

7

Messen und Steuern

In Kapitel 4 ist die Möglichkeit gezeigt, wie man mit einem Schaltimpuls Geräte ein- und ausschalten kann, was gemeinhin als *Steuern* bezeichnet wird, wofür Aktoren wie LEDs oder Relais zum Einsatz kommen. Wenn keine Ausgabe von Daten, sondern die Umkehrung davon, die Eingabe von Daten an ein Gerät, stattfindet, wird dies als *Messen* bezeichnet, wofür Sensoren eingesetzt werden.

Sowohl die Ausgabe als auch die Eingabe kann in digitaler Form erfolgen, was bedeutet, dass es jeweils nur zwei Zustände gibt; wie bei dem Relais (an oder aus) oder auch einem (Positions-)Schalter, der entweder geschlossen oder offen ist. Ein Schalter, dessen Position abgefragt wird, entspricht demnach einem Sensor.

Meist identifiziert man einen Sensor jedoch als ein Element, mit dem physikalische Vorgänge wie etwa die Temperatur oder auch die Helligkeit detektiert werden. Für die Erfassung dieser analogen Größen, die letztlich in digitale für die weitere Verarbeitung umzusetzen sind, werden A/D-Konverter (Analog/Digital-Wandler) benötigt, die eine Spannung in eine digitale Repräsentation des jeweiligen analogen Wertes konvertieren. Dementsprechend kommt für die Umsetzung von digitalen Signalen in analoge ein D/A-Konverter (Digital/Analog-Wandler) zum Einsatz.

In Kapitel 5 ist gezeigt, welche Sensoren sich standardmäßig in einem Smartphone oder Tablet befinden, ohne dass dabei auf die Signalverarbeitung eingegangen wird, was spätestens dann notwendig ist, wenn externe Sensoren zum Einsatz kommen sollen. Deshalb geht es in diesem Kapitel um die Verarbeitung von analogen Signalen und wie sie in digitale umgesetzt werden können.

7.1 Analoge Signalverarbeitung

Grundsätzlich lassen sich Sensoren in analoge und digitale Typen unterscheiden, was maßgebliche Auswirkungen auf die jeweils notwendige Signalverarbeitung und Programmierung hat.

Analoge Sensoren generieren eine messwert-proportionale Ausgangsspannung. Dabei muss der Proportionalitätsfaktor nicht zwangsweise linear, sondern kann auch deutlich komplexer sein. Die Ausgangsspannung wird mit einem Analog/Digital-Wandler gemessen und kann im angeschlossenen Mikrocontroller nachbearbeitet werden, wozu die Umrechnung und Linearisierung zu rechnen ist, sodass aus dem Bitwert des A/D-Wandlers der tatsächliche physikalische Messwert bestimmt werden kann.

Digitale Sensoren liefern direkt ein digitales Messergebnis. Es sind keine zusätzlichen Verstärkerschaltungen und A/D-Wandler aufzubauen, um ein Messsignal verarbeiten zu können. Die notwendige Verstärkung, Linearisierung und Umsetzung wird vom Sensor selbst übernommen und die Messwerte lassen sich über eine integrierte digitale Schnittstelle wie UART, SPI oder I²C empfangen, was ab Kapitel 6.2 näher erläutert wird. Die Programmierung ist bei digitalen Schnittstellen meist etwas komplexer als für einen A/D-Wandler; dafür ist der schaltungstechnische Aufwand bei einem analogen Sensor jedoch um ein Vielfaches höher, was im Folgenden behandelt wird.

