

Eine kleine Einführung in die Elektronik

Vorwort

Die Idee zu diesem Büchlein kam ganz spontan während der Vorbereitung auf einen Elektronikurs für Anfänger in der Stadtbibliothek Velbert. Dort gibt es seit letztem Jahr einen „Makerspace“, ein großer, freundlicher Raum mit robusten Tischen und Stromanschlüssen. Dort stehen 3D Drucker und einige Bastelworkshops fanden auch schon statt.

Meine Nachfrage, ob von Seiten der Stadtbibliothek auch Interesse an einem Elektronikurs bestünde, wurde bejaht und so begann ich, mir ein Konzept zu überlegen, das den Anforderungen (ab 12 Jahre, maximal 6 Personen) entsprechen könnte.

Beim Schreiben kamen mir immer neue Ideen, die Seiten füllten sich fast von allein. Dabei konnte ich auf mehr als 5 Dekaden Beschäftigung mit Elektronik als Hobby zurückgreifen. Gerade die Erfahrung mit Problemen, die ich als Anfänger vor vielen Jahren hatte, halfen mir, Erklärungen und Beispiele zu finden, die hoffentlich die Einstiegshürden erklimmen helfen. Und solche Hürden gibt es viele bei der Elektronik, seien es notwendige Kenntnisse in Mathematik und Physik, seien es praktische Fertigkeiten wie Löten oder der Umgang mit dem Steckbrett.

Nun habe ich festgestellt, dass ich weitere, fortgeschrittenere Themen gerne auch in diesem Büchlein behandeln würde. Da das aber auch zeitlich den Rahmen sprengen würde, habe ich mich entschieden, dies hier als Teil 1, Grundlagen zu veröffentlichen.

Inzwischen hat der Kurs begonnen, das Alter reicht von 12 bis zum Rentenalter. Seit der 2. Sitzung hat sich die Teilnehmerzahl auf 7 erhöht. Bei der Durchführung des Kurses freute ich mich über die vielen Fragen, die gerade von den Kindern kamen.

Die Erkenntnisse daraus fließen nun wieder hierhin zurück.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	1	9 PWM.....	32
Teil 1: Grundlagen.....	3	Bedingungen.....	33
I Ein wenig Physik.....	3	Ein PWM Programm.....	33
1 Einheiten und Größen.....	4	Ein zweites PWM Programm.....	34
2 Der Strom rieselt nicht aus der Steckdose.....	4	VI Wechselfpannung in der Elektronik.....	37
II Verbindungstechnik.....	6	1 Impedanz.....	37
1 Unser Steckbrett.....	6	2 Innenwiderstand.....	38
2 Löten ohne Hexerei.....	7	3 Kondensatoren & Spulen.....	38
3 Die Kunst des Lötens.....	8	4 Transformator.....	40
III Über Bauteile, Familien und anderes.....	10	5 Transistorschaltungen.....	41
IV Erst mal analog.....	12	Die Emitterschaltung.....	41
Ein Experiment.....	12	Gegenkopplung, ein Exkurs.....	43
Noch eins.....	13	Zusammenfassung Emitterschaltung.....	44
2 Reihenschaltung / Parallelschaltung.....	14	Die Kollektorschaltung oder Emitterfolger.....	44
Reihenschaltung.....	14	Die Basisschaltung.....	44
Parallelschaltung.....	15	Eine reale Transistorschaltung: zweistufiger	
Komplexere Schaltungen.....	15	Verstärker.....	44
3 Ein Rätsel.....	16	6 Netzteile.....	47
4 Was ist eigentlich ein Transistor.....	16	Gleichrichtung.....	47
Noch ein Experiment.....	17	Stabilisierung.....	48
5 Ein Supertransistor.....	18	VII Messgerätekunde.....	50
6 Der Operationsverstärker.....	19	1 Das Oszilloskop.....	50
7 Die Tücken des Messens.....	20	Funktion.....	51
V Jetzt mal digital.....	22	Benutzung.....	51
1 Aufbau.....	22	Tastköpfe.....	52
2 Micropython.....	24	2 Multimeter.....	52
3 Programmiersprache?.....	24	3 Multimeter + Oszilloskop.....	53
4 Unser erstes Programm.....	26	4 Spezielle Messgeräte.....	53
Vom REPL.....	28	VIII Schneller zum Ziel: was beim Rechnen zu	
5 Exkurs: Objekte.....	29	beachten ist.....	54
6 DEFinieren wir etwas.....	30	Genauigkeit.....	54
7 Blinken in strukturiert.....	30	Überschläge.....	54
8 Eine Verkehrsampel.....	31	Größen in Formeln.....	55

Teil 1: Grundlagen

Das Buch besteht aus zwei Teilen. Hier, im Teile 1, werden sozusagen die Grundlagen der Grundlagen gelegt. Der zweite Teil beschäftigt sich zum einen ausführlich mit dem Thema „Wechselspannung“, was von Audio- bis Radiofrequenzen reicht und zum anderen mit konkreten Schaltungsbeispielen, die im Gegensatz zu diesem Teil lauf- und nachbaufähige Schaltungen – auch im Steckbrett - umfasst.

I Ein wenig Physik

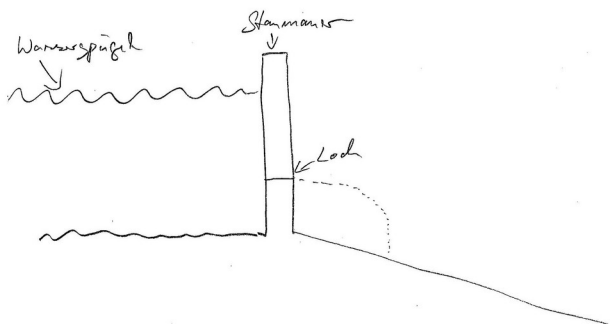
Elektrizität kann man nicht sehen, riechen, fühlen oder schmecken.

Stimmt nicht: Wer eine Batterie an die Zunge hält, spürt und schmeckt eine Menge (nichts sehr Angenehmes). Wer schon mal einen Weidezaun berührt hat, wird der Aussage auch nicht zustimmen.

Und doch: Wir Menschen haben keine **direkten** Sinne für Elektrizität. Wir können nicht sagen, wie hoch eine Spannung oder ein Strom ist. Wir „sehen“ nicht, wie eine sich ändernde Spannung aussieht.

Deshalb haben wir uns Messgeräte geschaffen, mit denen das geht: Multimeter zum messen der Höhe einer Spannung oder eines Stroms, der Größe eines Widerstandes, Oszilloskope, die Spannungen in ihrem zeitlichen Verlauf sichtbar machen und viele mehr.

Doch was ist eigentlich „Spannung“, „Strom“ oder „Widerstand“.



In einer Talsperre wird Wasser gestaut. Intuitiv weiß man, je höher der Wasserspiegel, desto größer die Kraft des Wassers. Ohne Loch in der Staumauer passiert aber scheinbar gar nichts. Wir sprechen von „potentieller“ Energie. Mit Loch fließt Wasser, je größer das Loch, desto mehr Wasser (pro Zeiteinheit). Was passiert, wenn der Wasserspiegel sinkt?

In der Elektrizitätslehre wird der Wasserstand zur Spannung, die Lochgröße zum Widerstand (eigentlich dem Leitwert, der als $1 / R$ definiert ist) und die Wassermenge, die durch das Loch fließt, zum Strom.

Eine einfache Formel beschreibt die Zusammenhänge: $U = R * I$ (U: Spannung, R: Widerstand, I: Strom).

Durch Umstellung erhält man:

$$U / I = R$$

und

$$U / R = I$$

Man sieht, alles hängt voneinander ab. Ändert sich z.B. R, nimmt bei gleichbleibender Spannung I zu oder ab. Nimmt U zu wird I bei gleichem R größer.

Eine Formel sei noch verraten: $U \cdot I = P$, wobei P für die Leistung steht und in W(att) gemessen wird. Je mehr Strom oder Spannung, desto größer die Leistung. In den meisten Fällen wird ein mehr an Leistung zu einer Temperaturerhöhung führen¹.

1 Einheiten und Größen

Eine physikalische Einheit wie U kann man auch quantitativ, als Größenwert ausdrücken. Wir sagen z.B., die Batterie hat 1,5 V. Wobei „V“ Volt ausgesprochen wird. Während U immer eine physikalische Spannung meint, gibt es bei den Größen viele Möglichkeiten. Für sehr kleine Spannungen würden wir die Größe vielleicht in μV angeben (Mikrovolt), für sehr große in kV (Kilovolt).

Hier nun eine - unvollständige – Auflistung von Größen, die in der Elektronik verwendet werden:

U	Spannung	nV, μV , mV, V, kV
I	Strom	nA, μA , mA, A, kA
R	Widerstand	m Ω , Ω , k Ω , M Ω
P	Leistung	mW, W, kW

Die Buchstaben n, μ , m stehen für Nano (10^{-9}), Micro (10^{-6}), Milli (10^{-3}) und die Buchstaben k und M für Kilo (10^3) und Mega (10^6).

2 Der Strom rieselt nicht aus der Steckdose

Die Steckdosen in der Wohnung sind ein vertrauter Anblick. Was passiert, wenn kein Stecker bzw. ein Gerät eingesteckt ist? Richtig: nichts. Wie bei der Stauwand ohne Loch sitzt da zwar der Stromteufel drin (als Kind wurde mir das so erklärt), aber wenn ich nichts hineinstecke, fließt auch kein Strom.

Schließe ich nun einen Staubsauger an und schalte ihn ein, setzt der Strom, der durch den Motor fließt, diesen in Bewegung. Ein an den Motor angeschlossenes System erzeugt einen Unterdruck und ich kann die Krümel vom Boden aufsaugen.

Schon am Lärm merkt man, dass da ganz schön viel Energie im Spiel ist. Hersteller werben sogar mit der Leistung. „2000 W Maximalleistung“ schreiben sie. Bei 230 V^2 können wir den Strom ausrechnen: $2000\text{ W} / 230\text{ V} = \sim 8.7\text{ A}^3$. Ganz schön viel! Unsere Haushaltssicherungen begrenzen den maximalen Strom auf meist 16 A. Mehr als zwei Staubsauger gehen also nicht (pro Sicherung).

Ein Elektroherd verbraucht ca. 2000 W pro Platte. Daher wird er meist nicht an eine normale Steckdose angeschlossen. Im Gegensatz zum Staubsauger, der zwar auch warm wird, wandelt der Elektroherd die ganze Energie in Wärme um. Und deshalb können wir damit auch Suppe kochen oder

¹ In einem ohmschen Widerstand zu 100%.

² U ist die physikalische Bezeichnung für Spannung, V (Volt) ist die technische Einheit, in der U gemessen wird.

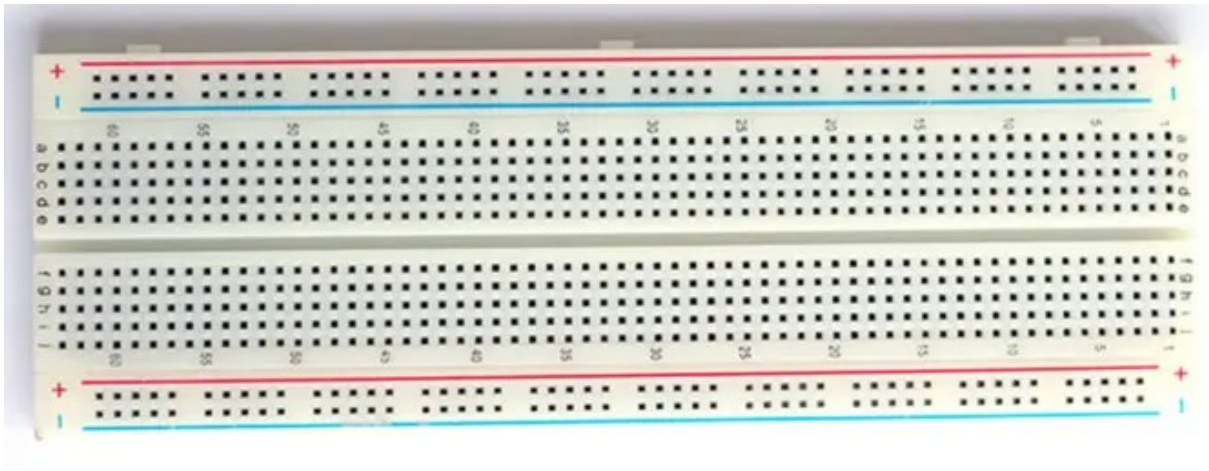
³ Wir ahnen es: W (Watt) ist die technische Einheit für P und A (Ampere) die für I. R misst man in Ohm, das Symbol ist Ω . Ganz schön kompliziert!

ein Spiegelei braten. Warum wird der Staubsauger nicht auch so heiß? Weil er die Energie überwiegend in Bewegung, die Motordrehung, umsetzt. Würden wir den Motor zwangs-anhalten, könnte die Energie nur noch in Wärme umgewandelt werden und unser Staubsauger würde wahrscheinlich kaputt gehen.

