Thermostat, vergleichen und verarbeiten kann. Dabei hat er als analoges Element gegenüber der Digitaltechnik den Vorteil, daß er nicht nur die Werte „0“ und „1“ produzieren kann,

sondern auch sämtliche Zwischenwerte. Dennoch werden auch in der Meß- und Regeltechnik zunehmend kompliziertere digitale Meßverfahren verwendet.

Ein dritter sehr wichtiger Punkt ist die Audiotechnik. Auch hier werden die analogen Schallplatten und Tonbänder von digitalen Medien wie CD, DAT, MiniDisc, DCC oder Satellitenradio verdrängt, jedoch kann das letzte Glied einer Stereoanlage, der Verstärker und der Lautsprecher, nie vollkommen durch ein digitales Gegenstück ersetzt werden. Derzeit werden Operationsverstärker zum Verstärken von Signalen in Radios, Tonbandgeräten und Plattenspielern sowie Verstärkern verwendet. Zumindest in den Verstärkern werden sie auch in Zukunft ihren Dienst leisten.

Abschließend möchte ich noch darauf hinweisen, daß die Arbeit sehr viel leichter verständlich wird, wenn man die Versuche selbst durchführt. Die einzelnen Bauteile sind nicht allzu teuer und bei den Schaltungsskizzen sind die Bauteilwerte genau angegeben, weshalb es möglich ist, die Versuche ohne allzu großen Aufwand nachzubauen. Außerdem sind im Anhang sämtliche Schaltzeichen, die wichtigsten Formeln sowie die verwendeten Bauteile angeführt, sodaß man bei eventuellen Unklarheiten dort nachschlagen kann. Für den einfachen Nachbau der Experimente gibt es sogar spezielle Steckbretter, auf denen man durch simples Stecken Schaltungen aufbauen kann, ohne sie fix zu verlöten.

B. Grundlagen der Elektronik

1. Spannung und Strom

Wenn es zwei Punkte gibt, die unterschiedlich stark geladen sind – d.h. durch eine Überzahl an Protonen positiv bzw. durch mehr Elektronen negativ – kann dazwischen Strom fließen, sofern die Punkte durch einen elektrischen Leiter verbunden werden.

Die elektrische *Spannung* (U) gibt diesen Unterschied der Ladung an und muß folglich immer zwischen *zwei* Punkten gemessen werden. Mißt man z.B. die Spannung einer 9 Volt-Batterie, so mißt man den Ladungsunterschied zwischen den beiden Polen. Die Einheit für diese Größe ist das *Volt* (V).

Verbindet man die beiden Punkte mit einer elektrisch leitenden Substanz, fließen die überschüssigen Elektronen vom negativen zum positiven Pol, wodurch die Ladungsdifferenz langsam ausgeglichen wird. Dieses Fließen von Elektronen wird als *Strom* (I) bezeichnet, dessen Einheit das *Ampere* (A) ist.

Während Strom nur fließen kann, wenn eine leitende Verbindung zwischen den beiden Polen der Spannungsquelle vorhanden ist, ist die Spannung auch vorhanden, wenn kein Strom fließt. So kommen aus der Steckdose stets 220V, es fließt aber nur dann Strom, wenn auch wirklich ein Gerät angeschlossen wird.

2. Der Widerstand

Zwischen den beiden Polen einer Spannungsquelle (z.B. Batterie) werden Verbraucher angeschlossen, die dem Strom einen bestimmten elektrischen Widerstand bieten. Ein hoher Widerstand ist ein großes Hindernis für den Strom, weshalb nur wenig Strom fließen und „verbraucht“ werden kann. Ein geringer Widerstand läßt hingegen sehr viel Strom fließen.

Die Einheit für den *Widerstand* (R) ist das *Ohm* (Ω). Die Definition lautet: Ein Widerstand (R) hat einen Wert von 1Ω , wenn bei einer Spannung (U) von 1 Volt (V) eine Stromstärke (I) von 1 Ampere (A) fließt.

Spannung, Strom und Widerstand stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander, das durch das Ohmsche Gesetz verdeutlicht wird:

$$U=I \cdot R$$

bzw. nach Umformung: $I=U:R$ oder $R=U:I$

Sollte man zwei dieser Werte kennen, kann man daraus daher jederzeit den dritten berechnen.

In der Elektronik werden Widerstände sehr oft verwendet, um Spannungen und Ströme auf ein gewünschtes Maß zu reduzieren.

a. Reihenschaltung von Widerständen

Von einer Reihenschaltung spricht man, wenn man mehrere Widerstände „hintereinanderreih“t. Diese Schaltung heißt auch Serienschaltung.

Ein praktisches Beispiel würde so aussehen:

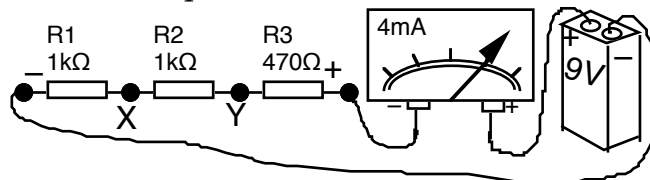


Abb. B1: Serienschaltung von 3 Widerständen

Hier fließt durch jeden Widerstand derselbe Strom und je mehr Widerstände es gibt bzw. je höher die einzelnen Widerstandswerte sind, desto weniger Strom fließt, da insgesamt jeder einzelne Widerstand ein zusätzliches Hindernis für den Stromfluß bedeutet. Der Widerstand der gesamten Schaltung ergibt sich aus der Summe der Einzelwiderstände:

$$R_{\text{ges}}=R1+R2+R3\dots$$

In unserem Fall ergibt das $1000\Omega + 1000\Omega + 470\Omega = 2470\Omega$. Mit Hilfe des Meßgeräts, das einen Strom von ca. 3,6mA (0,0036A) anzeigen sollte, kann man das Ohmsche Gesetz gleich prüfen: Da sich R aus $U:I$ ergibt, kann man den Widerstand auch errechnen.

Man erkennt, daß Strommeßgeräte (*Amperemeter*) stets in Serie geschaltet werden müssen, da sie den Strom, der durch die Verbraucher fließt, messen. Derselbe Strom fließt nur dann, wenn Meßgerät und Verbraucher hintereinandergeschaltet sind:

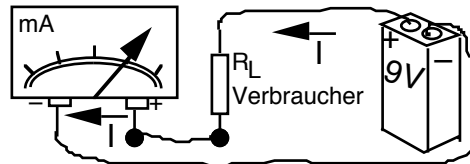


Abb. B2: Korrekter Anschluß eines Amperemeters

Während der Stromfluß durch jeden Widerstand gleich ist, ist das bei der Spannung, die über den einzelnen Widerständen abfällt, nicht so.

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes kann man berechnen, wie viel Spannung über den einzelnen Widerständen abfällt: Man muß nur den Widerstandswert mit der Stromstärke multiplizieren und erhält schon die Spannung über dem Widerstand, die sich mit einem Meßgerät überprüfen läßt.

Demzufolge erhält man über R_1 und R_2 eine Spannung von je $1000\Omega \cdot 0,0036A = 3,6V$, über R_3 jedoch nur $470\Omega \cdot 0,0036A = 1,7V$. Hieran sieht man, daß über größeren Widerständen mehr Spannung abfällt als über kleineren. Dieses Verhältnis von Widerstand zu Spannung ist direkt proportional.

Da über jedem Widerstand eine bestimmte Spannung abfällt, kann man mit Widerständen Spannungen teilen bzw. reduzieren.

Als Spannungsteiler kann man sog. *Potentiometer*, das sind variable Widerstände, verwenden, mit denen man Spannungen stufenlos ändern kann:

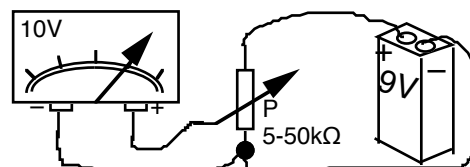


Abb. B3: Ein Potentiometer als Spannungsteiler

Ein Potentiometer hat 3 Anschlüsse, wobei der aufgedruckte Widerstandswert zwischen den beiden äußeren Anschlüssen vorliegt. Der Widerstand zwischen diesen Anschlüssen ist stets gleich. Zwischen diesen Anschlüssen befindet sich eine Widerstands-

schicht. Außerdem gibt es aber noch ein Metallstück, das eine leitende Verbindung zu der Widerstandsschicht herstellt und mit dem mittleren Anschluß verbunden ist. Ein Drehen an dem Drehknopf bewirkt, daß das Metallstück auf der Widerstandsschicht hin- und hergleitet. Dadurch kann zwischen dem mittleren Anschluß und einem der äußeren ein stufenloser Widerstandswert zwischen 0Ω und dem Gesamtwiderstand eingestellt werden. Nimmt der Widerstand zwischen der Mitte und einer Seite ab, nimmt er in gleichem Maße gegenüber der anderen Seite zu. Somit läßt sich in unserer Schaltung eine Spannung zwischen 0 und 9 Volt einstellen.

b. Parallelschaltung von Widerständen

Wenn man mehrere Widerstände „nebeneinander“ schaltet, spricht man von einer Parallelschaltung:

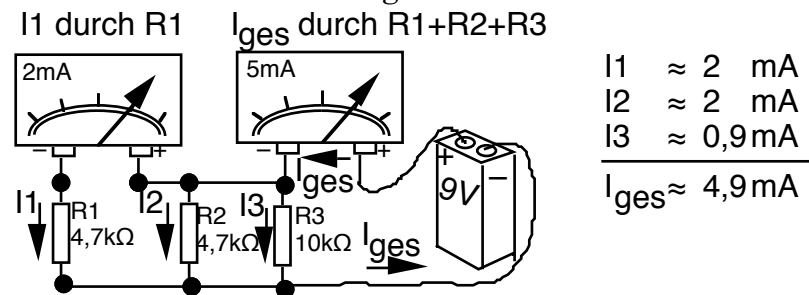


Abb. B4: Parallelschaltung von 3 Widerständen

Hier ist jeder Widerstand direkt mit dem Plus- und Minuspol verbunden, wodurch jeder Widerstand die volle Versorgungsspannung (9V) erhält. Der Strom von der Batterie teilt sich auf und es fließen 3 kleinere Ströme, die in Summe den Gesamtstrom ergeben (Elektronenfluß wird über drei Bahnen geleitet, wodurch in Summe mehr Elektronen fließen können).

Den Gesamtwiderstand zu errechnen, ist hier schwieriger:

$$R_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots}$$

Bei nur zwei Widerständen erhält man eine Vereinfachung der Formel:

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Im Haushalt erfolgt der Anschluß nach diesem Schema: Alle Geräte werden nebeneinander angeschlossen, wodurch jedes Gerät die volle Netzspannung erhält.

Auch Spannungsmeßgeräte (*Voltmeter*) werden parallel zum Verbraucher angeschlossen, da genau diesselbe Spannung wie am Verbraucher auch am Meßgerät anliegen soll:

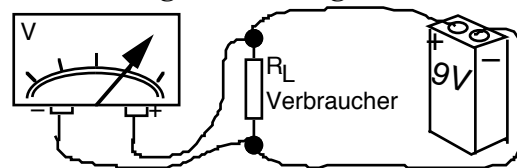


Abb. B5: Korrekter Anschluß eines Voltmeters

3. Der Kondensator

Ein Kondensator kann elektrische Ladungen speichern, er ist somit ähnlich einer Batterie. Im Gegensatz zu einer Batterie läßt er sich aber beliebig oft aufladen und blitzartig entladen, andererseits hat er meist nur eine geringe Speicherkapazität. Die Kapazität (C), das ist ein Maß für die Fähigkeit, Ladungen zu speichern, wird in Farad (F) angegeben, wobei in der Elektronik meist Werte im Bereich von einigen μF (Mikrofarad; 10^{-6}F), nF (Nanofarad; 10^{-9}F) oder pF (Picofarad; 10^{-12}F) verwendet werden.