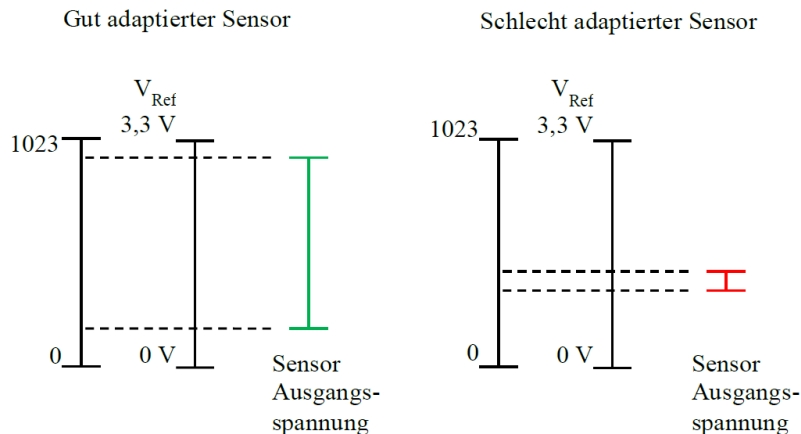


Abb. 7-1 Beispiel für einen gut und für einen schlecht adaptierten Sensor

Der Ausgangspegel eines analogen Sensors sollte gut zum Eingangsspannungsbereich des A/D-Wandlers passen. Eine nur geringe Ausnutzung des möglichen Spannungsbereichs hat einen Verlust von Auflösung des Sensorwertes zur Folge, da nur wenige Umsetzungsstufen (Quantisierungsschritte) des A/D-Wandlers ausgenutzt werden.

In der Abbildung 7–1 ist ersichtlich, dass im rechten Beispiel nur wenige Quantisierungsschritte des Wandlers in den Sensorbereich fallen. Die Auflösung, und damit die Messgenauigkeit, ist sehr schlecht, was eine Verstärkerschaltung (siehe Kapitel 7.1.4) erfordert.

7.1.1 Auflösung

Die Ausführung einer analogen Aufbereitungsschaltung hängt im Wesentlichen von der Beschaffenheit des Eingangssignal betreffs Amplitude und Frequenz ab. Möglicherweise ist ein Verstärker notwendig, der das Eingangssignal auf den Pegel – den Dynamikbereich – des nachgeschalteten A/D-Wandlers anhebt.

Die Auflösung eines A/D-Wandlers wird üblicherweise als Anzahl von Bits angegeben und steht für die Anzahl der Stufen, mit denen ein Analog-Signal dargestellt werden kann. Je höher die Auflösung, desto genauer ist dabei die digitale Abbildung des analogen Signals. Ein 8-Bit-Wandler kann $2^8 = 256$ Werte (0 bis 255), ein 16-Bit-Wandler dementsprechend 65536 Werte annehmen.

Die Stufenanzahl bezieht sich immer auf einen bestimmten Eingangsspannungsbereich. Beispielsweise arbeitet der A/D-Wandler bei einem Arduino-Mikrocontroller im Bereich von 0 V bis 5 V mit einer Auflösung von 10 Bit, was zu 1024 einzelnen Stufen führt, die jeweils 4,8 mV entsprechen. Grundsätzlich kann der Eingangsspannungsbereich nicht nur unipolar, sondern auch bipolar ausgelegt werden, sodass auch negative Spannungen – etwa für die Messung von Wechselspannungen – erfasst werden können, was eine Verstärkerschaltung erfordert, die den +/-Eingangsspannungsbereich in den positiven (0 bis 5 V) verschiebt. Typischerweise ist für diese Verstärkerschaltung mit Offset neben der positiven auch eine negative Spannungsversorgung notwendig, sodass noch ein entsprechender Spannungsregler wie etwa der Typ TC7660 der Firma Microchip erforderlich ist, der nach dem Prinzip der Ladungspumpe aus einer positiven Versorgungsspannung eine negative erzeugt.