II Verbindungstechnik

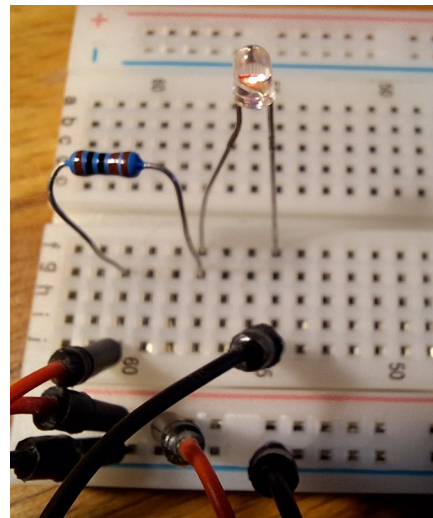
1 Unser Steckbrett

Wenn wir Schaltungen aufbauen wollen, haben wir viele Möglichkeiten: löten, Platinen erstellen usw. Seit vielen Jahren gibt es dafür aber die sogenannten Steckbretter oder Breadboards,



die den Aufbau besonders einfach machen. Sie verfügen über Klemmkontakte, in die man die Beinchen der Bauteile hineinstecken kann. Die oben und unten vorhandenen, mit + und – gekennzeichneten Bereiche sind horizontal verbunden, die Reihen innen sind senkrecht miteinander verbunden, aber nur je bis zur Mitte (die dicke Linie).

Im Bild ist ein Widerstand (links) mit einer LED zusammengesteckt. Das rote Kabel geht an +, das Schwarze an -. Da, wo das rechte Beinchen des Widerstandes mit dem linken Beinchen der LED auf einer Höhe ist, wird der Kontakt hergestellt.



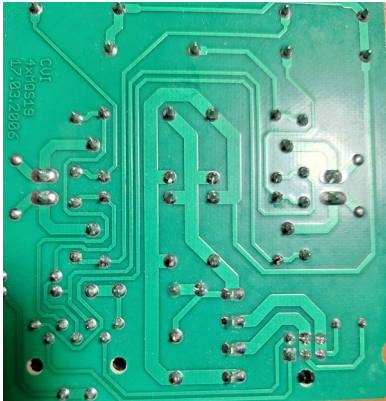
Was nun Plus und Minus ist, haben wir noch nicht kennengelernt. Der Elektroniker arbeitet fast immer mit Gleichspannung, wie sie beispielsweise eine Batterie liefert. Die 230V an unseren Steckdosen sind dagegen eine Wechselspannung, d.h. eine Spannung, die sich ständig ändert. Wozu das gut ist, klären wir aber bitte ein anderes Mal.

Im Bild kann man vielleicht erkennen, dass die LED leuchtet. Das macht sie nur, wenn ein – ausreichender – Strom durch sie fließt. Ein wenig Mathe: der Widerstand hat den Wert 1KOhm. Meine „Batterie,, (ein Labornetzteil) liefert 5V. Mein Multimeter misst 3,24mA⁴

⁴ Die Elektroniker lieben kleine Ströme und große Widerstände. Um einfacher rechnen zu können setzen sie vor die „A“ gerne ein „m“ (für milli, 1/1000) und vor die Ohm gern ein „k“ (Kilo, *1000).

Wie viel Spannung könnte ich an dem Widerstand messen? Wie war das gleich: $U = R \cdot I$, also $1000 \Omega \cdot 0,00324 \text{ mA} = 3,24 \text{ V}$. Nicht verstanden? Macht nichts, das wiederholen wir noch ganz oft. Woher die 5 Volt im Workshop kommen? Aus einem USB Netzteil.

2 Löten ohne Hexerei



Ob im Smartphone, im Computer, in der Waschmaschine: überall befinden sich sogenannte Platinen. Auf ihnen (und auch unter ihnen) sitzen die Bauelemente, von denen wir nun schon den Widerstand und die LED (Leuchtdiode) kennengelernt haben. Auf diesen Platinen (im Bild kann man die Leiterbahnen erkennen; die entsprechen den verbundenen Reihen auf unserem Steckbrett und bestehen meistens aus Kupfer) werden die Bauelemente durch Löten befestigt und elektrisch verbunden. Beim Löten wird ein Gemisch aus Zinn und anderen Metallen verwendet, das durch Erhitzen verflüssigt wird. Nach dem Abkühlen ist das Lötzinn wieder fest und bildet – im Idealfall - eine mechanisch wie elek-

trisch stabile Verbindung zum Bauteil bzw. dessen Anschlussdraht.

Gute Lötstellen erkennt man an ihrer „schönen“ Form. Sie sind glatt, glänzend und umschließen den Draht des Bauteils von allen Seiten.

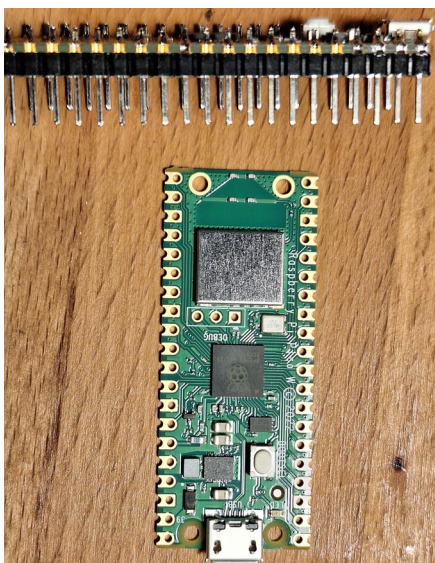
Um das Lötzinn zu schmelzen, braucht man einen „LötKolben“ (siehe Bild), der, meist elektrisch, auf etwa 280 bis 450 °C erhitzt wird.

Der im Kurs verwendete Weller Löt-



kolben hat keine stufenlose Temperaturregelung, sondern man verwendet unterschiedliche Lötspitzen für unterschiedliche Temperaturen. Unsere regelt auf 370°.

Alte, goldene Regel: den LötKolben nie am heißen Ende anfassen!



Seit vielen Jahren ist die Verwendung von bleihaltigem Lötzinn in der Industrie verboten. Blei ist ein starkes Umweltgift. Deshalb wurde auch verbleites Benzin in Deutschland verboten (1988). Vielleicht hat zu diesem Verbot beigetragen, dass man Blei in Eisbären am Nordpol nachweisen konnte.

Wir verwenden hier dennoch verbleites Lot. Entwarnung: wenn man nicht am Lötzinn lutscht, wird man nicht vergiftet. Die Gefahr bei industriellen Produkten geht von den Unmengen an Elektroschrott aus, der oft in der Umwelt landet. Warum verwenden wir es hier dennoch? Weil bleifreies Lot erst über 400 °C verarbeitbar ist und WESENTLICH schwieriger zu handhaben ist.

Wenn wir Steckbretter verwenden, warum dann löten? Die Mikrocontroller, die wir einsetzen, kommen zwar fertig verlötet auf

einer kleinen Platine, aber wir wollen sie im Steckbrett anschließen und müssen daher noch sogenannte Stiftleisten anlöten. Im Bild sieht man den Mikrocontroller einmal mit und einmal ohne Stiftleisten.

Außerdem – wer noch nie gelötet hat ist ja kein richtiger Elektroniker, oder?

3 Die Kunst des Lötens

Wie schon erwähnt, ist eine „schöne“ Lötstelle eine gute Lötstelle. Das führt zum Gedanken, das Löten ein wenig eine Kunst ist. Und Kunst kommt von können...

Einigen wir uns vielleicht auf „Kunsth Handwerk“. Auf YouTube gibt es unzählige Filme über das Löten. Ich möchte hier meine fast 60jährige Erfahrung schildern. Bei mir geht Löten in zwei Schritten. Die Zwischenschritte, vorbereitenden Schritte etc. lasse ich erst mal aus.

Schritt 1: Wenn der Draht oder Stift in der Platine steckt, wird mit der Spitze des LötKolbens der Draht und das sogenannte Lötauge (der Kupferring um das Loch) gleichzeitig erhitzt. Hier spielt Erfahrung eine große Rolle, da die Dauer des Erhitzens von der Dicke des Drahts, der Größe des LötAuges usw. abhängt. Ein guter Richtwert sind 2-5 Sekunden.

Schritt 2: Ohne die Lötspitze zu bewegen wird nun das LötZinn, das in Form eines dünnen, weichen Drahtes daherkommt, mit dem Ende des Drahtes an die Lötspitze, da, wo sie das Lötauge berührt, herangeführt. Es passiert zweierlei: das LötZinn schmilzt sofort und ein feiner Rauch steigt auf. Der Rauch stammt von in das LötZinn eingebettetem Kolophonium, das als sogenanntes Flussmittel dient. Wie dieser Name schon andeutet, hilft es dabei, dass das LötZinn alle Oberflächen lückenlos benetzen kann.

Schritt 2 ½: die Lötspitze wieder entfernen!

Tipp: ich puste manchmal auf die Lötstelle, damit das Zinn schneller abkühlt. In der Zeit der Abkühlung, bis das LötZinn wieder ganz fest ist, darf sich NICHTS bewegen. Sonst gibt es Haarrisse.

Erhitzt man das LötZinn zu lange, verflüchtigt sich das Flussmittel und die Lötstelle verändert ihr Aussehen. Auch „hängt“ das Zinn nun eher an der Lötspitze und erzeugt hässliche Spitzen. Gebe ich nun Flussmittel oder „frisches“ LötZinn hinzu, wird die Lötstelle wieder glänzend und „schön“! Jetzt wird auch ersichtlich, warum man die Lötspitze immer wieder säubern muss: hier befindet sich eben LötZinn, das lange erhitzt wurde. Außerdem stören dort natürlich Lötzinntropfen.

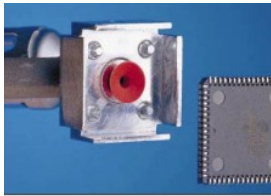
Unter guten bis idealen Bedingungen erhält man eine Lötstelle, die Jahrzehnte überdauern wird.

Nicht so ideale Bedingungen sind Korrosion oder Verschmutzungen. Die müssen vorher beseitigt werden. Dafür gibt es Werkzeuge und Chemikalien. Weiterhin können große Kupferflächen, dicke Drähte aber auch das Gegenteil, sehr dünne Drähte, für Schwierigkeiten sorgen.

Neben dem LötKolben gibt es zahlreiche Werkzeuge, die das Löten erleichtern. Platinenhalter, „Dritte Hände“, Pinzetten und Kreuzpinzetten (das sind Pinzetten, die mit ihrer Federkraft selbst

schließen), Glasfaserstifte, mit denen, wie mit einem Radiergummi, Korrosion entfernt werden kann und vieles mehr.

Noch nicht erwähnt habe ich den umgekehrten Fall: das Entlöten. Nicht nur bei Reparaturen, sondern auch, wenn man eigene Schaltungen zusammenbaut, muss man häufig ein Bauteil auch wieder entfernen. Die Idee, einfach die Lötstelle mit dem LötKolben heiß zu machen und es herauszuziehen, scheitert schon daran, dass die meisten Bauteile mehr als einen Anschlussdraht haben. Ganz besonders schwierig wird es natürlich bei Integrierten Schaltungen mit ihren vielen Beinchen. Eigentlich müssten ALLE Lötstellen gleichzeitig erhitzt werden und, tatsächlich, gibt es dafür sehr spezielle und sehr teure Lötspitzen (siehe Bild). Erschwinglicher ist sogenannte Entlötlitze, ein mit



Flussmittel getränktes Kupfergeflecht, das das verflüssigte Zinn wie ein Schwamm aufsaugt. Daneben gibt es noch Lötzinnabsauger, entweder integriert in einen LötKolben oder separat. Zu Hause habe ich eine kombinierte Löt- Entlötstation, wobei der EntlötKolben mittels elektrischer Luftpumpe, auf Knopfdruck hin, das Zinn absaugt.