Prinzipiell besteht ein Kondensator aus zwei Metallplatten, die einen geringen Abstand zueinander haben, aber nicht miteinander verbunden sind. Bei Anlegen von Spannung werden diese Platten elektrisch geladen und zwischen ihnen entsteht ein elektrisches Feld; es wird also zwischen den Platten Energie gespeichert, die man bei Bedarf wieder entnehmen kann.

Nimmt man einen Kondensator und schließt ihn parallel zu einer Leuchtdiode (LED), so leuchtet sie, und der Kondensator wird geladen, da der Strom durch beide Zweige fließt. Nach Abschließen der Spannungsversorgung leuchtet die LED zunächst weiter, dann verdunkelt sie sich langsam, weil der Kondensator die in ihm gespeicherte Ladung über die LED abgibt. Je größer die Kapazität des verwendeten Kondensators ist, desto länger leuchtet die LED nach.

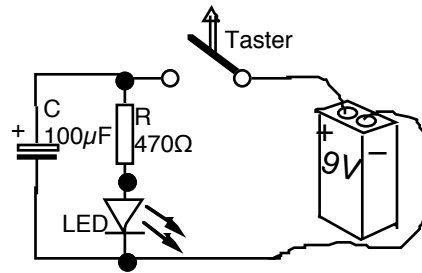


Abb. B6: Kondensator als Speicherelement

Weiters kann man Kondensatoren dazu verwenden, gewellte Spannungen, wie sie z.B. aus Trafos (nach Umwandlung in Gleichspannung) kommen, zu glätten:

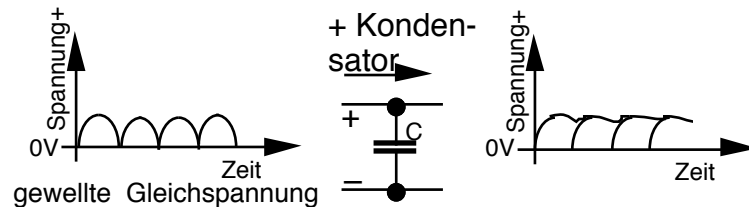


Abb. B7: Glätten einer Spannung durch einen Kondensator

Der Kondensator wird von der gewellten Spannung geladen und kann seine Ladung in den Zeiten, in denen die Spannung niedrig ist (Wellental), abgeben, wodurch die Spannung nur geringfügig zurückgeht und daher gleichförmiger ist.

Während der Zeit, in der ein Kondensator aufgeladen wird, hat er einen recht niedrigen Widerstand (es fließt viel Strom), während er später einen fast unendlich hohen Widerstand hat (er ist voll und braucht keinen Strom mehr). Schließt man ihn wie folgt an, leuchtet die LED daher kurz auf (während des Aufladens) und bleibt dann dunkel (die beiden Kondensatoranschlüsse sollten zuerst kurzgeschlossen werden, um sicherzustellen, daß er am Anfang entladen ist). Je kleiner der Kondensatorwert ist, desto früher ist der Kondensator aufgeladen und desto kürzer leuchtet die LED auf.

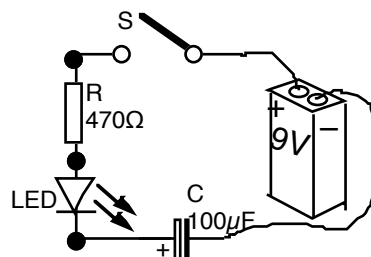


Abb. B8: Die LED leuchtet nur kurz auf

Wegen dieser Eigenschaft kann durch einen Kondensator kein Gleichstrom fließen. Wechselstrom kann den Kondensator aber ziemlich ungehindert passieren, da er den Kondensator laufend lädt, entlädt und wieder lädt. Dadurch kann man mit Kondensatoren Filter bauen, die nur Wechselstrom durchlassen.

Der wirksame Wechselstromwiderstand eines Kondensators berechnet sich folgendermaßen:

$$R_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

„f“ ist die Frequenz des Wechselstroms und „C“ die Kapazität des Kondensators. Aus dieser Formel folgt, daß der wirksame Widerstand geringer wird, wenn Frequenz oder Kapazität zunehmen.

Die Herleitung dieser Formel ist zwar nicht gerade einfach, aber möglich: Die an den Kondensator angelegte Spannung

$$U_1 = U_S \cdot \sin \omega t$$

[U_S ...maximale Spannung der Wechselspannung („Wellenberg“), ω ...Winkelgeschwindigkeit „omega“ (je größer ω ist, desto öfter wird die Polarität des Wechselstromes geändert und desto höher ist demzufolge die Frequenz ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$), t...Zeit] muß gleich der am Kondensator anliegenden Spannung

$$U_2 = Q : C$$

sein [Q...Ladung, C...Kapazität des Kondensators].

Durch Gleichsetzen von U_1 mit U_2 erhält man nach Multiplikation mit C die Formel $Q = C \cdot U_S \cdot \sin \omega t$. Man kann nun diesen Term, der die Ladung Q zur Zeit t ausdrückt, differenzieren und erhält die Änderung der Ladung Q zur Zeit t. Dieses Ändern der Ladung kommt durch Fließen von Strom zustande und entspricht daher dem zur Zeit t fließenden Strom I. Daher gilt: $I = C \cdot U_S \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$, wobei $\cos \omega t$ gleich $\sin(\omega \cdot t + \pi/2)$ ist und daher auch die Schreibweise $I = \omega \cdot C \cdot U_S \cdot \sin(\omega \cdot t + \pi/2)$ möglich ist. Laut Ohmschem Gesetz gilt $I = U : R$. Da $U_S \cdot \sin(\omega \cdot t + \pi/2)$ die Spannung ist, muß $\omega \cdot C$ gleich dem Kehrwert des Widerstandes des Kondensators sein. Der Widerstand des Kondensators im Wechselstrom muß daher

$$R_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

lauten, womit die Formel hergeleitet wäre.

Nach dieser Formel kann ein Kondensator nur Wechselspannung durchlassen (daß er Gleichspannung praktisch nicht durchläßt, wurde bereits im Versuch nach Abb. B8 gezeigt). Je höher die Frequenz wird, desto besser wird er leitend. Daher kann man mit Kondensatoren Filter bauen, die Gleichspannungen und niederfrequente Wechselspannungen (fast) nicht durchlassen, hochfrequente Signale jedoch schon.

Neben dem Speichern und Filtern hat der Kondensator noch einen dritten wichtigen Anwendungsbereich: das Unterdrücken von kurzfristigen Störsignalen. Sollte sich eine Unregelmäßigkeit der Netzspannung über einen Trafo zu einer Schaltung übertragen, kann ein kleiner Kondensator (ca. 100nF) eine kurzfristige Störspannung kurzschließen, weil sie zuerst den Kondensator aufladen muß, ehe sie auf die anderen Bauteile übergreifen kann. Bis der Kondensator geladen wäre, ist das Störsignal meist schon wieder vorbei.

C. Halbleiter

1. Aufbau von Halbleitern

Halbleiter sind Stoffe, deren elektrischer Widerstand einerseits nicht so hoch wie der von Nicht-Metallen, andererseits aber auch lange nicht so niedrig wie bei Metallen ist. Das gebräuchlichste Halbleiterelement ist Silizium aus der IV. Hauptgruppe im Periodensystem.

Bei Halbleitern gibt es einige frei bewegliche Elektronen, die durch Wärme aus ihrer Bindung an den Gitterplätzen frei werden und in geringem Maß Strom leiten können. In der Praxis verunreinigt man die Halbleiter, die selbst vier Außenelektronen besitzen, mit Elementen, die drei oder fünf Außenelektronen haben, wodurch ihre Leitfähigkeit verbessert wird.

Verunreinigt man z.B. Silizium (4 Außenelektronen) mit geringen Mengen von Indium, das nur 3 Außenelektronen besitzt, ordnet sich dieses in das Siliziumgitter ein, es gibt aber eine Stelle, an der es zwar einen *Platz* für ein Elektron, aber kein Elektron gibt. Es herrscht also ein Elektronenmangel. Da es mehr freie Plätze als Elektronen gibt, spricht man von einem positiv- oder *p-Leiter*.

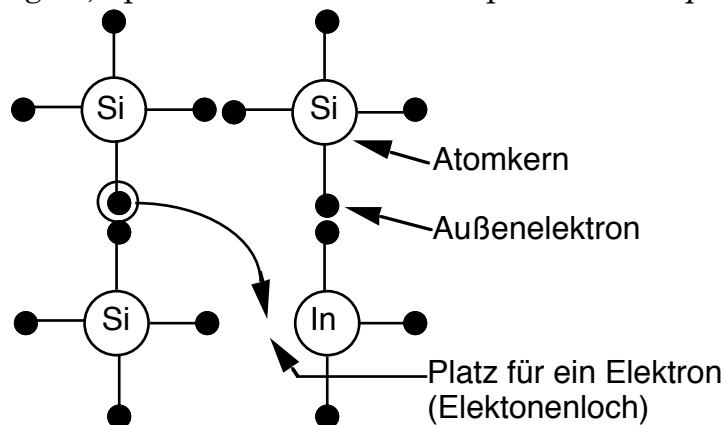


Abb. C1: Schema des Molekülaufbaus von mit Indium dotiertem Silizium (p-Leiter)

Legt man Spannung an, so ist der Stoff jetzt recht gut elektrisch leitend, da sich ein Elektron von einem Atom mit vier Au-

ßenelektronen zu dem freien Platz eines Atoms mit nur drei Außenelektronen weiterbewegen kann (s. Pfeil in Abb. C1). Somit wurde aus dem Atom mit vier Außenelektronen eines mit drei bzw. umgekehrt. Dadurch hat sich die positive Ladung des Atoms, das zuvor ein Elektron zuwenig hatte (Indium...In), auf ein anderes, das jetzt ein Elektron zuwenig hat, übertragen. Dieses Weiterleiten von Elektronen bedeutet, daß Strom weitergeleitet wird bzw. fließt.

Man kann Silizium auch mit einem Stoff wie Arsen, das fünf Außenelektronen hat, dotieren, wodurch es ein Elektron zuviel bekommt. In diesem Fall spricht man von einem *n-Leiter*, da die negativen Elektronen überwiegen.

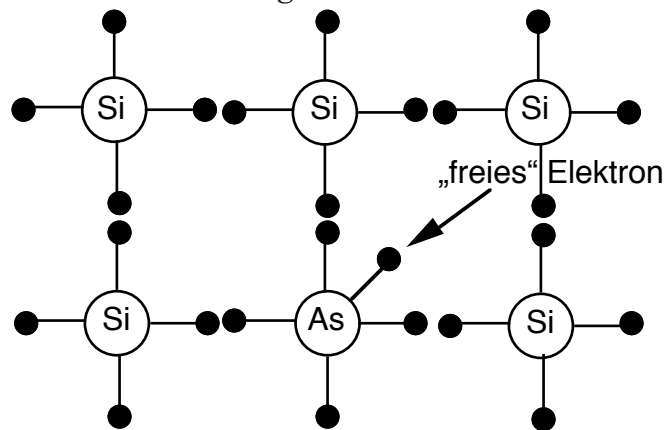


Abb. C2: Mit Arsen dotiertes Silizium (n-Leiter)

Hier gibt es überschüssige Elektronen, die sich beim Anlegen von Spannung bewegen können, wodurch Strom weitergeleitet wird.

2. Die Diode

Die Diode ist das einfachste Halbleiterbauelement. Sie besteht aus zwei Schichten, einer p- und einer n-leitenden Schicht. In einer p-Schicht gibt es freie Gitterplätze, die nicht mit Elektronen gefüllt sind („Löcher“), während die n-Schicht mehr Elektronen als Gitterplätze hat. Normalerweise ist das Stück zwischen beiden Schichten nicht leitend, da sich die positive Ladung der p-Schicht und die negative Ladung der n-Schicht im Übergangsbereich aufheben, indem die Elektronen der n-Schicht die Gitterplätze der p-

Schicht besetzen, wodurch es keine beweglichen Elektronen mehr gibt.