Auflösung in Bit	Anzahl der Teilschritte	Prozent des Bereiches	Analog-Schritt 0 bis 5 V Bereich ($\pm 2,5$ V)	Analog-Schritt 0 bis 10 V Bereich (± 5 V)
8	256	0,39%	19,5 mV	39 mV
10	1024	0,098%	4,8 mV	9,76 mV
12	4096	0,024%	1,22 mV	2,44 mV
16	65536	0,0015%	0,0763 mV	0,1526 mV

Tab. 7–1 Auflösungen von Analog/Digital-Wandlern

Allgemein gilt für die Auflösung und den damit verbundenen kleinsten Wandlungsschritt (LSB) die folgende Beziehung:

$$\text{kleinster Wandlungsschritt} = \frac{\text{Eingangsspannungsbereich}}{\text{Anzahl der Teilschritte}}$$

Der maximale analoge Wert sollte bei einem unipolaren Eingangsspannungsbereich von 10 V (Full Scale) auch in der digitalen Darstellung als 10 V repräsentiert werden. Der maximale digital darstellbare Wert entspricht bei einem 8-Bit-Wandler 1111111b, was aber wiederum der Zahl 255 entspricht. Dies ist also die *Anzahl der Teilschritte - 1*. Damit ergibt sich für den maximalen darstellbaren analogen Wert jedoch:

$$10\text{ V} - \frac{10\text{ V}}{255} = 9,96\text{ V}$$

und für den Eingangsspannungsbereich von 5 V (Full Scale):

$$5\text{ V} - \frac{5\text{ V}}{255} = 4,98\text{ V}$$

und eben nicht genau 10 V bzw. 5 V, was natürlich allgemeingültig ist. Der maximale analoge, durch die digitale Darstellung erreichbare Wert (Q_{\max}) ist immer um 1 LSB geringer als der maximale Wert des Eingangsspannungsbereiches. Als Formel bedeutet dies mit FS (Full Scale = maximaler Eingangsspannungsbereich) und N für die Auflösung des Wandlers:

$$Q_{\max} = FS - \frac{FS}{2^N - 1}$$

7.1.2 Abtastfrequenz

Die Geschwindigkeit, mit der ein analoges Signal erfasst und umgesetzt werden kann, ist ein wichtiges Kriterium. Für Audio- und besonders Videosignale werden an die Umsetzungsgeschwindigkeit höhere Anforderungen gestellt als bei Sensorsignalen wie für die Temperatur oder den Druck, bei denen es sich um langsame Vorgänge handelt. Als Maß für die Geschwindigkeit wird in der Regel von den Herstellern eine Abtastfrequenz in Hz, kHz oder auch MHz angegeben.

Das analoge Signal wird periodisch abgetastet. Das heißt, zu bestimmten Zeitpunkten wird das Signal erfasst – es wird gewissermaßen eine Probe vom Signal genommen – und die Amplitude jedes einzelnen Abtastvorganges gespeichert. In der Abbildung 6–2 ist dieser Vorgang beispielhaft gezeigt. Das abgetastete Signal kommt der ursprünglichen analogen Signalform recht nahe, sofern die Abtastfrequenz so hoch ist, dass das Signal zwischen den Abtastpunkten keine wesentliche Änderung erfährt.

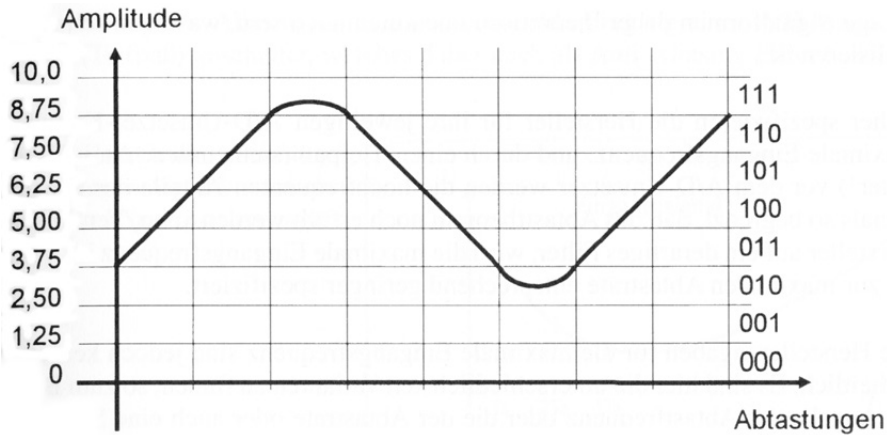


Abb. 7-2 Ein analoges Signal wird vom A/D-Umsetzer periodisch abgetastet, was ein digitales stufenförmiges Abbild des Signals ergibt. Hier wird ein sinusförmiges Signal mit einer Auflösung von drei Bit abgetastet.