Eine weitere Methode zu löten und zu entlöten soll noch verraten werden: Heißluft. Eine Heißluftpistole sieht ein wenig wie ein LötKolben aus, aber vorne strömt hunderte von Grad heiße Luft aus. Sowohl die Temperatur als auch die Stärke des Luftstroms kann eingestellt werden.

Der Vorteil dieser Art zu löten besteht in der Möglichkeit, mehr als einen Anschluss gleichzeitig zu erhitzen; so lassen sich ICs mit vielen Beinchen anlöten und – mit sehr viel Übung – auch ablöten.

III Über Bauteile, Familien und anderes

In den Anfangsjahren meines Hobbys (Mitte der 1960er) waren Röhren noch weit verbreitet. Wegen ihres Bedarfs an sehr hohen Versorgungsspannungen (mehrere hundert Volt) war das Arbeiten damit für einen Zwölfjährigen zu gefährlich. Es gab aber auch schon Transistoren und meine ersten Schaltungen, die ich natürlich nicht selbst entwarf, sondern nach Vorgaben nachbaute, basierten auf einem AC126 und einem AF116, beides Germaniumtransistoren. Die kryptischen Bezeichnungen sind gar nicht so kryptisch, wenn man weiß:

A (an erster Stelle) steht für Germanium

B (an erster Stelle) steht für Silizium

C (an zweiter Stelle) für Kleinleistungstransistor für Niederfrequenz

F (an zweiter Stelle) für Hochfrequenz

Die Zahlen sind dann nicht mehr sprechend, aber generell erhöhen die Hersteller die Nummern im Zuge der Weiterentwicklung. Mein nächster Transistor war ein BC107. Aha:

B steht für Silizium und C und eine Nummer hatten wir schon.

Solche Zusammenhänge zu kennen erleichtert den Umgang mit Bauelementen enorm. Überhaupt kann man Bauelemente in Familien gruppiert sehen:

Widerstände: Kohle, Metall, Draht

Kondensatoren: Keramik, Kunststoff, Elektrolyt

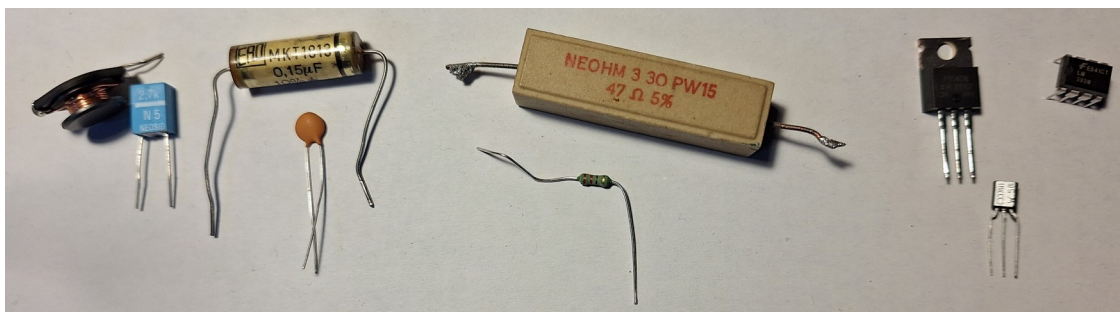
Spulen: Luft oder mit Kern, für niedrige oder hohe Frequenzen

Transistoren: Material (Germanium, Silizium), kleine oder große Leistung, niedrige oder hohe Frequenzen, NPN oder PNP. Das wird später erläutert.

Dioden: Leistung, Schaltgeschwindigkeit, Material (Germanium, Silizium)

Unten sehen wir noch ein paar Bauteile in recht üblichen Bauformen (von links nach rechts):

Spule, Spule in Gehäuse, Folienkondensator (oben), keramischer Kondensator, Lastwiderstand (oben), $\frac{1}{4}$ Watt Metallfilmwiderstand, Leistungstransistor, Kleinleistungstransistor, IC.



Manche dieser Familien, die wie Widerstände in allen möglichen Werten vorkommen könnten, kennen sogenannte Normreihen. Anstatt jeden denkbaren Wert herzustellen, was, man denke nur an die Lagerhaltung, fast unmöglich erscheint, hat man sich, auch international, auf sie geeinigt. Für

Widerstände (aber auch Kondensatoren und Spulen⁵) gibt es u.a. die sehr bedeutenden Reihen E6 und E12. Die E6 Reihe sieht so aus:

1 – 1,5 – 2,2 – 3,3 – 4,7 – 6,8

und die E12 so:

1 – 1,2 – 1,5 – 1,8 – 2,2 – 2,7 – 3,3 – 3,9 – 4,7 – 5,6 – 6,8 – 8,2

Jede dieser Zahlen stellt die Grundgröße dar, die dann mit 1, 10, 100, 1000 usw. multipliziert wird. Dabei hat die E6 Reihe eine Toleranz (erlaubte Abweichung vom Nennwert) von 20% und die E12 Reihe von 10%. Am besten selbst mal nachrechnen, ob das einen Sinn ergibt.

Mit den genannten Bauteilen (und noch ein paar weiteren) kann man schon schöne Dinge basteln. Mein Elektronik-Experimentierkasten erlaubte an die 20 verschiedene Schaltungen aufzubauen: Wechselsprechanlage, dazu waren zwei kleine Lautsprecher mit dabei, ein einfaches Radio, das bei mir nie funktionieren wollte, ein Tongenerator, der 8 verschiedenen hohe Töne erzeugte und den man als einfaches Musikinstrument verwenden konnte, ein kleiner Audio-Verstärker und vieles mehr.

Der große Nachteil der Sache: Weder war mir klar, was die Schaltungen im Einzelnen machten und vor allem wie, noch hatte ich die Möglichkeit, Fehler zu finden. Denn mir fehlte ein Messinstrument. Batterie leer? Keine Ahnung! Spannung an einer bestimmten Stelle der Schaltung? Nicht feststellbar.

Das ist heute einfacher, weil billiger, zu lösen. Ein Digitalmultimeter gibt es ab 10 – 20 €. Ein kleines Oszilloskop liegt bei 40 – 200 €. Besonders Letzteres ist sehr zu empfehlen.

5 Was das ist, behandeln wir später.

IV Erst mal analog

Meine Definition: Elektronik fängt da an, wo aktive Bauelemente, wie Transistoren, ins Spiel kommen. Aber auch mit nur zwei Widerständen und einer LED kann man schon spannende Experimente durchführen.

Ein Experiment

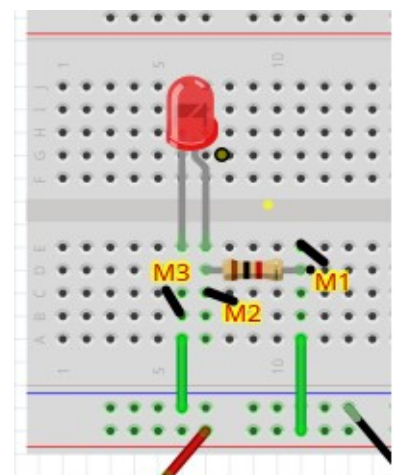
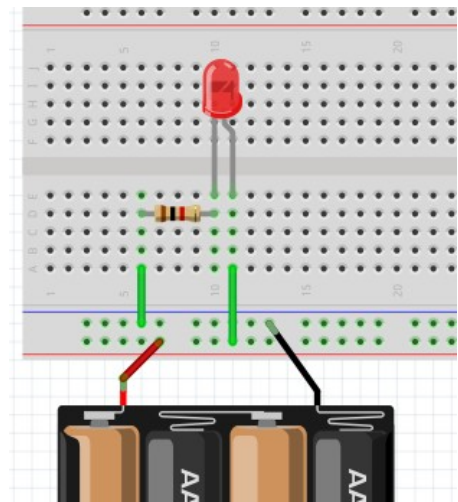
Rechts sehen wir den Aufbau der Schaltung. Das Batteriepack dient nur zur Veranschaulichung und ich lasse es im folgenden weg. Wir versorgen unser Board über USB (5V). So, wie es angeschlossen ist, leuchtet die LED⁶. Wir drehen sie um, sie leuchtet nicht. Kaputt? Wir drehen sie wieder um, super, sie leuchtet wieder!

LED steht für Light Emitting Diode, eine Diode, die Strom in Licht umwandeln kann. Außerdem lässt sie Strom nur in einer Richtung durch. Strom nur in eine Richtung? Was bedeutet das? Der Elektroniker definiert die Stromrichtung von Plus (+) nach Minus (-). Denken wir an das Beispiel mit der Staumauer, kann man sich vorstellen, dass das Wasser von links nach rechts fließt. Wir könnten das Wasser aber auch auf der rechten Seite der Mauer stauen. Genau, dann wäre die Strom-, Entschuldigung: Wasserrichtung von rechts nach links.

Wir können unser Experiment so abwandeln, dass wir die Batterieanschlüsse tauschen. Wieder wird die LED nicht mehr leuchten. Bei erneutem Vertauschen geht sie wieder an. Wir können auch die Position des Widerstands mit der LED tauschen: nun fließt der Strom „zuerst“⁷ durch den Widerstand und dann durch die Diode. Hat das irgendeine Bedeutung? Das wollen wir herausfinden und nehmen das Multimeter zur Hand.

Mit diesem Instrument kann man die Spannungen an jedem Bauteil messen. Ich habe die Messpunkte mit M1 bis M3 bezeichnet. Von M1 nach M3 liegt die Versorgungsspannung (unsere 5V vom USB Anschluss). Von M1 nach M2 messen wir am Widerstand und von M2 nach M3 an der LED.

Interessant wird es, wenn wir die Messspitzen des Multimeters vertauschen. Wo vorher eine positive Spannung angezeigt wurde, wird sie nun negativ (mit „-“ als Vorzeichen) im Display dargestellt und anders herum.



⁶ Die Darstellung der LED im Bild ist ziemlich fotorealistisch. Die Anode (+ Anschluss) befindet sich an dem abgewinkelten Draht, meist ist dieser ein wenig länger.

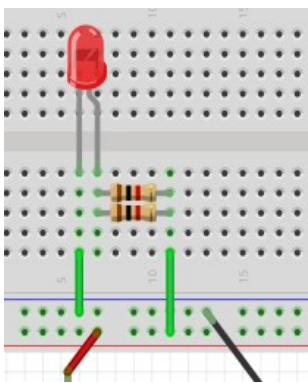
⁷ Strom „fließt“ mit fast Lichtgeschwindigkeit; wenn wir einen Stromkreis schließen, ist der Strom gefühlt überall sofort da!

MERKE: Weil Spannungswerte in einer Schaltung *relativ* sind, definiert der Elektroniker genau einen Bezugspunkt. Liegt dieser Bezugspunkt an einem Anschluss der Versorgungsspannung und / oder einem Punkt mit festem Potential⁸, sprechen wir auch von „Masse“ (engl. Ground).

In unserer Schaltung könnte sowohl M1 als auch M3 als Masse dienen. Es ist meist sinnvoll, den Minus-Anschluss der Versorgung als Bezugspunkt zu definieren, also hier M3. Wichtig ist nun, ALLE Messungen gegen diesen Punkt durchzuführen.

MERKE: Wenn wir *nicht* gegen Masse, sondern mit den Prüfspitzen unseres Multimeters an die Enden z.B. eines Widerstandes gehen, nennt man das den „Spannungsabfall“ messen.

Noch eins

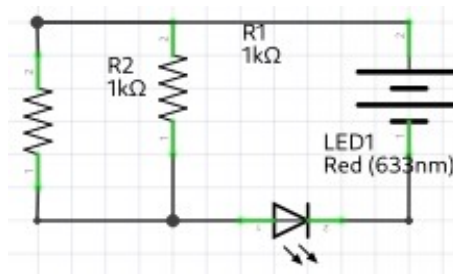


Wir haben noch einen Widerstand übrig. Den setzen wir nun in die Schaltung wie im Bild zu sehen ein. Die LED leuchtet heller! In Analogie zum Staumauer-Beispiel haben wir ein zweites Loch hinein gebohrt. Also fließt mehr Wasser ab bzw. fließt mehr Strom. Die LED wandelt Strom in Licht um, also bei höherem Strom auch mehr Licht!