Abb C3: Schaltbild einer Diode (p- und n-Schicht gekennzeichnet)

Auch wenn man die p-Seite an den Minus- und die n-Seite an den Pluspol legt, bleibt die Diode sperrend. Der Isolationseffekt wird sogar noch verstärkt, da der Pluspol der Batterie die negativen Elektronen an sich zieht und der Minuspol die positiv geladenen Teile:

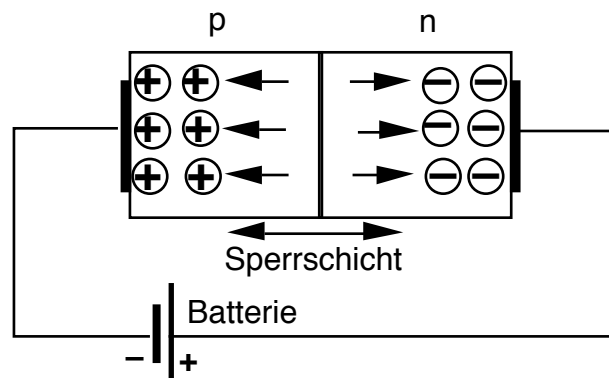


Abb. C4: Sperrende Diode

Erst wenn man die p-Schicht an den Plus- und die n-Schicht an den Minuspol legt, wird die Diode leitend:

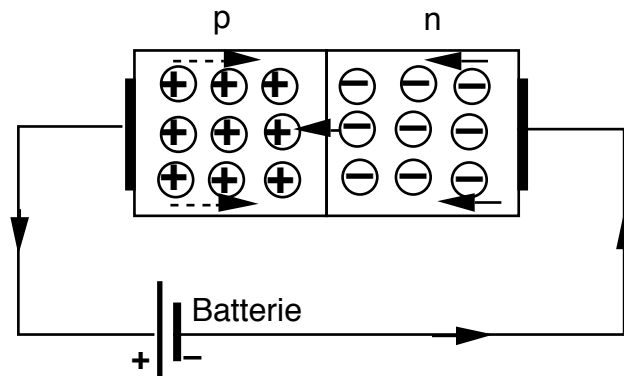


Abb. C5: Leitende Diode

Jetzt werden die Elektronen der n-Schicht vom Pluspol der Batterie angezogen und die positiven Teile vom Minuspol. Zusätzlich „stößt“ der Minuspol die Elektronen weg und der Pluspol die positiven Teile. Die Sperrschicht verschwindet somit und Strom kann fließen, die Pfeile signalisieren das. Die strichlierten Pfeile zeigen, wie der Minuspol die positiv geladenen Teile an sich zieht.

Obwohl die Sperrschicht nun praktisch verschwunden ist und die Diode jetzt nur einen geringen Widerstand zeigt, ist er um einiges höher als bei einem normalen Draht: Am Übergang von p- zu n-Schicht gehen (bei einer Siliziumdiode) ca. 0,6-0,7V verloren.

Die Eigenschaften einer Diode lassen sich nach folgendem Aufbau überprüfen, und gleichzeitig kann auch die bei einer leitenden Diode abfallende Spannung nachgemessen werden:

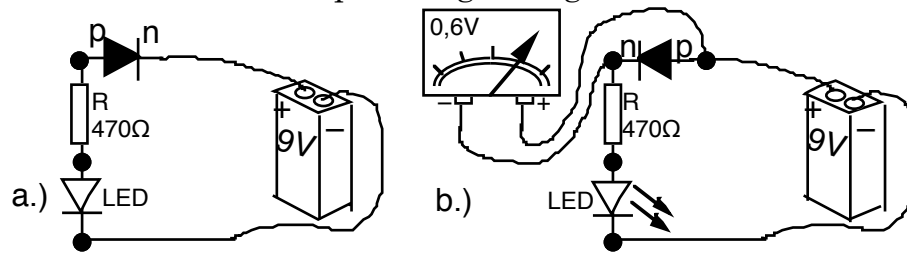


Abb. C6: Eine sperrende (a) und eine leitende (b) Diode

Man sieht, daß die LED nur bei richtiger Polung der Diode leuchtet, die Diode wirkt daher wie ein „elektronisches Ventil“, das den Strom nur in einer Richtung durchläßt.

Diese Eigenschaft läßt sich einsetzen, um aus Wechselspannungen Gleichspannungen zu machen (Gleichrichtung), da der Strom nur in einer Richtung durchfließen kann. Das ist notwendig, weil bei Verwendung von Transformatoren Wechselspannung benötigt wird, die meisten elektronischen Schaltungen aber nur mit Gleichspannung funktionieren.

Die einfachste Art der Gleichrichtung erfolgt mit einer Diode und einem Kondensator:

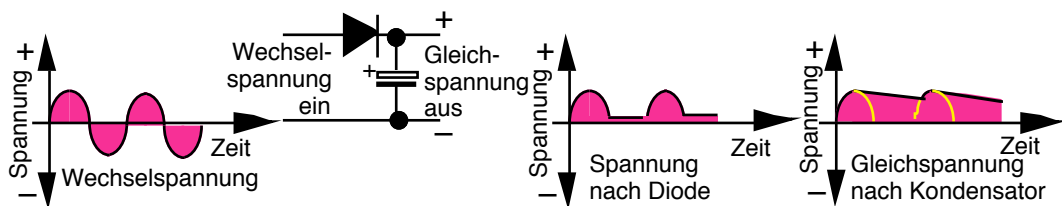


Abb. C7: Gleichrichtung eines Wechselstromes

Auf der linken Seite der Abbildung schließt man eine Wechselspannung an, die Diode läßt aber nur die positiven Anteile durch. Es wird also nur die positive Hälfte der Wechselstromschwingung durchgelassen (mittleres Diagramm). Die Zeiten, in denen kein Strom durchgelassen wird, werden vom Kondensator halbwegs überbrückt. Er wird während der positiven Welle aufgeladen und

entlädt sich dann langsam während der negativen Halbwelle, so daß auch in dieser Zeit die Spannung nicht null ist. Die auf der linken Seite entnehmbare Spannung ist daher eine Gleichspannung, die der Spannung einer Batterie recht ähnlich ist.

Leuchtdioden (LEDs) sind eine Sonderform der Diode. Sie sperren den Strom auch in einer Richtung, leuchten aber, wenn sie richtig gepolt werden (langes Bein an Plus, kurzes an Minus). Um richtig zu leuchten, brauchen sie normalerweise ca. 10-20mA bei 1,6-2V. Um sie an einer 9V-Batterie zu betreiben, muß man daher einen Vorwiderstand (470Ω) verwenden, der die Stromstärke reduziert, damit die LED nicht „durchbrennt“.

3. Der (npn-) Transistor

Ein Transistor besteht aus drei Halbleiterschichten, die beim npn-Transistor in der Folge n-p-n aneinandergereiht sind.

Ähnlich der Diode gibt es zwischen den Schichten eine isolierende Sperrschicht, wenn keine Spannung angelegt wird. Beim Anlegen von Spannung (dabei ist es egal, ob der Pluspol oben oder unten angelegt wird) verringert sich zwar eine der beiden Schichten, die zweite Sperrschicht wird aber noch vergrößert, wie man in Abb. C8a erkennen kann. Die untere Schicht verringert sich zwar, weil der Minuspol die Elektronen zur p-Schicht „stößt“, aber oben wird die Sperrschicht noch vergrößert, da der Pluspol die Elektronen der oberen n-Schicht zu sich zieht, wodurch das gesamte Gebilde wie ein Isolator wirkt.

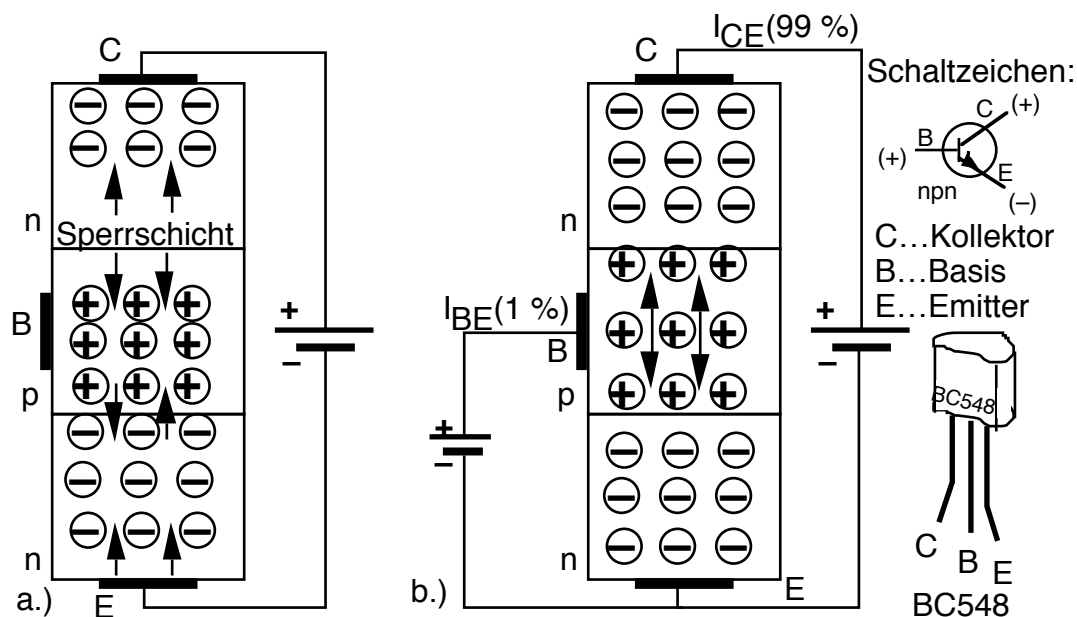


Abb. C8: Aufbau und Schaltzeichen eines npn-Transistors
 (a: sperrend; b: leitend)

Der Transistor hat aber nicht nur zwei Anschlüsse, die mit den n-Schichten verbunden sind (Kollektor (C) und Emitter (E)), sondern auch noch einen dritten mit der p-Schicht verbundenen Anschluß, die Basis (B).

Schließt man eine kleine Spannung zwischen Basis (Plus) und dem Minuspol an, wird die untere pn-Schicht wie bei einer Diode leitend. Da aber die p-Schicht nur sehr dünn ist, fließen die positiven Ladungsträger des Basisstromes nicht nur in die untere n-Schicht, sondern zu einem Teil auch in die obere n-Schicht, wodurch die Sperrschicht überwunden wird und Strom zwischen Kollektor und Emitter fließen kann (Abb. C8b). Da der Basisstrom den Kollektor-Emitterstrom „nur auf die richtige Bahn bringen muß“, indem er die Sperrschichten überwindet, reicht ein sehr geringer Basisstrom aus, um einen vielfach höheren Kollektor-Emitterstrom zu steuern.

In der Praxis läßt man als Basisstrom (zwischen Basis und Emitter) meist nur ein Hundertstel des Kollektorstroms (zwischen Kollektor und Emitter) fließen. Somit ergeben sich folgende Anwendungsmöglichkeiten: Man kann mit Hilfe eines Transistors bei Verwendung von minimalem Steuerstrom einen großen

Kollektor-Emitterstrom steuern oder ein schwaches Signal verstärken. Der Transistor kann also als elektronischer Schalter (er schaltet ein, wenn Basisstrom fließt, bzw. aus, wenn kein Basisstrom ausreichender Stärke vorhanden ist) oder als Verstärker (wie in der folgenden Schaltung) verwendet werden.