Erweist sich die Abtastfrequenz gegenüber dem analogen Signal jedoch als zu niedrig, können Signaländerungen nicht erfasst werden – sie gehen verloren. Damit dieser Fall nicht eintritt, muss das Abtasttheorem (laut Shannon) beachtet werden. Es besagt, dass die Abtastfrequenz (f_a) mindestens zweimal größer als die maximale Frequenz eines kontinuierlichen bandbegrenzten Signals ($f_{e\max}$) sein muss, damit es eindeutig beschrieben und durch einen Digital/Analog-Wandler auch wieder ohne Informationsverlust ausgegeben werden kann.

Abtasttheorem:

$$f_a \geq 2 \cdot f_{e\max}$$

Wird diese Bedingung nicht eingehalten, kommt es bei der Umsetzung zu einem Fehler, der als *Aliasing* bezeichnet wird. Es erscheint statt des ursprünglichen Signals ein Signal mit einer Scheinfrequenz (Alias Frequency), welches eine geringere Frequenz als das Original aufweist.

Die Hersteller weisen die maximal zulässige Frequenz mit unterschiedlichen Angaben aus: durch die Angabe der Abtastfrequenz oder durch die Abtastrate oder auch durch eine Summenabtastrate oder auch eine *Conversion Time*, die je nach Taktfrequenz und eingestellter Auflösung in unterschiedlichen Bereichen liegt. Bei einer Abtastfrequenz von 50 kHz darf die höchste Signalfrequenz 25 kHz betragen (Abtasttheorem). Wird eine Summenabtastrate angegeben, ist dieser Wert noch einmal durch die Anzahl der verfügbaren Eingangskanäle zu dividieren, welche üblicherweise mit einem Multiplexer nacheinander auf den A/D-Umsetzer geschaltet wer-

den. Bei einem achtkanaligen A/D-Umsetzer mit einer spezifizierten Abtastrate von 50 kHz ist die maximale Eingangsfrequenz dann auf lediglich 3125 Hz begrenzt.

7.1.3 Anpassung

Vor dem eigentlichen A/D-Umsetzer sind – je nach Typ – weitere Schaltungskomponenten angeordnet, die die Eigenschaften dieser Einheit wesentlich beeinflussen und sie erst komplettieren. Mitunter werden zusätzliche Schutzwiderstände und/oder Dioden angebracht, die die Eingangsstufen vor unzulässig hohen Eingangsspannungen schützen.

Falls Spannungen verarbeitet werden sollen, die größer sind als der zulässige Eingangsspannungsbereich der A/D-Wandlerstufe, wird ein Spannungsteiler mit Widerständen aufgebaut. Für die Widerstände sind möglichst genaue Typen (Metallschichtwiderstände) mit einer Toleranz von 1 % einzusetzen. Es sind mindestens zwei Widerstände notwendig, die in Reihe geschaltet werden. Der Gesamtwiderstand ist die Summe der beiden Widerstandswerte, woraus sich nach dem Ohm'schen Gesetz der Strom durch die Schaltung ergibt:

$$I = \frac{U}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

Die Teilspannung an R_2 beträgt damit:

$$U_2 = I \cdot R_2$$

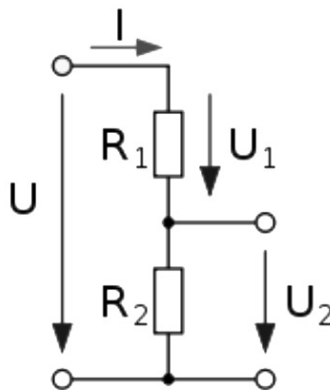


Abb. 7-3 Einfacher Spannungsteiler

Nach diesem Prinzip lassen sich Spannungsteiler in entsprechenden Stufen (1:1, 1:10, 1:100) aufbauen. Falls der Spannungsteiler nur aus zwei Widerständen besteht, also lediglich eine Stufe benötigt wird, gilt für die auszugebende Spannung U_a :

$$U_a = \frac{U}{R_{gesamt}} \cdot R_a$$

Für die Wahl der Widerstände ist es wichtig, dass sie möglichst hochohmig (MΩ) sind, sodass nur ein möglichst geringer Strom fließt, um die Quelle nicht unnötig zu belasten.