Eine weitere Abwandlung der Schaltung könnte darin bestehen, den zweiten Widerstand nicht parallel, sondern in Reihe zu schalten.

Das gibt uns die Gelegenheit, eine neue Darstellungsart für Schaltungen vorzustellen, den Schaltplan. Zunächst einmal für die Schaltung auf

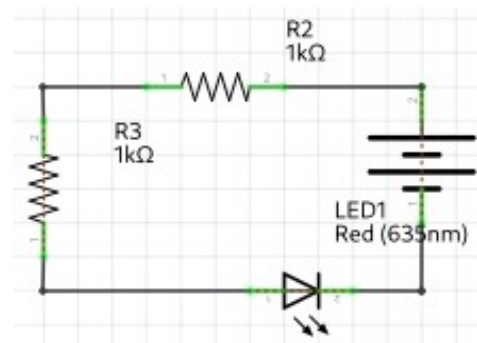
dem Steckbrett:



Man sieht die Symbole für die beiden Widerstände, hier in US-amerikanischer Norm, das Zeichen für eine Diode, durch die beiden Pfeile als LED erkennbar und die Batterie.⁹

In meinen Augen ist das viel übersichtlicher. Der Schaltplan und die Steckbrettdarstellung stammen übrigens aus dem Programm Fritzing.

Nun der Schaltplan mit den Widerständen in Reihe:



⁸ Ein festes Potential ändert seinen Wert im Betrieb der Schaltung nicht.

⁹ Zur Erinnerung: das Symbol Ω steht für Ohm

Wie würde das im Steckbrett aussehen? Einfach mal ausprobieren!

Der Effekt auf die LED sei aber schon verraten: sie wird dunkler, nicht nur gegenüber der vorigen sondern auch der vorvorigen Schaltung (der mit einem Widerstand). Um die Staumauer nicht zu sehr zu beanspruchen, versuche ich eine mehr elektrotechnische Erklärung. Wenn U / R den Strom ergibt, dann kann $U / (R_1 + R_2)$ nur einen kleineren Strom ergeben.

MERKE: der Gesamtwiderstand R_g ist $R_1 + R_2 + R_n$ bei Reihenschaltung.

Also $1 \text{ kOhm} + 1 \text{ kOhm} = 2 \text{ kOhm}$.

Der Gesamtwiderstand bei Parallelschaltung ist:
$$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n}}$$

Es werden also die Leitwerte addiert und dann der Ergebnisleitwert wieder in den Widerstand umgerechnet:

$$R = \text{Widerstand}, \frac{1}{R} = \text{Leitwert}$$

Also¹⁰

$$\frac{1}{\frac{1}{1 \text{ kOhm}} + \frac{1}{1 \text{ kOhm}}}$$

oder

$$1 / (0.001 + 0.001) \text{ oder}$$

$$1 / 0.002 = 500.$$

Sind beide Widerstände gleich, wie in unserem Beispiel, vereinfacht sich die Rechnung zu

$$R_g = R / 2.$$

Puh, soviel Mathe! Leider geht es nicht immer ohne.

2 Reihenschaltung / Parallelschaltung

Mir erscheint es sehr, sehr wichtig, dass man den Unterschied dieser beiden Beschaltungen versteht, weswegen ich hier extra einen eigenen Absatz dazu schreibe!

Reihenschaltung

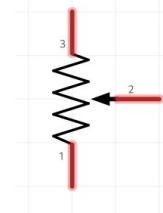
Weiter oben sahen wir einen Schaltplan, in dem eine Batterie, 2 Widerstände und eine LED in Reihe verbunden sind. Vom Pluspol der Batterie geht es an R_2 , dann R_3 und dann die LED zum Minus-Anschluss. Der Strom (in technischer Stromrichtung) fließt von Plus nach Minus; er muss dabei durch alle Bauteile hindurch. Das bedeutet: der Strom durch jedes Bauelement ist gleich!

Messen wir die Spannungen an jedem Bauteil, stellen wir fest, dass sie ganz unterschiedlich sein können, aber ihre Summe ist gleich der Batteriespannung¹¹.

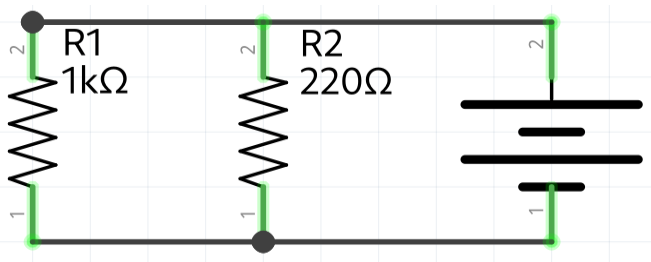
¹⁰ Auf dem Taschenrechner gibt man das als „ $1 / (1 / 1000 + 1 / 1000)$ “ ein.

¹¹ Wir müssen die vorzeichenlosen Werte addieren.

Eine solche Reihenschaltung hat noch zwei weitere Namen: Serienschaltung und Spannungsteiler. Ersteres ist nur ein Synonym; Spannungsteiler verweist aber auf die besondere Eigenschaft dieser Schaltungsart: sie teilt Spannungen auf, bei zwei Widerständen in zwei, bei drei Widerständen in drei usw. im Verhältnis der Widerstandswerte. Es gibt eine Sonderform, die jeder kennt: das Potentiometer, als Lautstärke- oder Klangregler an Verstärkern, Radios usw. Dabei handelt es sich vereinfacht um einen Widerstand mit einem variablen Abgriff: das Schaltplansymbol rechts verdeutlicht das Prinzip. Ist der Abgriff ganz unten, ist die Spannung 0 Volt. Ist er oben, nimmt sie den Maximalwert an, ja, und in der Mitte ist es genau die halbe Spannung.



Parallelschaltung



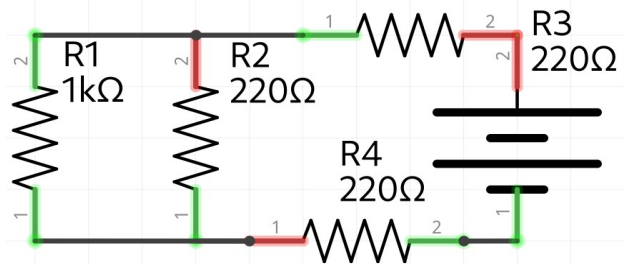
Im linken Schaltplan sind zwei Widerstände parallel geschaltet. Verfolgt man vom Pluspol der Batterie die Leitungsführung, gibt es zwei Wege für den Strom: vom oberen Anschluss von R₂ zum unteren Anschluss und vom oberen Anschluss von R₁ zum unteren Anschluss und zum Minuspol.

An beiden Widerständen liegt die Batteriespannung an, also ist die Spannung an beiden Widerständen gleich. Der Strom kann unterschiedlich sein (wie im Beispiel), aber seine Summe entspricht dem Batteriestrom.

Komplexere Schaltungen

Reihen- und Parallelschaltung treten natürlich selten in dieser reinen Form auf. Meist mischen sie sich wild. Eine noch überschaubare Variante zeigt der nächste Plan.

Hier ist der Widerstand R₃ mit einer Parallelschaltung aus R₁ und R₂ und R₄ in Reihe geschaltet. Der gesamte Strom muss durch R₃, dann teilt er sich auf.



Wie berechnet man so etwas? Das ist einfacher, als auf den ersten Blick zu ersehen. Ich kann nämlich die parallelen Widerstände¹² zusammenfassen (wie wir oben schon gelernt haben):

$$R_{1|2} = 1 / (1 / R_1 + 1 / R_2) \text{ oder}$$

$$R_{1|2} = 1 / (1 / 1000 \Omega + 1 / 220 \Omega) \text{ oder}$$

$$R_{1|2} = \sim 180 \Omega$$

¹² Man schreibt oft R₁ | R₂, um eine Parallelschaltung anzuzeigen.

Dann ergibt sich der Gesamtwiderstand zu $220 \Omega + 180 \Omega + 220 \Omega = 620 \Omega^{13}$. Nehmen wir wieder unsere 5 Volt Spannungsquelle errechnet sich der Gesamtstrom zu $5 \text{ V} / 620 \Omega = \sim 0,00806 \text{ Ampere}^{14}$ oder 8,06 mA. Jetzt fällt es leicht, die restlichen Werte auszurechnen:

Spannung an $R_3 = 220 \Omega * 8,06 \text{ mA} = \sim 1,77 \text{ V}$ # $R * I = U$
 Spannung an $R_4 = \text{Spannung an } R_3 = \sim 1,77 \text{ V}$
 Spannung an $R_2 = 5 \text{ V} - 2 * 1,77 \text{ V} = 1,46 \text{ V}$ # 1,77 an R_3 und R_4 , also $2 * 1,77$
 Strom durch $R_2 = 1,46 \text{ V} / 220 \Omega = \sim 6,6 \text{ mA}$
 Strom durch $R_1 = 1,46 \text{ V} / 1000 \Omega = 1,46 \text{ mA}$
 Gegenprüfung: Spannung an R_3 und R_4 und $R_2 = 1,77 \text{ V} + 1,77 \text{ V} + 1,46 \text{ V} = 5 \text{ V}$.

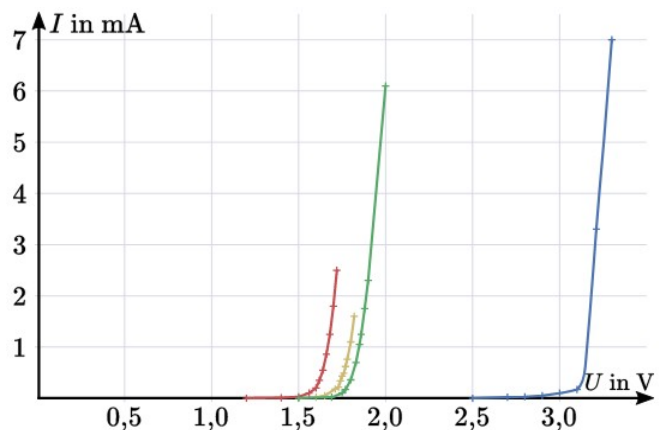
MERKE: In Reihenschaltungen ist der Strom, in Parallelschaltungen die Spannung gleich.

3 Ein Rätsel

Wenn wir mit dem Multimeter messen, werden wir feststellen, dass die Spannung an der LED in allen drei Varianten (ein 1 kOhm, 2 kOhm, 500 Ohm) fast gleich bleibt, immer so um die 1,75V herum. Nehmen wir dagegen eine andere LED, z.B. eine grüne, ändert sich die Spannung auf ca. 2,1V, aber wieder nur sehr gering bei unterschiedlichen Widerständen. Eine LED, allgemeiner eine Diode, ist ein nichtlineares Bauteil. In der Grafik¹⁵ wurde durch Messung von Strom und Spannung für vier verschiedenfarbige LED ein Kennlinienfeld erstellt. Würde hier ein Widerstand mit angezeigt, ergäbe das eine *gerade* Linie von links-unten nach rechts-oben. Der Strom durch den Widerstand steigt linear gemäß U / R . Offensichtlich steigt bei einer LED der Strom aber ab einer bestimmten und dann mit zunehmender Spannung steil an.

MERKE: Nichtlinearität ist der Kern der Elektronik.

Was in diesem Schaubild fehlt, ist die Seite links von Null auf der X-Achse. Die ist für eine LED auch nicht erlaubt; sie gehen bei einer zu hohen negativen Spannung einfach kaputt. Mit unseren 5V schaffen wir das aber zum Glück nicht.



4 Was ist eigentlich ein Transistor

Wenn von Elektronik gesprochen wird, taucht immer wieder der geheimnisvolle Transistor auf. Manchmal nur einer, manchmal auch schrecklich viele: die Werbung für CPUs für Computer enthält oft Aussagen wie „mit 7 Milliarden Transistoren“.