Um die CE-Strecke leitend zu machen, braucht man eine Basisspannung (zwischen B und E) von ca. 0,6-0,7V. Das ergibt sich daraus, daß am unteren Übergang zwischen p- und n-Schicht – genau wie bei einer Diode – ungefähr 0,6V nötig sind, um die beiden Schichten zu überwinden. Ähnlich einer leitenden Diode, an der am Übergang zwischen den zwei Schichten 0,6V abfallen, gehen bei einem leitenden Transistor in der CE-Strecke 1,2V verloren, da es in den drei Schichten *zwei* Übergänge gibt. Das bedeutet, daß bei einer 9V-Spannungsversorgung nur noch 7,8V am Transistorausgang entnehmbar sind, wenn die CE-Strecke des Transistors durch einen entsprechenden Basisstrom leitend gemacht wird.

Bei einem npn-Transistor muß die Steuerspannung *zwischen die Basis (+) und den Minuspol* gelegt werden. Der *Emitter* wird normalerweise *an den Minuspol* gelegt. Der Verbraucher, der über den Basisstrom gesteuert wird, wird dann zwischen dem Pluspol und dem Kollektor (-) angeschlossen. Je nach der Größe des Basisstroms läßt der Kollektor dem Verbraucher einen unterschiedlich großen negativen Strom zufließen.

Der Versuchsaufbau sieht folgendermaßen aus:

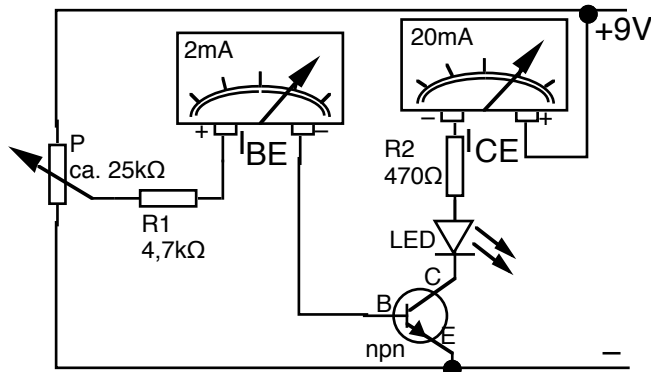


Abb. C9: Prinzipschaltung eines npn-Transistors

Über das Potentiometer kann man die Spannung und somit auch die Stromstärke, die zur Basis gelangt, regulieren, was mit dem linken Meßgerät nachmeßbar ist. R1 reduziert den Basisstrom nochmals, damit der Transistor nicht beschädigt werden kann. Der Basisstrom, der mit Hilfe des Potentiometers einstellbar ist, bewirkt einen vielfach höheren Kollektorstrom, der über das rechte Meßinstrument angezeigt wird und zur Leuchtdiode gelangt. Der Widerstand R2 reduziert diesen Strom, um die LED zu schützen. Je nach der Größe des Kollektorstromes, der über den Basisstrom geregelt wird, ändert sich die Helligkeit der Leuchtdiode.

In dieser Schaltung verstärkt der Transistor den Basisstrom und läßt einen stärkeren Kollektorstrom zu unserem Verbraucher, der LED, fließen; er ist also ein *Verstärker*. Durch einen erhöhten Basisstrom (bzw. eine erhöhte Spannung zwischen Basis und Emitter) verringert sich der Widerstand der CE-Strecke des Transistors. Der Transistor wirkt daher praktisch wie ein variabler Widerstand.

Selbstverständlich ist es auch möglich, die Lage von Transistor und LED zu verändern: Man kann den Kollektor des Transistors an den Pluspol und die LED und ihren Vorwiderstand zwischen den Emitter und den Minuspol anschließen, und die Schaltung würde weiterhin funktionieren.

Wird der Steuerstrom nicht langsam und stufenlos verändert, sondern plötzlich ein- und ausgeschaltet, wirkt sich das auf den Verbraucher im Kollektorstromkreis aus, indem auch er ein- und ausgeschaltet wird. In diesem Fall, wenn es zwischen ein und aus keine Zwischenwerte gibt, spricht man von einem elektronischen Schalter. Angewandt wird diese Funktion, wenn z.B. ein kleines Signal aus einem Mikroprozessor, der nur sehr wenig Strom liefern kann, einen Verbraucher wie z.B. eine Lampe oder einen Motor steuern soll.

D. Der Operationsverstärker

1. Was ist ein Operationsverstärker?

Ein Operationsverstärker ist ein integrierter Schaltkreis (engl.: integrated circuit, IC). Das heißt, daß eine Schaltung aus vielen Widerständen, Dioden und Transistoren in *einem* kompakten Gehäuse untergebracht ist.

Ein Operationsverstärker hat normalerweise zwei Anschlüsse für seine Spannungsversorgung, zwei Eingänge und einen Ausgang. Die Aufgabe des Operationsverstärkers ist es, die *Spannungsdifferenz* zwischen den beiden Eingängen verstärkt am Ausgang abzugeben.

Ein Eingang kann als Plus-, der andere als Minuseingang bezeichnet werden. Im Operationsverstärker wird praktisch die Spannung am Pluseingang von der am Minuseingang abgezogen und das Ergebnis dann mit einem bestimmten Faktor, dem Verstärkungsfaktor, multipliziert. Hätte man also 7V am Pluseingang und 5V am Minuseingang, wäre die Spannungsdifferenz 2V.

Somit *steigt* die Differenzspannung, wenn die Spannung am Pluseingang steigt oder am Minuseingang fällt. Umgekehrt *fällt* die Ausgangsspannung, wenn die Spannung am Pluseingang fällt oder am Minuseingang steigt.

Da sich die Ausgangsspannung genau verkehrt zur Spannung am Minuseingang verhält, wird dieser auch als *invertierender Eingang* bezeichnet. Im Gegensatz dazu heißt der andere Eingang *nichtinvertierend*, weil sich eine Spannungserhöhung an diesem Eingang auch als Spannungserhöhung am Ausgang bemerkbar macht.

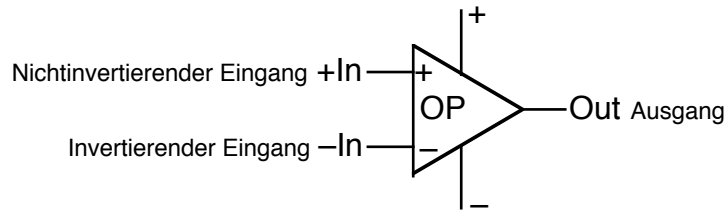


Abb. D1: Schaltzeichen für einen Operationsverstärker

Die meisten Operationsverstärker verstärken die Spannungsdifferenz um Faktoren von mehr als 100 000. Daher wirkt sich schon eine minimale Spannungsdifferenz sehr stark auf die Ausgangsspannung aus. Ist auf beiden Eingängen genau dieselbe Spannung, würde, wenn es keinerlei herstellungsbedingte Toleranzen gäbe, am Ausgang eine Spannung von 0V herauskommen. Würde dann die Spannung am Plus Eingang lediglich um 0,000 09V steigen, wären am Ausgang bereits 9V meßbar, wenn die Differenz um den Faktor 100 000 verstärkt wird (in den Beispielen wird immer eine 9V-Spannungsversorgung verwendet). Allerdings fällt an den Halbleiterschichten und Widerständen im Operationsverstärker, wie auch beim Transistor, ein Teil der Spannung ab. Diese Spannung beträgt je nach Verbraucher 1 bis 2V beim $\mu A741$, der in den folgenden Schaltungen verwendet wird. Somit kann ein Operationsverstärker, der an eine 9V-Batterie angeschlossen wird, meist nur 7 bis 8V am Ausgang abgeben. Daher würde der Ausgang bei der oben angeführten Differenz nur ungefähr 7,5V abgeben, obwohl rein rechnerisch 9V abgegeben werden müßten. Es ist aber selbstverständlich, daß nie mehr Spannung abgegeben werden kann, als von der Batterie zur Verfügung gestellt wird.

Wie an späterer Stelle ausgeführt, läßt sich diese Verstärkung leicht reduzieren, sodaß man die Verstärkung beliebig klein festlegen kann.

Somit kann man den Operationsverstärker – kurz Op-Amp (engl. „*Operational Amplifier*“) – auch als etwas besseren Transistor ansehen, der prinzipiell dasselbe kann, jedoch um einiges besser. So hat man z.B. keine fixe Verstärkung mit einem Verstärkungsfaktor von circa Hundert, sondern einen Verstärkungsfaktor von ca. 100 000, der sich je nach Bedarf reduzieren läßt.

Ähnlich einem Transistor läßt sich auch der Op-Amp als Schalter einsetzen, der bei einer gewissen Steuerspannung einen Verbraucher einschaltet, oder als Verstärker, der z.B. die Helligkeit einer LED regelt oder ein Tonsignal verstärkt.

2. Prinzipieller Aufbau eines Op-Amps

Das wichtigste Stück eines Operationsverstärkers ist der sogenannte Differenzverstärker, der die Differenz der beiden Eingangsspannungen ermittelt und bereits etwas verstärkt.

Der prinzipielle Aufbau eines Op-Amps ist in Abb. D2 skizziert:

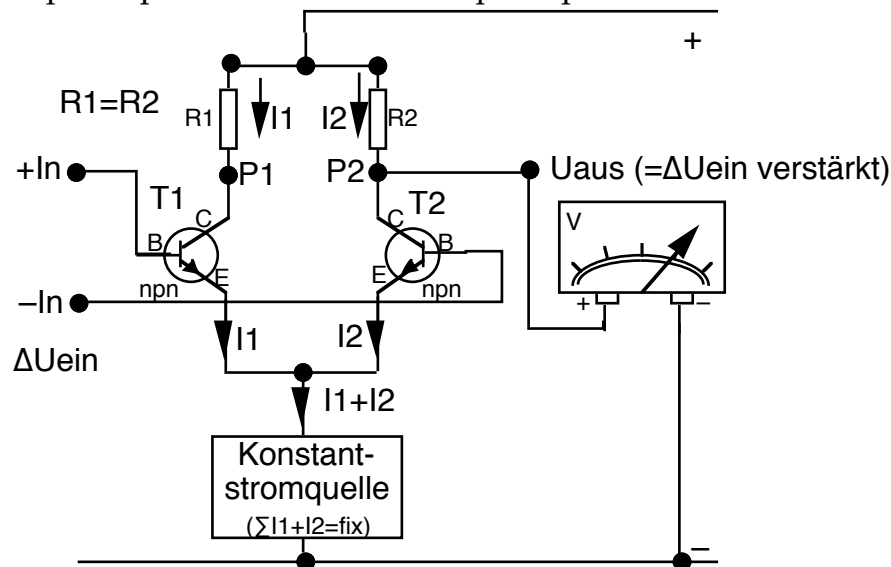


Abb. D2: Das Prinzip des Differenzverstärkers

Ein konstanter Strom fließt über zwei Widerstand-Transistorpaare. Jeder Eingang kann einen der Transistoren steuern.

Legt man z.B. Spannung an den rechten Eingang $-In$ (der Minuspol des Eingangssignals wird an den Minuspol angeschlossen), wird der Transistor $T2$ besser leitend. Da der Widerstand des Transistors geringer wird, wird auch die Spannung, die über ihm abfällt, geringer: $R2$ und $T2$ bilden nämlich einen Spannungsteiler. Wird $T2$ besser leitend, geht mehr Spannung am Widerstand $R2$ verloren, sodaß das Meßgerät nur mehr eine geringere Spannung anzeigt. Hiermit wurde gezeigt, daß eine Spannungserhöhung an $-In$ eine Spannungsverringerung am Ausgang zur Folge hat, weil sich die Differenz aus $+In$ und $-In$ verringert hat.