In Messgeräten wird ein Vielfachspannungsteiler aufgebaut. Die Widerstände werden dabei mit einem Drehschalter umgeschaltet und legen somit den Eingangsspannungsbereich fest. In der Abbildung 7-4 ist der Aufbau hierfür gezeigt, der entsprechende Widerstandswerte von 900 kΩ, 90 kΩ und 9 kΩ verwendet, die allerdings nicht in den standardisierten Baureihen (E-Reihen, z. B. E 96 mit 96 verschiedenen Werten) erhältlich sind.

$$R_{gesamt} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

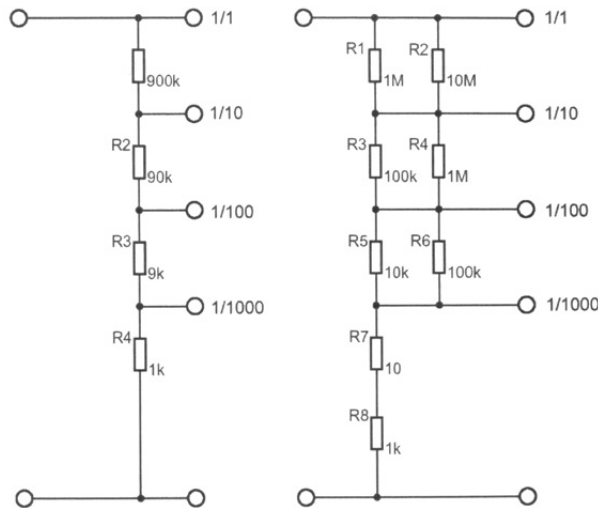


Abb. 7-4 Spannungsteiler mit einem Gesamtwiderstand von 1 MΩ. Links mit Spezialwiderständen und rechts mit handelsüblichen Standardwerten in Parallelschaltungen.

Im Elektronikhandel gibt es deshalb spezielle Widerstandsteiler, die eine präzise Teilung gemäß der Abbildung vornehmen. Für den schnellen und kostengünstigen Selbstbau eines derartigen Teilers empfiehlt sich die Parallelschaltung von Standardwiderständen, wie es in der Abbildung 7-4 rechts gezeigt ist. Für zwei Widerstände in Parallelschaltung gilt dabei:

$$R_{gesamt} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

7.1.4 Operationsverstärker

Ein Verstärker sorgt für eine elektrische Entkopplung und Anhebung des Eingangssignals auf einen gegebenenfalls höheren Analogwert, damit der Eingangsspannungsbereich des Umsetzers ausgenutzt werden kann, wie es eingangs erläutert ist (siehe auch Abbildung 7–1). Die richtige Verstärkungseinstellung hat natürlich auch Auswirkungen auf die mögliche Auflösung der Umsetzung. Für ein Sensorsignal, welches sich beispielsweise zwischen 1 V und 3 V bewegt, sollte ein Eingangsbereich von 0–5 V gewählt werden statt 10 V oder ± 5 V, denn dies ergibt demgegenüber die doppelte Anzahl (siehe Tabelle 7–1) an Teilschritten und somit auch die doppelte Auflösung.

Auf nahezu allen Gebieten der analogen Signalverarbeitung werden Operationsverstärker eingesetzt. Der Operationsverstärker ist ein Spannungsverstärker mit einer sehr hohen Verstärkung und einer großen Bandbreite und ideal, um kleinere analoge (Sensor-)Signale auf das Niveau des nachfolgenden A/D-Wandlers zu heben.