Bleiben wir bei einem. Den gibt es in vielen Ausführungen. Wir erinnern uns an AC126 und BC107. Das eine war ein Germanium PNP und das andere ein Silizium NPN Transistor. Sowohl Ger-

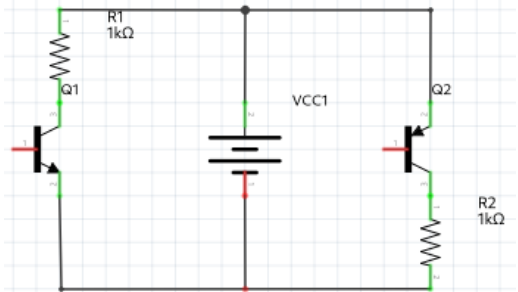
13 Die Einheit für Widerstand ist Ohm, das Zeichen dafür Ω .

14 Wir machen ein \sim Symbol vor einen Wert, wenn er gerundet oder abgekürzt, eben nicht genau ist.

15 Kopiert von <https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/versuche/kennlinien-von-leuchtdioden>

manium- als auch Silizium-Transistoren gibt es aber in beiden Varianten: PNP und NPN. Diese kryptischen Bezeichnungen¹⁶ stehen für unterschiedliche Herstellungsverfahren, bei denen der Arbeitsstrom durch den Transistor entweder positiv oder negativ wird. Schlauer geworden? Eine Beispielschaltung:

Zunächst einmal sieht man hier die Symbole für einen NPN (links) und einen PNP (rechts) Transistor. Die kleinen Pfeile im Symbol zeigen die Stromrichtung (von + nach -) an. Der lange Strich an der Batterie (Mitte) ist Plus, der kurze Minus. Bei beiden Transistoren erkennt man drei Anschlüsse: Emitter (der mit dem Pfeil), Kollektor (mit dem Widerstand verbunden) und Basis (hier nicht angeschlossen).



Früher konnte ich mir die Wirkungsweise eines Transistors einfach nicht vorstellen. Daher habe ich mir ein Modell ausgedacht, das ich hier, eingedenk meiner zeichnerischen Grenzen, in Worten beschreiben möchte.

An einem Kanal – man merkt meine Begeisterung für Wasser – gibt es ein Stauwehr, das ihn komplett schließen kann. Das Wehr wird über ein kleines Wasserrad gesteuert. Fließt hier Wasser, wird es geöffnet, je mehr Wasser, desto höher wird es gezogen. Hört der Wasserstrom am Wasserrad auf, senkt sich das Wehr wieder. Das Wasser, welches über das Wasserrad fließt, wird dabei unterhalb des Wehrs in den Kanal geleitet. Wichtig ist, das nur eine kleine Wassermenge am Wasserrad eine große Menge Wasser durch den Kanal fließen lässt. Das nennt man den Verstärkungsfaktor.

Beim Transistor ist der Kanal oberhalb des Wehrs der Kollektor, unterhalb der Emitter und das Wasserrad entspricht der Basis. Fließt ein kleiner Strom von der Basis zum Emitter (in Pfeilrichtung), fließt ein größerer Strom vom Kollektor zum Emitter, oder genauer gesagt: kann ein größerer Strom fließen. Anders ausgedrückt: ich kann mit dem Strom an der Basis den Kollektorstrom steuern.

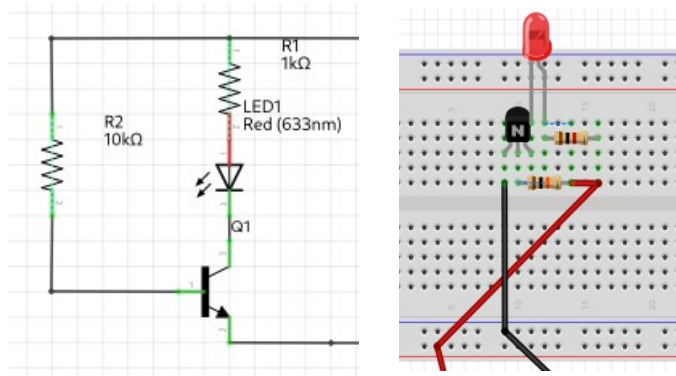
Der Transistor kann daher, man nennt es oft Signale, verstärken. Dabei liegt die Größenordnung der Verstärkung zwischen 10 und mehr als Tausend, je nach Typ und Schaltungsart. Letzteres wird später ausführlicher behandelt.

All diese Erklärungen beziehen sich auf sogenannte Bipolar-Transistoren. Heutzutage gibt es aber, neben den Röhren, die nicht mehr häufig verwendet werden, noch viele andere verstärkende Bauelemente: FET, MOS-FET, IGBT, Thyristor, Triac und noch mehr.

Noch ein Experiment

Bauen wir die linke Seite des Schaltplans mit den beiden Transistoren im Steckbrett nach, fügen aber die LED zwischen + und dem Widerstand ein:

¹⁶ Detaillierte Erklärung hier: <https://de.wikipedia.org/wiki/Dotierung>



Der Schaltplan erscheint mir wieder übersichtlicher als die Steckbrettdarstellung.

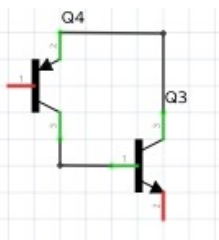
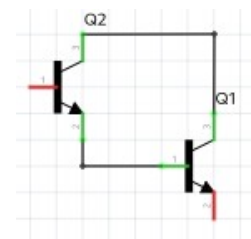
Nach dem Zusammenbau leuchtet die LED. Es fließt also Strom durch den Transistor. Ziehen wir nun den Widerstand R_2 heraus, erlischt sie. R_2 lässt Strom in die Basis fließen. Würden wir die LED über diesen Widerstand (R_2) direkt anschließen, würde sie nur sehr wenig leuchten.

Was passiert, wenn wir mit Zeigefinger und Daumen an + und die Basis des Transistors fassen?
Was, wenn wir stattdessen an – fassen?

Was geschieht, wenn wir nur an die Basis fassen und zuletzt, was, wenn wir das tun, nachdem wir die Fingerspitze nass gemacht haben?

5 Ein Supertransistor

Transistoren haben tolle Eigenschaften, aber man ist ja nie zufrieden. Wäre es nicht schön, mehr Verstärkung zu haben? Die Lösung heißt „Darlington“ Transistorschaltung. Sie besteht aus zwei Transistoren, die wie im Bild direkt verschaltet werden.



Es gibt auch eine Variante mit einem PNP und einem NPN Transistor.

Wie funktioniert das? Der Strom durch Q_2 oder Q_4 fließt direkt in die Basis von Q_1 bzw. Q_3 . Wenn in jeweils linken Transistor ein Basisstrom von $1 \mu\text{A}$ fließt und seine Stromverstärkung 100 betragen würde, fließen schon $100 \mu\text{A}$ in die Basis des rechten Transistors, der, bei ebenfalls einer Verstärkung von 100 schon 10 mA erlauben würde: die Stromverstärkungen multiplizieren sich, $100 * 100 = 10000!$

Moderne Transistoren haben gern einmal eine Verstärkung von 500 – 1000. Man kommt also theoretisch auf 1 Million.

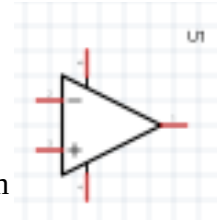
Darlington Transistoren kann man auch fertig in einem Gehäuse kaufen.

Warum nimmt man nun eigentlich nicht nur noch Darlington Transistoren? Weil Superkräfte auch Nachteile haben. Zum einen ist das die doppelte Diodendurchlassspannung bei Variante eins, aber es gibt ein Problem anderer Art: Rauschen. Jedes Bauelement erzeugt Rauschen, vereinfacht ein Gemisch aus allen möglichen Frequenzen. Bei der extrem hohen Verstärkung wird leider auch das

Rauschen mit verstärkt. Auch die Schaltgeschwindigkeit, kleinere Bandbreiten und anderes sprechen gegen flächendeckenden Einsatz.

6 Der Operationsverstärker

Obwohl es sich beim Operationsverstärker nicht um einen Transistor, sondern recht viele in einem Gehäuse handelt, eine Integrierte Schaltung, soll er hier, nach dem „Supertransistor“ erwähnt werden. Denn ähnlich diesem bildet ein Operationsverstärker den „idealen“ Verstärker: hoher Eingangswiderstand, niedriger Ausgangswiderstand, extrem hohe Verstärkung und zwei Eingänge, bei denen nur die Differenzspannung Auswirkungen auf die Ausgangsspannung hat. Im Schaltbild rechts sieht man die Eingänge, die mit + und – beschriftet sind, außerdem rechts, am Ende des Dreiecks, den Ausgang. Hier wurden auch noch die Versorgungsanschlüsse eingezeichnet; Operationsverstärker werden mit einer symmetrischen Versorgungsspannung betrieben, d.h. es gibt zwei Spannungen mit der Masse in der Mitte. Man kann sich das so vorstellen, als wenn zwei 9 V Batterieblöcke in Reihe geschaltet werden; es ergeben sich einmal plus und einmal minus 9 V.

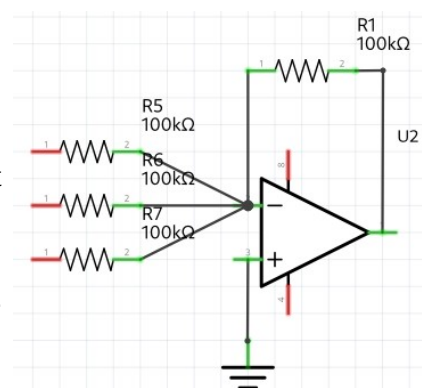


Die Aussage mit der Differenzspannung bedarf natürlich noch einer genaueren Erklärung. Zunächst sei betont, dass ich über einen, nicht-existenten, idealen Operationsverstärker spreche; die Realen kommen dem aber sehr nahe.

Wenn ich an beide Eingänge die gleiche Spannung lege, bleibt der Ausgang auf 0 V (Masse). Ich kann diese Spannung über den gesamten Versorgungsspannungsbereich ändern. Erst, wenn am plus Eingang eine andere Spannung liegt als am minus Eingang, ändert sich die Ausgangsspannung und zwar so, dass sie steigt, wenn der plus Eingang positiv gegenüber dem minus Eingang wird. Im umgekehrten Fall, plus Eingang negativ gegenüber minus Eingang, sinkt sie, wobei sinken / steigen bedeutet, dass sie sofort den jeweiligen Maximalwert erreicht, denn die Verstärkung des Operationsverstärkers geht gegen Unendlich.

Der Name Operationsverstärker stammt von seiner Fähigkeit, bestimmte Rechenoperationen durchführen zu können. So kann er Spannungen addieren und subtrahieren.

Das Beispiel rechts zeigt einen ganz einfachen Addierer mit invertiertem¹⁷ Ausgangssignal. Lege ich an die Widerstände R_5 bis R_7 je 1 V, stellt sich der Ausgang auf -3 V ein. Man kann sich das so vorstellen: wenn ich an R_5 1 V anlege, entsteht eine Spannungsdifferenz zwischen dem plus und minus Eingang; der Ausgang wird negativ und zwar bis die Differenzspannung wieder Null ist. Da R_5 und R_1 gleich groß sind, ist das der Fall, wenn der Ausgang -1 V erreicht (die Summe der Spannung muss 0 V sein: $+1 \text{ V} + -1 \text{ V} = 0 \text{ V}$).



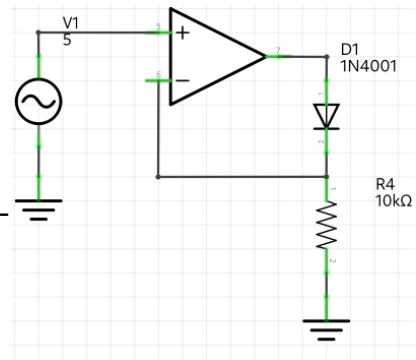
Lege ich jetzt an R_6 1 V an, entsteht wieder eine Spannungsdifferenz, die der Ausgang dann ausgeglichen hat, wenn -2 V erreicht sind usw.

¹⁷ Das bedeutet, dass das Ausgangssignal gegenüber einem nicht-invertierten mit -1 multipliziert werden muss.

Eine praktische Anwendung dafür wäre z.B. ein Audio-Mischpult.

Diese kompliziertere Schaltung stellt einen idealen Gleichrichter dar. Da Dioden erst bei ca. 0,6 V zu leiten beginnen, haben kleinere Spannungen keine Chance gleichgerichtet zu werden. Anders bei der Schaltung rechts.