Legt man hingegen Spannung an +In an, wird T1 besser leitend und auf der linken Seite (I1) fließt ein größerer Strom, der auf der rechten Seite (I2) dementsprechend abnehmen muß, weil der Gesamtstrom konstant gehalten wird. Da der Widerstand auf der rechten Seite gleich geblieben ist und der auf der linken Seite abgenommen hat, ist der Gesamtwiderstand von beiden Seiten auch geringer. Daher würde an und für sich mehr Strom fließen. Um den Strom einzubremsen, muß daher die Stromquelle in Aktion treten, indem sie ihren Widerstand vergrößert, um den Stromfluß auf das gewünschte Maß zu reduzieren. Da das Meßgerät die Spannung über T2 *und* der Konstantstromquelle mißt, wird insgesamt mehr Spannung angezeigt, weil der Widerstand der Konstantstromquelle und somit auch die Spannung über ihr zugenommen hat. Man kann somit erkennen, daß eine Erhöhung der Spannung an +In tatsächlich eine Erhöhung der Ausgangsspannung bewirkt.

In der Praxis wird die Spannung am Punkt P2 über weitere Verstärkerstufen, die aus mehreren Transistoren bestehen, verstärkt, ehe sie am Ausgang abgegeben wird. Insgesamt werden somit Verstärkungen von über 100 000 erreicht. Der μ A741, der in den folgenden Schaltungen verwendet wird, hat einen Verstärkungsfaktor von bis zu 200 000.

Der eigentliche große Vorteil dieser Schaltung ist, wie schon der Name sagt, daß die Ausgangsspannung von der *Differenz* der Eingangsspannungen abhängt. Wenn sich beide Eingangsspannungen in gleichen Maße ändern, ändert sich an dem Punkt P2 nichts, da sich die Widerstände der Transistoren in demselben Ausmaß verändern. Ein weiterer Vorteil dieser Schaltung ist, daß Störeinflüsse (z.B. Netzbrummen oder Störsignale als Folge langer Leitungen) einander gegenseitig aufheben, wenn sie gleichmäßig auf beiden Seiten auftreten.

3. Der Operationsverstärker als Komparator

Eine Anwendung des Operationsverstärkers ist die Komparatorfunktion. Hier vergleicht der Operationsverstärker die Spannungen an den beiden Eingängen (lat. „comparare“=vergleichen) und schaltet je nachdem, welche Spannung höher ist, einen Verbraucher ein oder aus. Eine Anwendung wäre z.B. ein Thermostat, der über einen Sensor den Ist-Wert mißt und ihn mit dem festgelegten Soll-Wert vergleicht und dann bei Bedarf die Heizung aktiviert.

Bei einem Komparator werden die Spannungsdifferenzen mit dem vollen Verstärkungsfaktor multipliziert, sodaß geringste Spannungsunterschiede bereits entscheiden, ob die minimale oder die maximale Ausgangsspannung abgegeben wird. Die maximale Ausgangsspannung ist leider nie die volle Versorgungsspannung von 9V, sondern meist lediglich 7-8V. Auch die Minimalspannung beträgt nicht 0V, sondern ca. 2V, sodaß die LED auch in diesem „Aus-Zustand“ etwas leuchtet. Der Bereich, in dem Zwischenwerte auftreten, ist so klein, daß er in der Praxis keine Rolle spielt. Sobald die Spannung am *Plus*eingang minimal *größer* ist, wird der Verbraucher *eingeschaltet*, sobald sie am *Minus*eingang *höher* ist, bekommt der Verbraucher (fast) *keinen Strom* mehr. Da es keine Zwischenwerte zwischen ein und aus gibt, ist der Op-Amp als Komparator einem Schalter sehr ähnlich.

Ein Komparator kann so aufgebaut werden:

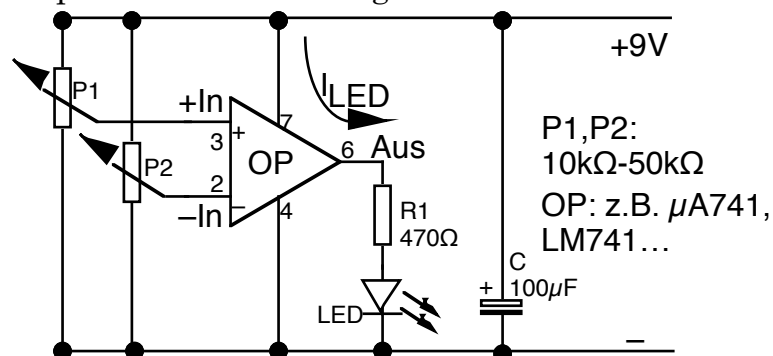


Abb. D3: Der Op-Amp als Komparator

Über P1 und P2 kann eingestellt werden, wieviel Spannung an die Eingänge (+In und -In) gelangt. Die Potentiometer teilen die Spannung in zwei Teile auf: Ein Teil der Spannung ist zwischen dem Pluspol und dem Op-Amp-Eingang und der zweite Teil

zwischen dem Eingang und dem Minuspol. Die Summe der Spannungen ergibt 9V. Da die Potentiometer nur als Spannungsteiler wirken, ist es in weiten Grenzen egal, welchen Wert man nimmt, jedoch wäre ein Wert zwischen $10\text{k}\Omega$ und $50\text{k}\Omega$ zu empfehlen.

Sobald die über P1 an +In gelangende Spannung geringfügig höher als die Spannung an –In wird, schaltet der Op-Amp seinen Ausgang ein und die LED, die an ihm angeschlossen ist, leuchtet. Ist jedoch die Spannung an –In, die über P2 einstellbar ist, höher, gibt der Ausgang nur mehr sehr wenig Spannung ab und die LED „glüht“ nur sehr schwach. Der Bereich, in dem die LED halb leuchtet, ist minimal und es ist kaum möglich, die Potentiometer so einzustellen, daß die LED mittelstark leuchtet.

Der Kondensator hat die Aufgabe, Störungen zu unterdrücken, die z.B. auftreten könnten, wenn die Leitung von der Batterie zur Schaltung kurz unterbrochen werden sollte.

a. Der Schmitt-Trigger-Komparator

Das plötzliche Hin- und Herschalten, das in der vorigen Schaltung zu sehen war, ist nicht immer erwünscht. Bei einem Thermostat ist es z.B. nicht sehr nützlich, wenn die Heizung laufend ein- und ausgeschaltet wird, um genau 20°C einzuhalten. Man will nicht, daß bei $19,99^\circ$ schon geheizt wird und bereits bei $20,01^\circ$ ausgeschaltet wird. Es ist vielmehr sinnvoll, wenn man wartet, bis die Temperatur auf $19,5^\circ\text{C}$ abgefallen ist und erst dann heizt, jetzt allerdings gleich bis $20,5^\circ\text{C}$. Danach kann die Heizung einige Zeit lang ausgeschaltet bleiben, bis die Temperatur wieder auf $19,5^\circ\text{C}$ abgefallen ist. Wenn die Heizung seltener und dafür länger läuft, wird die Energie effizienter ausgenützt und außerdem wird die Heizung weniger stark abgenützt.

Man möchte also, daß es einen bestimmten Schwellbereich gibt, in dem kleine Änderungen ohne Auswirkung bleiben (hier 1°C). Dieses Verzögerungsverhalten wird als Hysterese bezeichnet und mit einer sogenannten Schmitt-Trigger-Schaltung verwirklicht:

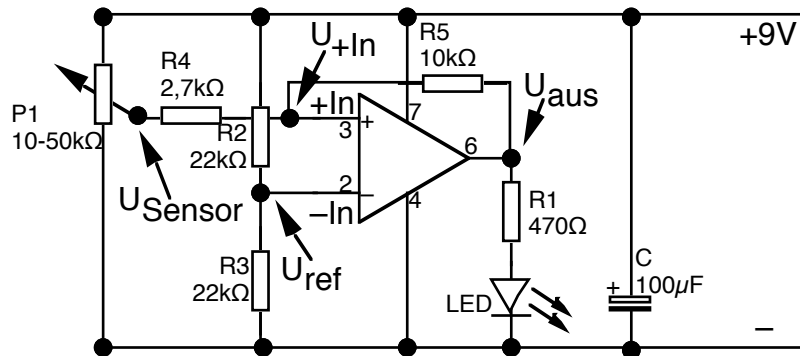


Abb. D4: Ein Op-Amp mit Schmitt-Trigger-Verhalten

In dieser Schaltung ist die Spannung an $-In$ (U_{ref}) über $R2$ und $R3$ auf ungefähr $4,5V$ festgelegt. Die Spannung an $+In$ ist über $P1$ einstellbar, wobei ein minimaler Teil über $R4$ verlorenght. Es wird also die Differenz zwischen der Referenzspannung U_{ref} , die als Bezugswert fungiert, und der über $P1$ einstellbaren Spannung U_{Sensor} berechnet.

Verändert man diese Spannung durch Drehen am Potentiometer, wird an einem gewissen Punkt die LED eingeschaltet. Um sie wieder auszuschalten, genügt es aber nicht, das Potentiometer zurück zum „Einschaltspunkt“ zu drehen, sondern man muß noch etwas *weiter* zurückdrehen. Die Spannung an $+In$, die zum Einschalten benötigt wird, ist um einiges höher als die zum ausschalten benötigte.

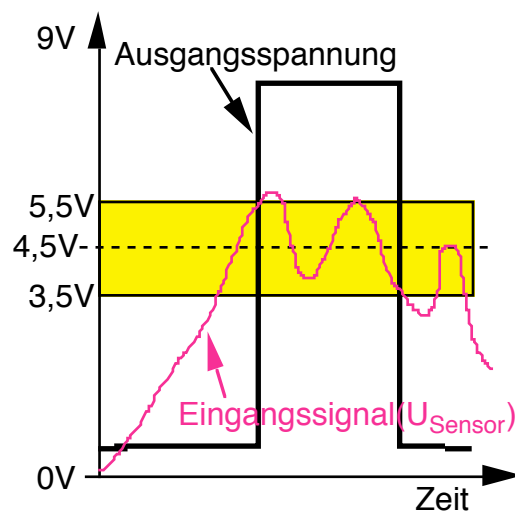
Der Grund dafür ist der Widerstand $R5$, der einen Teil der Ausgangsspannung zurück zu $+In$ fließen läßt: Sobald die Eingangsspannung so hoch ist, daß LED 1 leuchtet (Op-Amp-Ausgang schaltet gegen Plus), wird ein Teil dieser Spannung über $R5$ an den positiven Eingang zurückgeführt. Dadurch wird dort die Spannung „künstlich“ erhöht, wodurch das Eingangssignal selbst sehr *stark* abnehmen muß, um diese Erhöhung auszugleichen und den Ausgang wieder zurückzuschalten.

Damit die an $+In$ gelangende Spannung geringer als die an $-In$ anliegende Referenzspannung (hier ca. $4,5V$ wegen des Spannungsteilers $R2/R3$) wird, genügt es jetzt nicht mehr, daß die vom Potentiometer kommende Spannung U_{Sensor} geringer als $4,5V$ wird, sondern jetzt muß die Summe aus *Eingangsspannung* U_{Sensor} *plus* der über $R5$ rückgeführten Spannung *unter* $4,5V$ sein

($U_{+In} < 4,5V$), um die LED auszuschalten (Ausgang schaltet gegen Minus).

Ist der Fall eingetreten, daß der Grenzwert unterschritten wurde und der Ausgang gegen Minus schaltet, wird der positive Eingang über R5 praktisch mit dem Minuspol verbunden, wodurch die Spannung an diesem Eingang sinkt. Damit an diesem Eingang +In nun 4,5V anliegen und sich die LED einschaltet, muß die Eingangsspannung U_{Sensor} mehr als 4,5V betragen, weil auch die über R5 rückgeführte Spannung „überwunden“ werden muß.

Anhand der folgenden Graphik kann man recht gut sehen, wann der Ausgang umschaltet (Abb. D5):



Die Eingangsspannung muß eine bestimmte Schwelle überschreiten, ehe der Verbraucher eingeschaltet wird (hier ca. 1V).