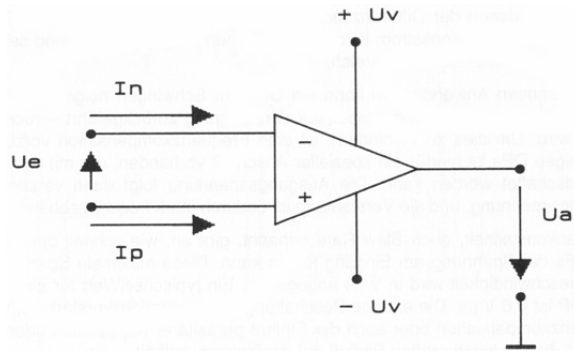


Abb. 7–5 Prinzipschaltung des Operationsverstärkers

Ein OP (Operationsverstärker) besitzt einen invertierenden (-) und einen nichtinvertierenden (+) Eingang. Der Ausgang liefert entweder eine positive oder eine negative Spannung und kann – je nach Typ – unterschiedliche Lasten treiben. Die Spannungsversorgung ist zumeist symmetrisch ($+U_v$ und $-U_v$) ausgeführt und bestimmt den Aussteuerbereich des Bausteins.

Das Typenspektrum ist immens und reicht von Standardtypen für allgemeine Anwendungen ($\mu A741$) bis zu speziellen, besonders driftarmen und auf bestimmte Daten hin optimierten Typen, wobei einige wichtige Parameter zu beachten sind, um den passenden Baustein finden zu können. In der Tabelle 7–2 sind typische Vertreter mit ihren wichtigen Kenndaten angegeben.

Die Verstärkung eines Operationsverstärkers wird als Leerlaufverstärkung angegeben. In den Datenblättern wird sie auch als *Open Loop Voltage Gain* bezeichnet. Die Angabe bezieht sich auf einen unbeschalteten OP und ist durch die Versorgungsspannung begrenzt. Die Verstärkung wird in V/V oder in V/mV oder in Dezibel (dB)

angegeben. Die Umrechnung eines Spannungsverhältnisses (a) in Dezibel erfolgt nach folgender Formel mit dem Logarithmus zur Basis 10 (\lg):

$$a = 20 \cdot \lg \left(\frac{U_1}{U_2} \right) d$$

Zurückgerechnet in lineare Werte wird dann mit:

$$\frac{U_1}{U_2} = 10^{\frac{a}{20}}$$

Bei der Ansteuerung der beiden Eingänge mit einer identischen Gleichspannung ist die Spannungsdifferenz = 0. Der Spannungswert am Ausgang sollte dann ebenfalls null Volt betragen, was jedoch beim realen OP nicht der Fall ist. Das Gütekriterium für ein möglichst ideales Verhalten ist die Gleichtaktunterdrückung, die auch als *Common Mode Rejection Ratio* (CMRR) bezeichnet wird.

Die Eingangsfehlspannung wird auch als *Input-Offset-Spannung* bezeichnet und gibt denjenigen Wert an, der am Ausgang des Operationsverstärkers anliegt, wenn sich an den Eingängen null Volt befindet. Um diese Spannung zu kompensieren, sind bei vielen Verstärkern spezielle Anschlüsse (Offset-Pins, vgl. Abbildung 7-6) vorhanden, über die mithilfe eines Potenziometers der Ausgang auf null abgeglichen werden kann, was optional ist und bei Präzisionsanwendungen praktiziert wird. Die Höhe dieses Offsets ist temperaturabhängig und wird dementsprechend in $\mu\text{V}/\text{K}$ angegeben.

Die Eingangsstufe eines Operationsverstärkers besteht aus einem Differenzverstärker. Eingangswiderstände von 2 M Ω und größer werden bereits von den preiswerten Typen geboten. Eingangswiderstände von Gigaohm und größer werden mit solchen Operationsverstärkern erreicht, bei denen der Differenzverstärker mit Feldeffekttransistoren (FET) aufgebaut ist. Der Eingangsstrom ist durch den hohen Eingangswiderstand sehr klein und liegt im Femto- bis Nanobereich.