Eine Eingangsspannung von +10 mV am plus Eingang veranlasst den Ausgang des Operationsverstärkers solange anzusteigen, bis am Widerstand R_4 ebenfalls 10 mV liegen. Wegen der Diode muss die Ausgangsspannung dazu ca. 0,6 V + 0,01 V betragen.

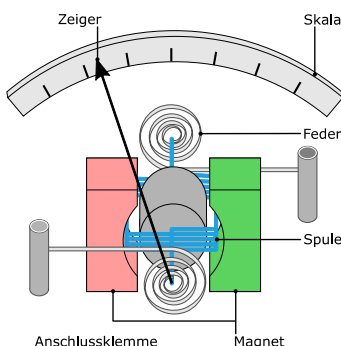


Nun schauen wir uns den Fall für -10 mV an. Die Ausgangsspannung sinkt und sinkt, weil aber die Diode sperrt, bleibt die Spannung an R_4 auf Masse Potential.

Es handelt sich aber nur um eine Prinzipschaltung. Da ein realer Operationsverstärker seine Ausgangsspannung nicht in unendlicher Geschwindigkeit ändern kann, würde bei einem Wechsel von einer negativen zu einer positiven Eingangsspannung der Operationsverstärker dem Anstieg des Signals zeitlich nicht folgen können.

7 Die Tücken des Messens

Mein erstes Multimeter war noch analog und passiv mit einem Drehspulinstrument. Die gibt es zwar auch heute noch, sie wurden aber von digitalen, aktiven elektronischen Multimetern verdrängt. Aus gutem Grund: geringe Genauigkeit, schlechte Ablesegenauigkeit (Parallaxenfehler), geringer Innenwiderstand bei Spannungsmessungen, hoher Innenwiderstand bei Strommessungen¹⁸, schwierige Bedienung, wenig Messfunktionen. Damit ist auch schon beschrieben, was heutige Multimeter auszeichnet, denn bei ihnen ist es genau umgekehrt: hohe Genauigkeit, hoher Innenwiderstand, meist 10 MΩ, usw. Bei den Messfunktionen punkten sie teils mit Frequenzmessung, Kapazitätsmessung, Induktivitätsmessung u.a. Erreicht wird dies durch die Verwendung spezieller integrierter Schaltungen, die Mikrocontroller gesteuert automatisch den Messbereich wählen, Fehlbedienungen abfangen und im Analogteil für hohe Empfindlichkeit bei hohem Eingangswiderstand sorgen.



Um die gebrauchten, wahrscheinlich unbekanntenen Begriffe zu erklären, könnte ich jetzt noch ein ganzes Kapitel schreiben. Darum nur ganz kurz:

passiv = keine aktiven Bauelemente wie Röhren oder Transistoren.
Drehspulinstrument = siehe Bild.

Frequenz = bei Wechselspannungen haben wir noch weitere Eigenschaften; die wichtigsten sind die Kurvenform (Sinuskurve bei Netz-

¹⁸ Während bei Spannungsmessungen ein hoher Eingangswiderstand gewünscht wird, muss er bei Strommessungen möglichst klein sein: Strom wird indirekt durch den Spannungsabfall an einem im Messgerät befindlichen in Serie geschalteten Widerstand ermittelt. Es gibt auch „direkte“ Strommessungen durch Hallensensoren und induktiv mit Stromzangen.

spannung) und eben die Frequenz, die als Schwingungen pro Sekunde definiert wird. Kapazität und Induktivität = neben Widerständen, die bei jeder Frequenz den gleichen Wert haben, gibt es auch frequenzabhängige Bauelemente, die man Kondensator und Spule nennt.

Es gibt einen Spruch, den ich schon seit frühester Jugend kenne: wer misst misst Mist. Einerseits ist da was dran, aber andererseits: wer nicht misst, weiß leider auch nichts!

Messen ist, um das Wort wieder zu gebrauchen, auch eine „Kunst“, will heißen, man muss sehr viele Dinge im Kopf haben und berücksichtigen, um einen validen Messwert zu erhalten. Ein ganz einfaches Beispiel dafür: ich habe eine Spannung von 5 V und zwei in Reihe geschaltete Widerstände von je 10000 k Ω (entspricht 10 M Ω). Ich halte die Messspitzen meines Multimeters an einen der Widerstände. Wir erinnern uns, eine Reihenschaltung ist ein Spannungsteiler, bei zwei gleichen Widerständen teilen wir die Versorgungsspannung durch zwei. 5 V / 2 ergibt 2,5 V. Wir messen aber viel weniger. Warum?¹⁹

Ein zweites Beispiel zeigt, dass es noch eine ganz andere Problematik beim Messen gibt: Toleranzen. Ein Multimeter hat sie, ein Widerstand, ein Kondensator hat sie auch. Leider neigen Toleranzen zu Murphys Prinzip²⁰. Sie fallen immer so aus, dass der größtmögliche Schaden bzw. die größtmögliche Abweichung entsteht.

Ein Widerstand soll 1 k Ω haben, zwei davon in Serie 2 k Ω . Bei einer – erlaubten – Toleranz von 2% schwankt das tatsächliche Ergebnis, das wir mit unserem Multimeter mit, sagen wir, 1% Toleranz +/- 2 Digits²¹, auch nicht exakt ermitteln können, zwischen:

$$1000 - 2\% = 980 \text{ und} \\ 1000 + 2\% = 1020.$$

Nehmen wir wieder 5 V als Spannung an einem Spannungsteiler aus diesen beiden Widerständen an, kann die gemessene Spannung zwischen 2,45 V und 2,55 V oder um 0,1 V variieren. Dabei werden einmal die 980 Ω „unten“ und die 1020 Ω „oben“ angenommen und umgekehrt. Der Strom ist $5 \text{ V} / (980 \text{ } \Omega + 1020 \text{ } \Omega) = 2,5 \text{ mA}$, an dem einen Widerstand fallen $980 \text{ } \Omega * 2,5 \text{ mA} = 2,45 \text{ V}$, am anderen $1020 \text{ } \Omega * 2,5 \text{ mA} = 2,55 \text{ V}$ ab. Wenn die gewünschten 2,5 V mit 100% angenommen werden, dann stellen diese 2,45 V oder 2,55 V schon eine Abweichung von ~6,1% dar.

Gemessen mit dem Multimeter für den Fall 2,45 V ergäbe sich bei 1% Toleranz 2,4255 bis 2,4745. Wegen der nur zwei Stellen hinter dem Komma und der +/- 2 Digits sieht man auf dem Instrument gegebenenfalls 2,41 bis 2,49 V.

Haben beide Widerstände die gleiche Abweichung, also z.B. beide 980 Ω , so stimmt zwar die Spannung, aber der Strom weicht um $(5 \text{ V} / 1960 \text{ } \Omega = \sim 2,551 \text{ mA}; 2,551 \text{ mA} - 2,5 \text{ mA} = 0,051 \text{ mA})$ ~0,051 mA ab.

Wer misst ...

19 Tip: wir messen genau 1,667 V mit einem – normalen – Digitalmultimeter.

20 Eine in der Computerwelt sehr bekannte Sammlung von „Gesetzten“, dessen oberstes lautet: was schief gehen kann, geht schief.

21 Als Digits werden die einzelnen Zahlen einer Anzeige bezeichnet. Die Angabe +/- 2 Digits bezieht sich auf die niederwertigste Stelle. Wird z.B. 1,05 angezeigt, könnte auch 1,03 oder 1,07 richtig sein.

V Jetzt mal digital

Unser Mikrocontroller hat sich bislang nur als USB Spannungsversorgung nützlich gemacht. Das wollen wir ändern!

Aber vorher noch zur Frage, was ein Mikrocontroller ist. Auch hier will ich versuchen, eine einfache, dafür aber auch vereinfachte Antwort zu geben. Wie die CPU eines Computers, besteht das Herz eines Mikrocontrollers aus einer oder mehreren Recheneinheiten. Die können nicht nur alle gängigen Rechenarten wie addieren, multiplizieren usw., sondern auch Speicher verwalten und andere Baugruppen ansteuern. Im Unterschied zu einer Computer CPU verfügt ein Mikrocontroller aber über ganz andere Arten von Baugruppen: Analog-Digitalwandler, GPIOs (siehe unten), Kommunikationsschnittstellen wie UART, SPI, I2C usw.

Wenn ich jetzt den Einwand höre, mein Computer hat aber auch eine UART Schnittstelle, dann ist das berechtigt. Der Unterschied zwischen Mikrocontrollern und Computer CPUs ist eben eher graduell und fließend.

1 Aufbau

Dass wir die Mikrocontroller im Kurs nicht direkt an die Laptops anschließen, macht das Experimentieren entspannter. Nicht auszudenken, wenn wir einen Laptop zerstören würden.

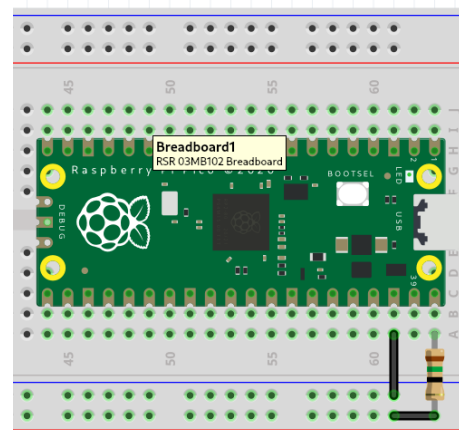
Zu Hause, mit dem eigenen PC oder Laptop, sollte ein USB-Hub mit eigener Stromversorgung Verwendung finden.

Jetzt habe ich noch etwas vergessen: Wir haben ja noch gar nicht gesehen, wie der Pi Pico im Steckbrett angeschlossen wird. Hier ist er mit dem Button nach oben eingesteckt; im Kurs wurde sich dafür entschieden, die Stiftleisten auf die andere Seite zu löten. Das hat den Vorteil, dass man die Pin-Bezeichnungen von oben lesen kann. Leider habe ich kein Bauteil für Fritzing gefunden, das diese Ansicht wiedergibt. Gegebenenfalls muss man beim Bestücken also auf die Spiegelverkehrung achten.

In der Stadtbibliothek werden die Pi Picos physisch an einen Kleinstrechner angeschlossen. Das hat Konsequenzen: Wir können uns nicht mehr direkt mit den Mikrocontrollern bzw. der darauf installierten Software unterhalten (ja, man kann sich mit dieser Software unterhalten, wenn auch nicht wie mit ChatGPT).

Auf dem kleinen Rechner in dem formschönen Gehäuse (einem Raspberry Pi 4) läuft ein Telnet-Server²², den wir über den WLAN Hotspot von den Laptops aus erreichen können. Wer jetzt nur „Bahnhof“ verstanden hat, kann trotzdem

1. sich mit dem WLAN Hotspot biblio verbinden, das Passwort ist im Kurs „biblio123“ (bitte ohne



²² Den Telnet-Server habe ich in Python geschrieben. Er öffnet für jede Client-Verbindung einen seriellen Anschluss (über USB) zu einem der Pi Picos.

Anführungszeichen eingeben).

2. a) ein Konsolenfenster, auch Terminal genannt, öffnen und
telnet 10.42.0.1 50023

eingeben, dabei die Leerzeichen zwischen telnet und der Zahlengruppe 10.42.0.1 und der Nummer 50023 unbedingt mit eingeben²³ oder

2. b) auf den Macbooks eine das Telnet Protokoll unterstützende App öffnen und in der App den Anweisungen folgen. Die IP Adresse ist auch hier 10.42.0.1 und die Portnummer 50023.

Jetzt erscheinen eventuell mehrere Zeilen Text, ungefähr so:

```
[gert@fedora38 ~]$ telnet 10.42.0.1 50023
Trying 2a04:6ec0:20d:9190:6178:f7e7:a79e:9ed1...
Connected to biblio.
Escape character is '^]'.
```

Nun kann man „#<0-9> eintippen (wobei <0-9> bedeutet, eine der Ziffern von 0 bis 9) und ENTER drücken. Der Client wird nun mit dem Pi Pico verbunden, der zu dieser Nummer gehört. Nun erscheint hoffentlich keine Fehlermeldung, sondern der sogenannte Prompt, bestehen aus drei „>“. Die ">>>" sind übrigens die Art der Mikrocontroller-Software (die man Firmware nennt) uns mitzuteilen, das sie gesprächsbereit ist.