Fällt die Spannung des Eingangssignals, so muß eine Schwelle unterschritten werden, ehe der Verbraucher ausgeschaltet wird.

Es wird also nicht bei 4,5V umgeschaltet, sondern erst bei 5,5V bzw. 3,5V.

Die Schwellenspannung kann man sich auch berechnen; sie ergibt sich aus R4 und R5. Je kleiner R5 ist, desto mehr kann das Ausgangssignal die Spannung an +In beeinflussen, wodurch der Schwellbereich, in dem eine Eingangsspannungsänderung keinerlei Auswirkung am Ausgang zeigt, größer wird. Die Hysterese (der Schwellbereich) ergibt sich auf folgende Weise:

$$\text{Hysterese} = U_{\text{aus}} \cdot \frac{R4}{R5}$$

U_{aus} ist diejenige Spannung, die am Op-Amp herauskommt, also die (gesamte) Versorgungsspannung (hier 9V) minus der im Op-Amp verlorenen Spannung (ca. 1,7V). In unserem Fall ergibt die Hysterese ungefähr $(7,3V) \cdot (2,7k\Omega / 10k\Omega) \approx 2V$. Es gibt also einen „toten Bereich“ von ca. 2V, innerhalb dessen sich Schwankungen

der Eingangsspannung nicht auf die Ausgangsspannung auswirken.

b. Thermostat

Ein Thermostat kann auf folgende Art und Weise mit Hilfe eines Operationsverstärkers hergestellt werden:

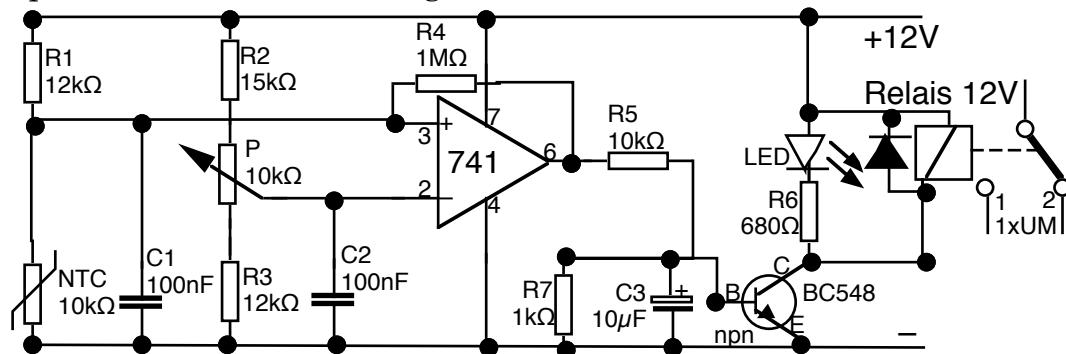


Abb. D6: Thermostat

Diese Schaltung ist für 12V ausgelegt, da die meisten Relais mit 12V arbeiten. Ein Relais kann über einen Elektromagneten (der in diesem Fall bei etwa 12V reagiert) einen Schalter öffnen und schließen, der Verbraucher direkt an Netzspannung ein- und ausschalten kann. Im Versuchsaufbau kann man durchaus das Relais und den Transistor (mit R5, R7 und C3) weglassen und die LED mit ihrem Vorwiderstand R6 direkt zwischen den Ausgang des Op-Amps und den Minuspol anschließen. In diesem Fall genügt eine einfache 9-Volt-Batterie als Spannungsversorgung.

Als Temperaturfühler wurde hier ein 10kΩ-NTC-Widerstand verwendet. Sein Widerstand beträgt bei 25°C 10kΩ und wird bei Erwärmung geringer (besser leitend) und bei Abkühlung höher (schlechter leitend).

Über den Spannungsteiler R1/NTC kommt eine Spannung an +In des Op-Amps. Wird die Temperatur niedriger, wird der Widerstand des NTC-Widerstandes höher, wodurch (infolge des Ohmschen Gesetzes) eine höhere Spannung an +In gelangt. Bei Erwärmung sinkt die Spannung an +In. C1 dient dabei zur Stabilisierung der Spannung und zum Unterdrücken von eventuellen Störsignalen, die bei langen Leitungen auftreten können.

Diese Spannung wird mit der durch den Spannungsteiler R2/P/R3 festgelegten Referenzspannung verglichen. Über P läßt sich die Spannung so verändern, daß sich die LED (und auch das Relais) je nach Potentiometerstellung zwischen 10°C und 30°C einschaltet.

Wird nun die Umgebungstemperatur geringer, wächst der Widerstand des Sensors und die Spannung an +In steigt, wodurch zu einem bestimmten Zeitpunkt ausreichend Spannung an +In gelangt, um die LED und das Relais einzuschalten. Wird (wegen einer an das Relais angeschlossenen Heizung) der NTC-Widerstand geringer, fällt mehr Spannung an R1 ab und die Spannung an +In nimmt ab, sodaß die LED und das Relais wieder ausgeschaltet werden. Im Versuch kann man den Temperaturfühler mit den Fingern erwärmen.

R4 bewirkt eine Hysterese, sodaß nicht laufend kurzfristig ein- und ausgeschaltet wird, sondern zuerst einige Zeit lang geheizt wird, dann eine recht lange Pause kommt und sich die Heizung erst wieder einige Zeit später einschaltet. Der Hysterese-Bereich beträgt hier etwa 0,6°C, sodaß man die Temperaturschwankungen kaum spürt.

Der Transistor wurde verwendet, weil der Op-Amp nicht direkt das Relais ansteuern könnte, ohne überlastet zu werden. Über R5 wird der Ausgangsstrom geregelt und der Basis des Transistors zugeführt. Der Kondensator C3 dient dabei der Spannungsstabilisierung, und R5 wirkt zusammen mit R7 wie ein Spannungsteiler, sodaß circa 1V zwischen der Basis und dem Minuspol anliegt, was ausreicht, um den Transistor einwandfrei anzusteuern (circa 0,7V sind nötig). Sobald der Op-Amp den Ausgang einschaltet, gelangt Strom zur Basis und die Kollektor-Emitterstrecke wird leitend, wodurch die LED und das Relais eingeschaltet werden. Obwohl der Op-Amp auch in der „Aus-Stellung“ 2V abgibt, bleibt in diesem Fall die LED vollkommen dunkel, weil der Transistor über den Spannungsteiler R5/R6 nur knappe 0,2V erhält, was zum Durchschalten bei weitem zu wenig ist.

Ersetzt man den Temperaturfühler durch einen lichtempfindlichen Widerstand, so erhält man einen Dämmerungsschalter, der automatisch, wenn es dunkel wird, ein Licht einschaltet (die Werte von R2-P-R3 müssen dann gegebenenfalls geändert werden).

4. Der Op-Amp als (invertierender) Verstärker

Im vorigen Kapitel sollte der Ausgang des Op-Amps bei einer bestimmten Grenzspannung plötzlich von Minus auf Plus „springen“. Dieses Verhalten ist jedoch nicht immer erwünscht. Es kann z.B. sein, daß man ein bereits vorhandenes Signal bloß weiterverstärken will, wie es in der Audiotechnik der Fall ist, oder daß man geringfügige Spannungsänderungen an einem Fühler verstärkt über ein Meßgerät anzeigen will, wie es z.B. bei einem elektronischen Thermometer der Fall ist. In diesen Anwendungen schaltet der Op-Amp nicht nur zwischen den Extremwerten Plus und Minus hin und her, sondern er kann auch sämtliche Zwischenwerte erzeugen.

Für diese Anwendungen muß man die hohen Verstärkungsfaktoren reduzieren. Es gibt dabei einen recht einfachen Trick: Man bremst die Verstärkung ein, indem man das verstärkte Signal dazu verwendet, sich selbst abzuschwächen (Gegenkopplung). In der Praxis funktioniert das so:

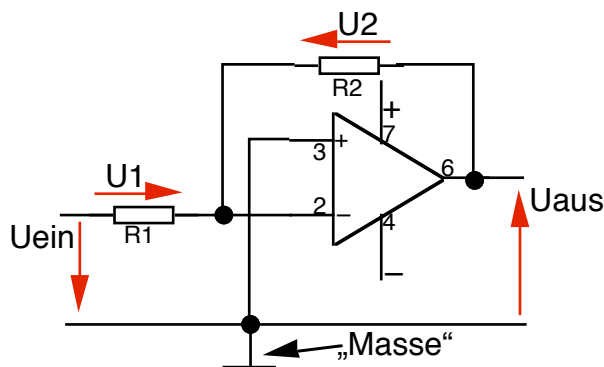


Abb. D7: Gegenkopplung beim invertierendem Verstärker (die Pfeile sollen den Weg des Stromes kennzeichnen)

Die Gegenkopplung beim *invertierenden Verstärker*, der das Vorzeichen der Eingangsspannung umkehrt und die Spannung verstärkt, beruht darauf, daß über den Widerstand R2 ein Teil der

verstärkten Ausgangsspannung an den invertierenden Eingang zurückgeführt wird, wodurch das Ausgangssignal eingebremst wird. Als Bezug für positiv und negativ gilt dabei die Spannung, die am nichtinvertierenden Eingang (Pin 3) anliegt, da ja der Op-Amp die Spannungen an den beiden Eingängen *vergleicht* und ihre *Differenz* verstärkt. Dieser Punkt kann auch als Masse bezeichnet werden, wenn er wie in der folgenden Schaltung den zentralen Bezugspunkt darstellt.

Kommt ein Eingangssignal über R1 an $-In$, so wird es verstärkt und (in Bezug auf $+In$) negativ abgegeben (aus geringem „+“ wird großes „-“). Diese (wieder in Bezug auf $+In$) negative Spannung gelangt über R2 zurück an $-In$. Ohne R2 würde der Op-Amp wegen des hohen Verstärkungsfaktors den Ausgang praktisch direkt mit dem Minuspol verbinden. Über R2 gelangt jedoch ein Teil der herauskommenden negativen Spannung zurück zum invertierenden Eingang. Wie gesagt ändert dieser die Polarität und somit kommt ein positiveres Signal heraus. Dieses durch R2 verursachte positive Signal wirkt also dem invertiert verstärkten und daher negativ gewordenen Eingangssignal entgegen, sodaß nur mehr eine geringe Verstärkung übrigbleibt.

Die Ableitung der Berechnung der Verstärkung ist nicht allzu schwer: Man wählt als zentralen Punkt $-In$. Zu ihm fließt ein Strom von Masse über das Eingangssignal (Pfeil „ U_{ein} “) und R1 (Pfeil „ U_1 “). Ein anderer Strom fließt von Masse über das Ausgangssignal (Pfeil „ U_{aus} “) sowie R2 (Pfeil „ U_2 “) ebenfalls zum Punkt $-In$. Man muß sowohl durch Zusammenzählen der Spannungen $U_{ein}+U_1$ als auch durch die Summe von $U_{aus}+U_2$ auf dasselbe Ergebnis kommen, da beide die Spannung zwischen Masse und $-In$ ergeben müssen. Weiters müssen sich daher U_{aus} zu U_{ein} so wie U_2 zu U_1 verhalten. Diese verhalten sich dann wiederum wie ihre beiden Widerstandswerte R2 zu R1. Da sich die Spannungsverstärkung ergibt, indem man die Ausgangsspannung durch die Eingangsspannung dividiert, erhält man folgende Formel:

$$\text{Verstärkung} = - \frac{U_{aus}}{U_{ein}} = - \frac{U_2}{U_1} = - \frac{R_2}{R_1}$$

Das Minuszeichen ist deshalb erforderlich, weil U_{ein} und U_{aus} unterschiedliche Vorzeichen haben und der invertierende Verstärker die Signale nicht nur verstärkt, sondern auch vom Positiven ins Negative umwandelt bzw. umgekehrt.