Bei bestimmten Anwendungen kann ein Operationsverstärker zum Schwingen neigen, sodass ein Teil der Ausgangsspannung wieder auf den Eingang zurückgeführt – rückgekoppelt – wird. Um dies zu verhindern, ist eine Frequenzkompensation vorgesehen. Bei einigen Operationsverstärkern ist hierfür ein spezieller Anschluss vorhanden, der mit einem Tiefpass beschaltet werden kann. Die Ausgangsspannung folgt dann der Eingangsspannung verzögert und die Verstärkung ist dadurch stark frequenzabhängig.

Die Flankensteilheit, auch *Slew Rate* genannt, gibt an, wie schnell der Ausgang des Operationsverstärkers der Spannung am Eingang folgen kann. Diese maximale Spannungsanstiegsgeschwindigkeit wird in V/μ angegeben. Die externe Beschal-

tung des Operationsverstärkers, wie die Frequenzkompensation oder auch der Einfluss parasitärer Kapazitäten oder Induktivitäten, hat einen großen Einfluss auf die Flankensteilheit.

Kriterien/Typ	μA741	OP-07	LF356	MAX452
Anwendung	Standard	Low Offset	Low R_{in}	Video
Eingangswiderstand	2 M Ω	60 M Ω	1 T Ω	100 G Ω
Leerlaufverstärkung	106 dB	114 dB	106 dB	48 dB
Offsetspannung	6 mV	30 μV	2 mV	2 mV
Offsetdrift	15 $\mu\text{V}/\text{K}$	0,6 $\mu\text{V}/\text{K}$	12 $\mu\text{V}/\text{K}$	300 $\mu\text{V}/\text{K}$
Eingangsstrom	500 nA	0,4 nA	30 pA	10 pA
Max. Frequenz bei $V=1$	1,5 MHz	0,6 MHz	4,5 MHz	50 MHz
Flankensteilheit	0,6 V/ μs	0,3 V/ μs	12 V/ μs	300 V/ μs
Gleichtaktunterdrückung	90 dB	126 dB	100 dB	80 dB
Ausgangswiderstand	75 Ω	60 Ω	30 Ω	75 Ω

Tab. 7–2 Daten von Operationsverstärkern im Überblick

In der Tabelle 7–2 sind die Daten von Operationsverstärkern gegenübergestellt, die typische Vertreter für verschiedene Anwendungen repräsentieren. Somit sind zur Übersicht konkrete Daten verfügbar, an denen man sich für die Auswahl für eigene Applikationen orientieren kann. OPs werden wie andere Bausteine auch in unterschiedlichen Gehäusen angeboten, wobei sich das DIP-Gehäuse auch für einen schnellen Schaltungsaufbau mit Breadboards (Kapitel 3) eignet.

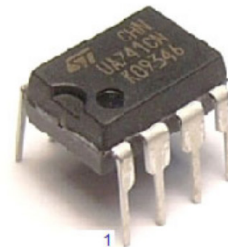
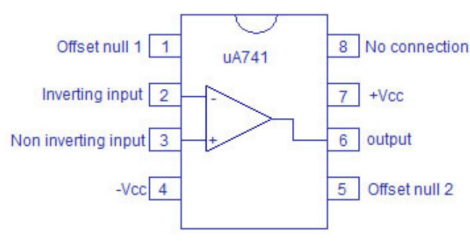


Abb. 7–6 Der μA741 ist unkritisch in der Anwendung und gilt als Standardtyp.

Der μA741 (Abbildung 7–6) gilt als *der* Standardtyp und ist wahrscheinlich der am häufigsten verwendete Typ überhaupt. Bei bestimmten Anwendungen ist ein sehr niedriger Wert für den Offset wünschenswert, so beispielsweise für die Verstärkung von Thermoelementspannungen. Der OP-07 bietet hier gute Werte und gilt seit langer Zeit als Standard für solche Applikationen, bei denen es auf besonders geringe Offset-Werte ankommt.