Gut, hören kann sie nicht, die Kommandos muss man also eintippen. Aber dann pariert sie, wenn wir nicht etwas für sie unverständliches eingegeben haben, aufs Wort. Probieren wir es aus. Wie es sich gehört, können Computer, auch aller kleinste, gut rechnen:

```
>>> 10+2
12
>>>
Super, ganz schön schlau, wie wäre es mit
```

```
>>> 723938715208356/3
2.413129e+14
>>>
```

Ups, das sieht komisch aus. Ist aber für einen Computer „normal“. Große Zahlen werden in sogenannter wissenschaftlicher Notation angezeigt. Die Ausgabe soll heißen: $2,413129^{14}$ (also gesprochen 2,413129 hoch 14).

Wir können die Firmware sich auch etwas merken lassen, sozusagen für später:

```
>>> x=5
>>> y=2
>>> 10+x-y
13
>>>
```

Und

```
>>> x
5
>>>
```

Klappt prima.

²³ Netzwerktechnik ist nicht Bestandteil des Workshops. Trotzdem sei gesagt, das die 10.42.0.1 die Netzwerk-Adresse unseres Raspberry Pi sind. Die 50023 ist eine sogenannte Portnummer.

2 Micropython

Die Firmware hat auch einen Namen: Micropython²⁴. Das „klitzekleine“ Python ist ein zusammengeschrumpftes großes Python, eine Programmiersprache mit interaktiven Fähigkeiten, die praktisch überall eingesetzt werden kann. Man nennt das Universal-Sprache. Das Schrumpfen ist nötig, weil so ein Mikrocontroller nicht umsonst so heißt. Er hat wenig Speicher und, nah ja, die Geschwindigkeit kann mit einem Python auf einem PC nicht mithalten.

Dafür hat er, was ein PC oder Laptop nicht bietet: GPIO oder general purpose input / output (zu deutsch: universale Ein/Ausgabe) Anschlüsse²⁵. Wir können z.B. unsere LED damit verbinden (unbedingt auch hier über einen Widerstand, sonst geht irgendwas kaputt).

Der eine Draht verbindet die Minus-Schiene mit Masse (-) vom Pi Pico, der andere Draht sind die +5V vom USB Anschluss. Als Kurzschlussschutz ist in die 5V Leitung noch ein kleiner Widerstand eingefügt.

Damit haben wir bislang unsere Experimentierschaltungen mit Spannung versorgt.

3 Programmiersprache?

Wer noch nie oder nur auf Anwendungsebene mit Computern zu tun hatte, wird sich bestimmt fragen, was eigentlich eine Programmiersprache ist. Klar, den Begriff hat jeder schon mal gehört. Aber was bedeutet das genau?

Ein Computer, genauer die CPU (Central Processing Unit) kann eigentlich nur recht wenige, meist einige Hundert, durch eine Zahl ausgedrückte Befehle ausführen. Die werden Opcode (Operational Code) genannt. Für uns Menschen ist es nahezu unmöglich, direkt damit zu arbeiten. Ein Programm, das $10 + 2$ rechnet, könnte dann nämlich etwa so aussehen:

```
47 2 10      # Opcode 47: lade 10 in Register 2
47 3 2       # Opcode 47: lade 2 in Register 3
83 2 3       # Opcode 83: addiere Register 2 und 3, Ergebnis ins Akkumulator Register
```

Der Text hinter # ist ein Kommentar, den der Computer ignoriert. Ich habe ihn eingefügt, damit man zumindest irgendeinen Sinn erkennen kann. Die Opcodes habe ich mir nur ausgedacht. In der Realität sehen sie anders aber ähnlich aus.

Der erste Schritt, um es für Menschen zu erleichtern, war der sogenannte Assembler. Ganz vereinfacht gesagt, stellt er merkbare Kürzel für die Zahlen der Opcodes bereit. Das gleiche Programm (wieder in einem von mir erfundenen Assembler):

```
LOAD 2 10
LOAD 3 2
ADD 2 3
```

²⁴ Wie bekommt man Micropython auf den Pi Pico? Ganz einfach: man lädt Micropython für diesen Controller herunter (eine Datei mit der Endung ".uf2"), schließt ihn an während man den Button drückt und es öffnet sich auf dem Computer ein Laufwerk. Dort hinein kopiert man die Datei. Fertig!

²⁵ Sogar richtig viele: 26

Während man die Zahlen des ersten Beispiels direkt, z.B. über Taster, in die CPU eingeben kann, braucht man für das zweite Beispiel schon ein Programm, den Assembler, der den Text wieder in die erste Form übersetzt.

MERKE: ein Assembler liefert eine Hardware nahe eins zu eins Übersetzung des Programmtextes.

Die „höheren“ Programmiersprachen abstrahieren von dieser Hardware nahen Sicht. Die Addition von $10 + 2$ und die Darstellung des Ergebnisses, wie wir es von unserem Micropython Beispiel kennen, zieht gegebenenfalls hunderte von Maschinenbefehlen nach sich.

Programmiersprachen übersetzen also von Menschen geschriebene Programmtexte nach festen Regeln letztlich wieder in Maschinenbefehle. Das mit den „festen“ Regeln muss man dabei sehr wörtlich verstehen. Schon die kleinste Ungereimtheit lässt eine oder mehrere Fehlermeldungen auftauchen.

Eine Kategorisierung von Programmiersprachen bringt weitere Erkenntnisse. Hier wird nach compilierenden und interpretierenden Sprachen unterteilt und bestimmte Eigenschaften verglichen.

	Interaktiv	Hardware nah	Geschwindigkeit	Turn around²⁶	Mikrocontroller
Compilierende	nein	ja	hoch	hoch	ja
Interpretierende	ja	ja	niedrig	niedrig	jein ²⁷

Was aber ist eine compilierende oder interpretierende Programmiersprache? Meine Antwort vereinfacht dies zwar grob, aber muss hier erst mal reichen. Bei der ersten Variante wird der von Menschen geschriebene Programmtext komplett in Maschinensprache übersetzt und am Stück in den Speicher (hier des Mikrocontrollers) geladen und dann gestartet. Die zweite Form, wie bei Micropython, lädt den menschengeschriebenen Text in den Speicher und übersetzt ihn auf dem Mikrocontroller und führt ihn dann nach Bedarf aus. Außerdem kann ein Benutzer interaktiv Befehle eingeben und erhält Ausgaben.

Eine mögliche weitere Kategorisierung unterscheidet nach der hauptsächlichen Zielsetzung der Programmiersprache.

²⁶ Alle Schritte, die erforderlich sind um einen Programmtext (menschenslesbar) auf dem Zielsystem in maschinenlesbarer Form ausführbar zu machen.

²⁷ Am Beispiel Micropython sieht man einerseits, dass eine Sprache auf einem Mikrocontroller lauffähig ist, andererseits, dass dafür Kompromisse geschlossen werden müssen.

Eigenschaft	C	C++	Basic	Python	Micro-python	Forth	Cobol	C#	Javascript	Java	Rust
Systemprogrammierung	ja	ja				ja					ja
Kaufmännisch							ja				
Universal	ja	ja	ja	ja	ja	jein		ja		ja	ja
Sicherheit											ja
WEB				ja				ja	ja	ja	
OOP ²⁸		ja	ja	ja	ja			ja	ja	ja	jein
Microkontroller	ja	ja	ja		ja	ja					ja
Interaktiv			ja	ja	ja	ja			ja		

Die Liste ist natürlich nicht vollständig. Es gibt buchstäblich hunderte Programmiersprachen. Manche davon sind veraltet, manche, wie etwa Cobol, werden seit über 60 Jahren eingesetzt und immer noch verwendet, weil es Milliarden Codezeilen gibt, deren Wert erhalten werden soll.

4 Unser erstes Programm

Ziel unseres Programms soll es sein, die LED blinken zu lassen. Dazu legen wir vorab fest, dass sie 0,2 Sekunden an und 0,4 Sekunden aus sein soll. Eine solche Festlegung wird Pflichtenheft genannt und dient dazu, nach Fertigstellung des Programms feststellen zu können, ob es auch das tut, was erwartet wird. Das hört sich, gerade für unser simples Beispiel trivial an, ergibt aber bei größeren Projekten sehr viel Sinn.

Frage: Was fehlt in unserem Pflichtenheft?²⁹

Micropython stellt einen Befehl bereit, mit dem man einen der Anschlüsse als Ausgang definieren kann: `machine.Pin(13, machine.Pin.OUT)`. Das möchte ich genauer erklären. „machine“³⁰ nennt sich ein Modul³¹, das Micropython für maschinennahe Aufgaben bereitstellt. Es enthält u.a. „Pin“, mit dem man die Nummer des Anschlusses (hier 13) und die Beschaltung des GPIO per Software wahlweise auf Ausgang und Eingang stellen kann (`machine.Pin.OUT`). Der Befehl gibt etwas zurück, das ich einer Variablen zuweisen kann. Wir erinnern uns: `x = 5`. Da wurde die Fünf an `x` zugewiesen.

Unsere erste Programmzeile heißt also:

```
pin13 = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT)
```

Der Name `pin13` hilft uns, sich daran zu erinnern, wozu er gut ist. Sprechende Namen sind das A und O bei der Programmierung.

Geben wir das hinter den drei `>` ein, scheint erst mal nichts zu passieren, außer das der Prompt wieder angezeigt wird. Es darf aber auch keine Fehlermeldung erscheinen. Dann hat man sich vermutlich vertippt.

²⁸ OOP (Objekt Orientierte Programmierung) wird später ein wenig erklärt.

²⁹ Antwort: wie lange soll sie blinken?

³⁰ Die Befehle und andere Namen sind alle auf englisch. Daher `machine` und nicht `Maschine`.

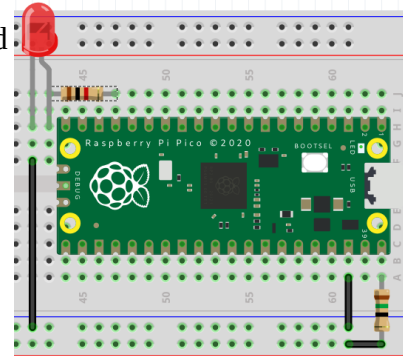
³¹ Ein Modul enthält eine Sammlung von zusammengehörigem Programmcode.

Wir geben nun zu Kontrolle pin13 ein und erhalten als Ausgabe:

```
Pin(GPIO13, mode=OUT)
```

Das sieht gut aus! Jetzt haben wir aber vergessen, unser Steckbrett zu füllen:

Wie im Bild muss die LED an Masse und über einen Widerstand an Pin 13 gelegt werden. Wegen des umgekehrten Anlötens der Stiftleisten muss das ev. spiegelverkehrt erfolgen.



Weiter geht es mit unserem Programm. Wir probieren erst mal aus, ob wir die LED zum leuchten bringen können.

```
pin13.on()
```

erledigt das. Ausschalten geht mit

```
pin13.off()
```

Was jetzt noch fehlt, ist das Wiederholen von Befehlen. Alle Programmiersprachen kennen dafür sogenannte Schleifen. In Micropython sieht das so aus:

```
while True:32  
    <Befehl>33
```

Die Einrückung ist ganz wichtig. Im Gegensatz zu vielen anderen Sprachen, die meist irgendwelche Klammern benötigen, erkennt Micropython durch die Einrückung, dass <Befehl> zu „while True“ gehört. Die Einrückung besteht dabei immer aus 4 Leerzeichen. Unser Micropython hilft aber bei der Eingabe. Es erkennt, dass nach dem Doppelpunkt eine Einrückung erfolgen muss und ändert seinen Prompt von ">>>" auf drei Punkte und rückt vier Leerzeichen ein. Das sieht dann so aus:

```
>>> while True:  
...     pin13.on()
```

Wollen wir die Einrückung beenden drücken wir erst die Rück-Taste (Back-Space) und dann ENTER. Da dann unsere Schleife gestartet wird, erscheint kein Prompt. Um weitermachen zu können, brechen wir das Programm mit ^C (Ctrl-C) ab. Wir unternehmen noch einen anderen Versuch und lernen dabei etwas über Variablen und Ausgaben.

```
>>> a=0  
>>> while True:  
...     print("a=", a)  
...     a += 1
```

```
...  
a= 0  
a= 1  
a= 2  
a= 3
```

Wieder brechen wir die Schleife ab. Was ist zu sehen? Wir haben eine Variable a auf 0 gesetzt. In der Schleife wird mit print (engl. Drucken) ein Text („a=“) aus und dahinter noch die Variable „a“, genauer, den Inhalt der Variablen. Dann erhöhen wir den Wert um 1. Micropython kennt dafür den eleganten Operator +=. Stattdessen könnten wir auch schreiben:

```
a = a + 1
```

Leerzeichen in einer Zeile dürfen beliebig auftauchen. $a=a+1$ ist dasselbe wie $a = a + 1$

32 Was genau das macht und funktioniert, erfahren wir später.

33 Die spitzen Klammern werden benutzt, um einen Platzhalter zu kennzeichnen. Also nicht das Wort „Befehl“, sondern beliebige Befehle an dieser Stelle.