Der Versuch kann so aufgebaut werden:

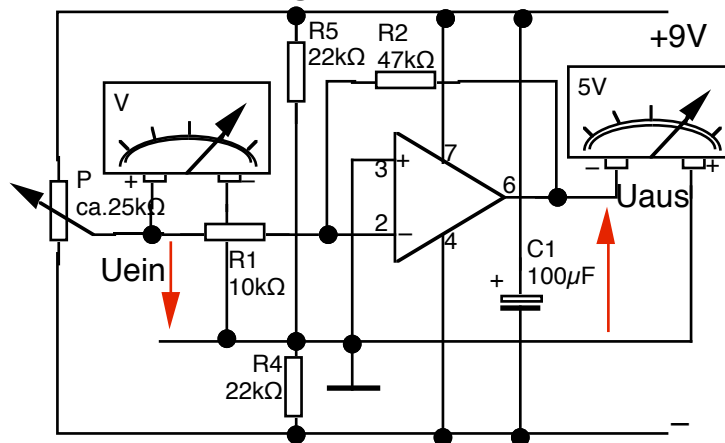


Abb. D8: Invertierender Verstärker mit einer Verstärkung von ca. 5

Der Verstärkungsfaktor läßt sich hier sofort mit der vorhin hergeleiteten Formel berechnen:

$$\text{Verstärkung} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{47\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} = -4,7$$

Dabei fällt auf, daß der Verstärkungsfaktor keineswegs von dem Verstärkungsfaktor des Op-Amps abhängt (sofern er über 4,7 ist), sondern lediglich von der Genauigkeit von R_1 und R_2 . Außerdem kommt vielleicht die Frage auf, wieso man bei einem so geringen Verstärkungsfaktor überhaupt einen Op-Amp und nicht bloß einen Transistor verwendet. Es gibt vor allem zwei Gründe: Einerseits läßt sich beim Transistor der Verstärkungsfaktor nicht einstellen (es ist nicht immer wünschenswert, möglichst hohe Verstärkungsfaktoren zu erzielen!), und andererseits erzeugt ein Operationsverstärker weniger Nebengeräusche und Störsignale als ein Transistor.

In diesem Versuch wurde die Versorgungsspannung über den Spannungsteiler R_4/R_5 in 2 Hälften geteilt. Dieser Punkt stellt die Masse dar. Von diesem Punkt aus kann man sowohl zum Minuspol als auch zum Pluspol eine Spannung von ungefähr 4,5V messen.

Dieser Punkt, die Masse, ist in dieser Schaltung der zentrale Punkt, von dem die Messungen ausgehen.

Über das Potentiometer läßt sich die Eingangsspannung einstellen, die über das linke Meßgerät angezeigt wird und zwischen $+4,5\text{V}$ und $-4,5\text{V}$ (von Masse aus) betragen kann. Über das rechte Meßgerät läßt sich die Ausgangsspannung ablesen, deren Vorzeichen immer genau umgekehrt ist als das der Eingangsspannung (die Polarität wird also *invertiert*). Außerdem ist, wenn die Eingangsspannung im Bereich von $\pm 0,5\text{V}$ bleibt, die Ausgangsspannung circa fünfmal höher als die Eingangsspannung. Wird die Eingangsspannung noch höher, kann die Ausgangsspannung nicht mehr mitsteigen, weil maximal $\pm 4,5\text{V}$ zu Verfügung stehen, wovon einiges im Op-Amp verlorengelht, sodaß er bloß Werte zwischen $-2,4\text{V}$ und $+3,7\text{V}$ (gegenüber Masse) abgeben kann.

a. Mischpult

Eine Anwendung des Op-Amps als Verstärker wäre ein Audiomischpult, bei dem verschiedene Musikquellen gemischt werden können.

Obwohl es keineswegs schlecht klingt, ist es recht einfach nach folgendem Schaltplan nachzubauen. Für das Experiment ist der $\mu\text{A}741$ ausreichend, sollte man es aber nachbauen, würde ich den NE5532 empfehlen, der einerseits gleich zwei Op-Amps in einem Gehäuse vereint und somit für ein Stereomischpult geeignet ist, bei dem die Schaltung nur doppelt aufgebaut werden muß, und andererseits auch um etliches weniger rauscht und somit besser klingt. Außerdem sollte man in diesem Fall für R1, R2 und R6 Metallschichtwiderstände verwenden, die geringere Toleranzen haben, weniger Rauschen verursachen und weniger temperaturempfindlich sind. Für C1 und C2 sollten übrigens keine gepolten Kondensatoren wie z.B. Elektrolytkondensatoren verwendet werden, da Wechselströme über sie fließen.

Wenn man mehr Eingänge benötigt, lassen sich praktisch beliebig viele Eingänge nach dem Schema von P1/R1 vor C1 anschließen.

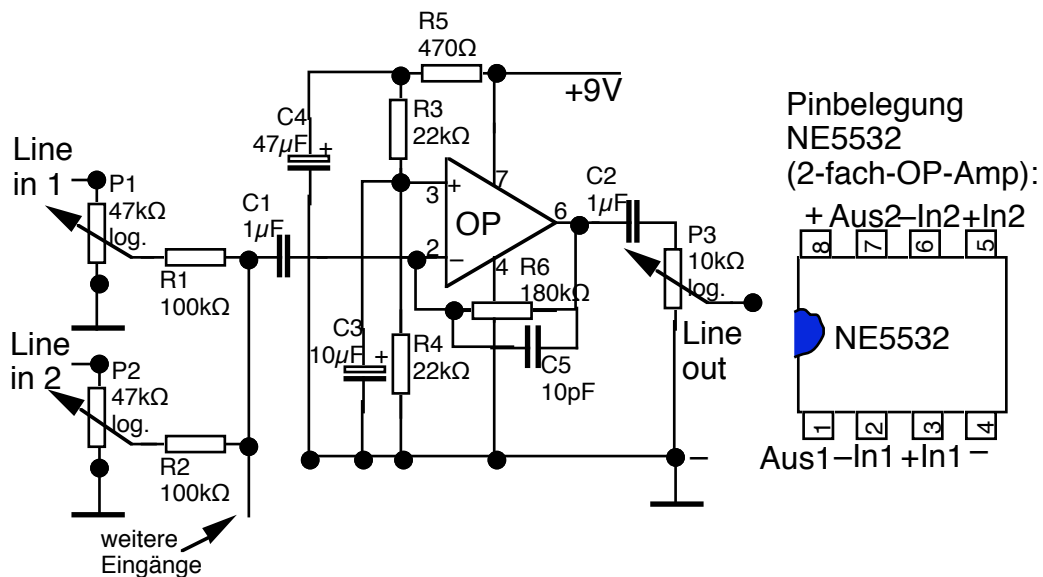


Abb. D9: Mischpult

Als Eingangssignal werden normale Line out-Anschlüsse (Cinch) von Stereoanlagen verwendet, wobei der innere Teil des Steckers mit dem Potentiometer und der äußere Teil, die Masse, mit dem Minuspol der Batterie sowie dem anderen Anschluß des Potentiometers verbunden wird. Das Potentiometer, z.B. P1, wirkt als Spannungsteiler und bewirkt die Lautstärkeregelung des jeweiligen Eingangs. Zumindest für den permanenten Aufbau sind logarithmisch verlaufende Potentiometer zu verwenden, da dem Menschen eine logarithmische Lautstärkezunahme natürlicher erscheint.

Über die 100kΩ-Widerstände wie R1 kommen die Audiosignale zu dem Kondensator C1, der nur Wechselstrom durchläßt; das ist aber keineswegs störend, da die hörbaren Signale Wechselspannungen im Bereich von 20Hz-20kHz sind. C1 dient somit als Filter gegen unerwünschte Gleichspannungen, die er nicht durchläßt. Die Tonsignale werden am invertierenden Eingang verstärkt, um die Verluste, die am Potentiometer und dem 100kΩ-Widerstand aufgetreten sind, zu kompensieren. Außerdem ist es von Vorteil, wenn die Verstärkung etwas höher ist, damit man schwache Signale bei Bedarf hervorheben kann.

Wie auch in der vorigen Versuchsanordnung, liegt am nichtinvertierenden Eingang ungefähr die halbe Versorgungsspannung an

(R3/R4). Außerdem werden auch noch die Kondensatoren C3 und C4 sowie R5 verwendet, die den Verstärker unempfindlicher gegen Störungen in der Stromzufuhr machen sollen.

Der Verstärkungsfaktor wird über R6 festgelegt: Je größer R6 ist, desto größer ist die Verstärkung (R6:R1). C5 bietet für besonders hohe Frequenzen jenseits des hörbaren Frequenzbereichs nur einen sehr geringen Widerstand, sodaß bei diesen Frequenzen die Gegenkopplung sehr groß ist und hochfrequente Nebengeräusche kaum weiterverstärkt werden.

Der Operationsverstärker verstärkt nun die Differenz von der an +In anliegenden halben Versorgungsspannung (U_{ref}) und den Tonsignalen der Eingänge (U_{ein}). Diese Differenz ist genau gegengleich zum Eingangssignal (Bild links), da der Verstärker dieses Signal jedoch nochmals invertiert, kommt am Ende wieder ein Signal mit der Gestalt des ursprünglichen heraus (Bild Mitte).

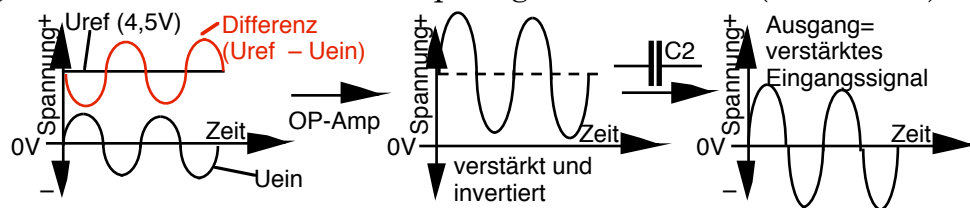


Abb. D10: Signalverlauf an verschiedenen Punkten

Das eigentliche Problem ist aber folgendes: Das Signal am Op-Amp-Ausgang ist keine richtige Wechselspannung, sondern eine stets positive Spannung, die je nach den Schwingungen größer und kleiner wird (Bild Mitte). Um auf die gewünschte Wechselspannung zu kommen, verwendet man einfach noch einen Kondensator, C2. Dieser läßt nur den Wechselspannungsanteil der Gleichspannung durch. Somit wird von der sich im Rhythmus der Musik ändernden positiven Gleichspannung (mittleres Bild) nur der Wechselspannungsanteil durchgelassen, sodaß man nach dem Kondensator eine echte Wechselspannung erhält, die genau wie das Eingangssignal aussieht, aber verstärkt ist (rechtes Bild in Abb. D10).

Über P3 läßt sich noch die Lautstärke der über das Mischpult gemischten Musik steuern. Den Ausgang kann man mit dem Line in-Eingang eines Verstärkers verbinden, um die gemischte Musik

über einen Lautsprecher genießen zu können. Verwendet man den NE5532, wird die HiFi-Norm mühelos übertroffen.

Auch den Endverstärker könnte man mit einem Op-Amp verwirklichen, allerdings kann der $\mu A741$ nur recht geringe Ströme verkraften, sodaß man für einen Leistungsverstärker einen Operationsverstärker für höhere Ströme verwenden müßte.

Neben diesen zwei Hauptanwendungen als Komparator und Verstärker gibt es noch viele andere Möglichkeiten, den Operationsverstärker einzusetzen, jedoch würde das im Rahmen dieser Fachbereichsarbeit zu weit führen. Einige andere Anwendungen wären z.B. das „Rechnen“ mit Op-Amps, spezielle elektronische Filter („aktive“ Filter) sowie Frequenzgeneratoren.

E. Resumé

Der Operationsverstärker ist ein wichtiges elektronisches Bauteil, das zum Verstärken von Spannungen geeignet ist.

Sämtliche elektronischen Bauteile bestehen aus Halbleitern. Das sind Materialien, die manche Eigenschaften von Metallen und manche von Nichtmetallen aufweisen. Wenn man mehrere solche Schichten aneinanderreihet, kann man z.B. einen Transistor erhalten. Bei diesem ist es möglich, durch unterschiedliches Anlegen von Spannung zu regeln, ob er wie ein Nichtmetall nichtleitend oder ähnlich einem Metall leitend sein soll.


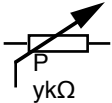





In einem Operationsverstärker sind sehr viele solche Transistoren und auch andere Bauteile zu einer Schaltung verknüpft, die in *einem* Gehäuse untergebracht sind, dem Operationsverstärker. Dieser hat normalerweise zwei Eingänge. An diese wird Spannung angelegt, und im Operationsverstärker wird die Differenz „berechnet“ und verstärkt, wobei sich die Größe der Verstärkung leicht einstellen läßt. Diese Verstärkerfunktion wird z.B. bei Audioverstärkern oder bei genauen elektronischen Meßgeräten genutzt.

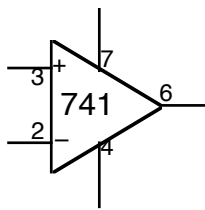
Eine andere Funktion ist das Vergleichen von zwei Spannungen an den beiden Eingängen. Bei einem Thermostat wird beispielsweise die gewünschte mit der gemessenen Temperatur verglichen und bei Bedarf geheizt oder gekühlt.

Obwohl der Operationsverstärker zunehmend von aufwendigen Mikroprozessoren und Computern verdrängt wird, gibt es noch immer sehr viele Anwendungen, vor allem im Hobby-Elektronikbereich, in denen er sehr effizient eingesetzt wird.

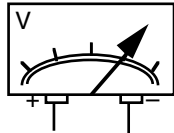
F. Anhang

1. Schaltzeichen

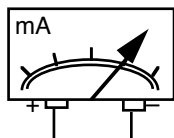
Schaltsymbol	Bezeichnung	Kurze Erklärung
	Widerstand R mit $yk\Omega$	begrenzt Stromfluß
	Potentiometer P mit $R=yk\Omega$	variabler Widerstand
	Diode	läßt Strom nur in einer Richtung durch („elektronisches Ventil“) (+-- in dieser Abbildung)
	Kondensator mit Kapazität in nF oder pF	kann elektrische Ladungen speichern
	Elektrolytkondensator (Elko), Kapazität in μF	kann relativ große Ladungen speichern, muß allerdings richtig gepolt werden
	Leuchtdiode	Diode, die Licht aussendet (benötigt normalerweise 1,6-2V bei 10-20mA) Berechnung des Vorwiderstandes: $R = \frac{U_v - U_{LED}}{I_{LED}}$ Uv...Versorgungsspannung Das k ürzere Bein (K athode) muß mit Minus und das längere (über einen Vorwiderstand) mit Plus verbunden werden, damit sie leuchten kann.
	nnp-Transistor	kann Signale an B asis(+) über K ollektor(+) und E mitter(-) verstärken



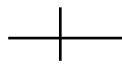
Operationsverstärker (hier Pinbelegung von 741)



Spannungsmeßgerät (Voltmeter) mißt das anliegende Spannungspotential



Stromstärke-meßgerät (Amperemeter) mißt den fließenden Strom



Leitungen ohne Verbindung



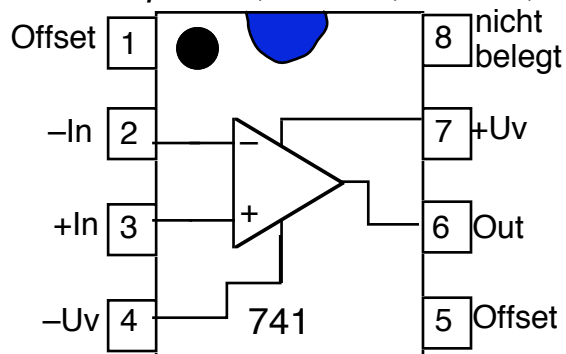
verbundene Leitungen



Masse

2. Pinbelegungen und technische Daten einiger verwendeter Halbleiter

a. Operationsverstärker μ A741, LM741, CA741, SN72741...



Uv...Versorgungsspannung

Abb.: Der 741 im 8-poligen DIP-Gehäuse

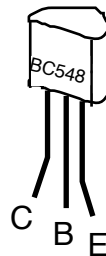
Maximalwerte:

Versorgungsspannung	$\pm 18V$
Eingangsspannung	$\pm 15V$ (jedoch nicht über jeweiliger Versorgungsspannung)
zulässige Verlustleistung (8-pol.DIP)	310mW
Kurzschluß am Ausgang	zeitlich unbegrenzt möglich
typische Eigenschaften:	
Eingangswiderstand	$2M\Omega$ (mind. $0,3M\Omega$)
(Gleich-)Spannungsverstärkung	200 000 (mind. 20 000)
Ausgangswiderstand	75Ω
Kurzschlußstrom	25mA
Versorgungsstrom	1,7mA (max. 2,8mA)
Leistungsaufnahme	50mW (max. 85mW)
Übertragungsbereich	0,5MHz (bis zu 1,5MHz)

b. npn-Transistor BC548


BC548:
 maximale Spannung (zw. C und E): 30V
 maximaler Strom: 200mA
 ungefähre Stromverstärkung: 400

C...Kollektor, B...Basis, E...Emitter




3. Farbcodes von Widerständen

Widerstände haben normalerweise 4 bis 5 bunte Ringe, die den Widerstandswert angeben. Die Farben werden nach folgendem Schema „entschlüsselt“:



Farbe		Faktor	Toleranz
schwarz	0 0	x1	
braun	1 1	x10	±1%
rot	2 2	x100	±2%
orange	3 3	x1k	
gelb	4 4	x10k	
grün	5 5	x100k	±0,5%
blau	6 6	x1M	
violett	7 7	x10M	
grau	8 8	x100M	
weiß	9 9		
silber			±10%
gold			±5%
nichts			±20%

z.B.: blau-grau-rot
 $=68 \cdot 100 = 6800 \Omega = 6,8 \text{ k}\Omega$



Farbe		Faktor	Toleranz
schwarz	0 0 0	x1	
braun	1 1 1	x10	±1%
rot	2 2 2	x100	±2%
orange	3 3 3	x1k	
gelb	4 4 4	x10k	
grün	5 5 5	x100k	±0,5%
blau	6 6 6	x1M	
violett	7 7 7	x10M	
grau	8 8 8	x100M	
weiß	9 9 9	x1G	
silber		x0,01	
gold		x0,1	

z.B.: blau-grau-schwarz-braun
 $=680 \cdot 10 = 6800 \Omega = 6,8 \text{ k}\Omega$

4. Abkürzungen für Einheiten

A=Ampere (Stromstärke I)

F=Farad (Kapazität C)

V=Volt (Spannung U)

W=Watt (Leistung P)

Ω =Ohm (Widerstand R)

Hz=Hertz (Frequenz f)

5. Einige wichtige Formeln

Ohmsches Gesetz: $U=I \cdot R$

$$I=U:R$$

$$R=U:I$$

Aus diesem Gesetz folgt unter anderem, daß über einem Widerstand mehr Spannung abfällt, wenn mehr Strom durch ihn fließt.

Auch ein Spannungsteiler erklärt sich aus diesem Gesetz. Werden mehrere Widerstände hintereinandergeschaltet, so teilt sich die Spannung im direkten Verhältnis zur Größe der Widerstände auf ($U=R \cdot I$).

Leistung: $P=U \cdot I=I^2 \cdot R$

Wechselstromwiderstand eines Kondensators $R_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$

An dieser Formel sieht man, daß ein Kondensator nur für Wechselspannungen durchlässig ist. Je kleiner die Kapazität und je niedriger die Frequenz wird, desto höher ist der wirksame Widerstand. Da der Kondensator nur zur Zeit des Auf- und Entladens leitend ist, ist er für Gleichspannungen nur während einer sehr kurzen Zeit leitend. Eine Wechselspannung ladet und entladet ihn aber regelmäßig, wodurch er laufend ziemlich gut leitend ist. Ist die Kapazität größer, so muß der Kondensator länger aufgeladen werden und Strom kann länger in eine Richtung durchfließen; somit ist er auch für niedrigere Frequenzen halbwegs durchlässig.

6. Umrechnungsfaktoren

Zeichen	Name	Faktor	Potenz	Beispiel
M	Mega	x 1 000 000	10^6	M Ω
k	Kilo	x 1 000	10^3	k Ω
m	Milli	x 0,001	10^{-3}	mA
μ	Mikro	x 0,000 001	10^{-6}	μ F
n	Nano	x 0,000 000 001	10^{-9}	nF
p	Pico	x 0,000 000 000 001	10^{-12}	pF

7. Für den Nachbau empfohlene Bauteile

Widerstände (1/4 Watt, Kohleschicht: je 1 bis 2öS):

470 Ω ; 1k Ω (2Stk.); 2,7k Ω ; 4,7k Ω (2Stk.); 10k Ω ; 22k Ω (2Stk.); 47k Ω

Potentiometer: zwei lineare Potentiometer mit einem Wert zwischen 10k Ω und 50k Ω (je ca. 20öS)

Kondensator: ein 100 μ F-Elektrolytkondensator (ca. 4öS)

Diode: eine Silizium-Diode für 100mA (z.B. 1N4148; ca. 1öS)

LED: eine rote Standard-Leuchtdiode (ca. 3öS)

Transistor: ein BC548 npn-Transistor (ca. 3öS)

Operationsverstärker: ein μ A741, LM741, CA741 oder baugleicher Operationsverstärker (ca. 10öS)

Spannungsversorgung: eine 9V-Blockbatterie

Daneben sind eine Steckplatine (ca. 100öS), einige Drahtstückchen (keine feinadrige Litze) sowie ein einfaches Multimeter mit Amperemeßbereich (ab 200öS) empfehlenswert.

Mit diesen Teilen sind sämtliche Versuchsaufbauten außer den praktischen Anwendungen (Thermostat und Mischpult) nachbaubar.

8. Literaturverzeichnis

Elektor Verlag GmbH: 302 Schaltungen. Aachen: Elektor Verlag GmbH ⁷1990

Gößler, Reinhard: Elektronik Aktuell Magazin 8/90-5/92 (Jahrgang 5-7). Heft 8/90: Nürnberg: W. Tümmels Buchdruckerei und Verlag GmbH, Dezember 1990; Heft 1/91-5/92: Nürnberg: Verlag für Technische Publikationen (VTP) Angelika Fürst, Jänner 1991-August 1992

Härtl, Alfred: Halbleiter-Anschluß-Tabelle. Hirschau: Härtl-Verlag ⁶1991

KOSMOS-Entwicklungslabor: Experimentieranleitung kosmos[®] electronic X 3000/X 4000. Stuttgart: Franckh'sche Verlags-handlung, W. Keller & Co. ²1986

Mims III, Forrest M.: Engineer's Mini-Notebook "Basic Semiconductor Circuits". USA: Siliconcepts[™] ²1987

Mims III, Forrest M.: Engineer's Mini-Notebook "Op Amp IC Circuits". USA: Siliconcepts[™] ³1987

Pütz, Jean: Einführung in die Elektronik. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag GmbH 1974

Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler: Physik 3. Wien: Verlag Hölder-Pichler-Tempsky ²1992

Wirsum, Siegfried: Elektronik-Selbstbau-Praktikum. München: Franzis-Verlag GmbH; Luzern: Elektronik-Verlag Luzern AG ⁶1988

Ich erkläre, daß ich diese Fachbereichsarbeit selbst verfaßt habe und daß außer der angegebenen Literatur keine weitere verwendet wurde.