Jetzt können wir – fast – unser Programm schreiben. Es fehlt uns noch die Möglichkeit, Zeiten zu berücksichtigen. Micropython besitzt ein Modul `time`, das den Befehl `sleep` enthält; der macht genau das: Das Programm schläft und zwar solange, wie man das in runden Klammern hinter `sleep()` in Sekunden einträgt. Noch eine Kleinigkeit muss berücksichtigt werden. Das Modul `time` muss von Micropython noch geladen werden. Das geschieht über „import“. Der Grund dafür ist, dass es erstens sehr viele Module gibt (die man sich mit dem Befehl `help(,modules‘)` anschauen kann), die aber zweitens nicht immer benötigt werden, aber beim Laden Speicher verbrauchen würden³⁴ – und der ist kostbar!

Jetzt aber:

```
import time # lade Modul time
pin13 = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT) # erzeuge pin13 so, das es einen Ausgang (OUT) darstellt
while True: # Schleife
    pin13.on() # LED an
    time.sleep(0.2) # 0,2 Sekunden warten
    pin13.off() # LED aus
    time.sleep(0.4) # 0,4 Sekunden warten
                # wieder oben beginnen
```

Und schon geht's los...

Vom REPL

Micropython und auch seine Mutter Python verfügen über einen interaktiven Modus. Der nennt sich REPL (Read-Eval-Print-Loop, zu deutsch: Lesen-Ausführen-Ausgeben-Schleife) und erlaubt uns, wie wir ja schon gesehen haben, Befehle direkt einzugeben und sofort Antworten zu erhalten, um danach gleich wieder einen Befehl eingeben zu können.

Unser kleines Blink-Programm startet nun aus dem REPL, aber dann kann man keine neuen Befehle mehr eingeben. Das Programm läuft ja jetzt und blockiert dadurch die Eingabe. Ausgaben aus dem Programm sind aber durchaus möglich, was wir auch schon gesehen haben (`a= 0, a= 1 ...`).

Den Abbruch des Programm durch `Ctrl-C` (auf deutschen Tastaturen sind die `Ctrl` Tasten mit `Strg` bezeichnet und auf dem Mac mit `ctrl` oder `^`) haben wir auch schon ausprobiert. Daneben gibt es in Micropython noch weitere sehr nützlich Tastenkombinationen für den REPL. Drücken wir z.B. `Ctrl-E`, so antwortet es mit: „paste mode; `Ctrl-C` to cancel, `Ctrl-D` to finish“ (deutsch: Einfügemodus; `Ctrl-C` zum Abbrechen, `Ctrl-D` zum Beenden) und zeigt uns einen neuen Prompt mit drei `=`. Jetzt können wir fast beliebig langen Text mit Cut & Paste hinein kopieren. Wir schreiben unser Programm, gerade wenn es etwas länger wird, nämlich lieber nicht direkt auf dem Mikrocontroller, sondern in einem Editor. Das bringt den Vorteil mit sich, dass wir es auf dem Rechner sichern, an andere weitergeben und es beliebig ändern können.³⁵

Übung: wir schreiben das Blink-Programm in einem Editor, speichern es ab und kopieren dann den gesamt Text mit `Ctrl-A` (alles markieren) und `Ctrl-C` (alles kopieren). Wie man sehen kann, bedeuten Tastenkürzel nicht immer und überall das gleiche. Jetzt wechseln wir in unsere Telnet-

³⁴ Beim Start von Micropython werden auf dem Pi Pico dennoch zwei Module sofort geladen: `machine` und `rp2`, wobei letzteres Pi Pico spezielle Befehle enthält.

³⁵ Zu Hause können wir auch Programme wie Mu oder Thonny nutzen, die einen Editor mit einer Ankopplung des Pi Pico verbinden.

Konsole und, nachdem wir sichergestellt haben, dass wir uns im Einfügemodus (Paste mode) befinden, drücken wir Shift-Ctrl-V³⁶ (also die Großumschalttaste gleichzeitig mit der Ctrl und der „v“ Taste). Abschließend drücken wir noch Ctrl-D. Das Programm läuft sofort los, die LED blinkt (wenn wir alles richtig gemacht haben).

Der REPL hält noch mehr Schmankerl für uns bereit. Mit den Pfeiltasten kann ich mich in einer Eingabezeile nach links und rechts bewegen, die Entfernen- oder Rücktaste löschen unter oder vor dem Cursor, mit Ctrl-A und E springe ich an den Anfang oder das Ende der Zeile.

Als wenn das nicht genug wäre, kann ich mich mit der Pfeil oben oder unten Taste durch die Eingabehistorie bewegen und mit der TAB Taste Eingaben vervollständigen.

Sogar den Mikrocontroller zurücksetzen geht: Ctrl-D (bei Anzeige des normalen Prompts) startet einen „Soft-Reset“.

Übung: auf dem Mikrocontroller geben wir im REPL ein „m“ ein und drücken die TAB Taste. Wenn das Wort „machine“ erscheint, ergänzen wir einen Punkt und drücken erneut TAB.

5 Exkurs: Objekte

Micropython ist eine objektorientierte Sprache. Obwohl wir hier keine Einführung in die OOP (Objekt Orientierte Programmierung) machen können und wollen, dient es dem besseren Verständnis solcher Befehle wie „pin13 = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT)“, wenn wir eine Vorstellung davon entwickeln, was mit einem „Objekt“ gemeint ist.

Was müssen wir uns unter einem Objekt vorstellen? Formal repräsentiert ein Objekt die Instanz einer Klasse... Nein, das versteht auf Anhieb niemand. Vielleicht so: ein Objekt enthält Daten und Methoden, das sind, vereinfacht, Befehle. Unser machine.Pin() gab etwas zurück, das wir jetzt als Objekt identifizieren können. Die Daten darin bestanden aus der Nummer des Anschlusses für die LED, der Betriebsart des Anschlusses (hier: Ausgang). Die Methoden waren on() und off(). Würden wir mit pin12 = machine.Pin(12, machine.Pin.OUT) ein neues Objekt erzeugen, könnten wir diesmal eine LED an Anschluss 12 anstecken und die LEDs unabhängig voneinander ein- und ausschalten: pin12.on()

Warum benütze ich den Begriff Methode? Erstmal, weil diese Bezeichnung in der Informatik im Zusammenhang mit OOP so verwendet wird und zweitens war die Nutzung des Wortes „Befehl“ nicht ganz korrekt. Genau genommen müssen wir zwischen Befehl (engl. statement) und Funktions- bzw. Methodenaufruf unterscheiden. Ja, man kommt ein bisschen von Hölzchen auf Stöckchen. Dennoch, diese Unterscheidungen sind nicht ganz unwichtig. Ein Befehl ist fest in die Programmiersprache eingebaut, er kann nicht ersetzt oder geändert werden; eine Funktion oder Methode schon.

36 Auf dem Mac ist das wohl cmd+v

6 DEFInieren wir etwas

Jede Programmiersprache, die ich kenne³⁷, verfügt über die Möglichkeit, strukturierten Code zu schreiben. Das bedeutet nichts anderes, als bestimmte Teile der Programmlogik in kleinere, wiederverwendbare Einheiten auszulagern. Meistens heißen diese ausgelagerten Teile dann „Funktion“³⁸ (in Anlehnung an mathematische Funktionen wie $f(x) = 1 / \sin(x)$). Die Schreibweise <Funktionsname>([<Parameter1>, <Parametern>,...]) hat man von da übernommen.

In Micropython schreibt man:

```
def <Name>(<kein, ein oder viele Parameter>):  
    <Inhalt der Funktion, das, was sie tun soll>
```

Dabei ist def ein reserviertes Wort, der Name frei wählbar³⁹ und die Parameter werden jetzt erklärt. Am besten an einem sehr einfachen und daher sinnfreien Beispiel. Ich möchte zwei Zahlen addieren und das Ergebnis ausgeben:

```
def addiere(x, y):  
    print(x + y)
```

„x“ und „y“ sind die Parameter. Ich kann diese Funktion nun an beliebiger Stelle in meinem Programm aufrufen. Nun übergebe ich der Funktion „Argumente“⁴⁰:

```
addiere(20, 42)
```

und sie gibt 62 aus. Warum „sinnfrei“? Weil print(20 + 42) dieselbe Ausgabe produziert.

7 Blinken in strukturiert

Wir legen direkt los und schreiben in unserem Editor das erste Blinkprogramm um und speichern es unter einem neuen Namen. Es sollte jetzt so aussehen:

```
import time # lade Modul time  
  
pin13 = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT) # erzeuge pin13 so, das es einen Ausgang (OUT) darstellt  
  
def blink(pin):  
    while True: # Schleife  
        pin.on() # LED an  
        time.sleep(0.2) # 0,2 Sekunden warten  
        pin.off() # LED aus  
        time.sleep(0.4) # 0,4 Sekunden warten  
        # wieder oben beginnen  
  
blink(pin13)
```

Wir gehen Zeile für Zeile durch. Den Import kennen wir schon. Auch die Erzeugung des Pin Objektes hat sich nicht geändert. Nun kommt unsere Funktionsdefinition für „blink“; sie hat einen Parameter „pin“. Auch der Schleifenbeginn bleibt unverändert. Nun wird pin.on() aufgerufen. Wir richten unseren Blick auf die letzte Zeile: dort können wir sehen, dass pin13 an blink() übergeben wird. In der Funktion wird unter dem Namen „pin“ nun „pin13“ verwendet. Durch diesen Trick kann man blink() für jeden Pin verwenden.

37 Bis auf Basic, zumindest Versionen aus den 70er und 80er Jahren. Die kannten nur Sprunganweisungen, das benötigte GOTO.

38 Oder eben Methode, wenn sie zu Objekten gehören.

39 In Grenzen: keine führenden Zahlen und kein + oder -, außerdem sind noch andere Sonderzeichen verboten.

40 Die ersetzen im Rumpf der Funktion den Parameter „x“ durch 20 und den Parameter „y“ durch 42.

8 Eine Verkehrsampel

Wir brauchen ein Pflichtenheft. In welcher Reihenfolge werden die Lampen der Ampel geschaltet? Welche gehen gemeinsam an oder aus? Haben wir das geklärt, müssen wir die Zeiten für die Ampelphasen festlegen, möglichst flexibel, damit im Berufsverkehr die Grün-Phase etwas länger werden darf.

Für die Phasenwechsel machen wir uns eine Tabelle:

	Rot-Phase	Rot->Grün-Phase	Grün-Phase	Grün->Rot-Phase
Rot	an	an	aus	aus
Gelb	aus	an	aus	an
Grün	aus	aus	an	aus

Als Autofahrer hatte ich das so verinnerlicht, dass ich tatsächlich an einer Ampel bewusst darauf achten musste!

Normalerweise sind die Rot- und Grünphase lang, die Übergänge kurz. Wir brauchen also mindestens zwei Zeiten, die wir einstellen können.

Die drei Lampen / LED werden von drei Anschlüssen des Mikrocontrollers angesteuert. Wir nehmen Pin 13, 12 und 11:

```
pin11 = machine.Pin(11, machine.Pin.OUT)
pin12 = machine.Pin(12, machine.Pin.OUT)
pin13 = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT)
```

Das kann man so machen, aber ist das klug? Wir wollen eine Ampel programmieren, wäre da nicht

```
gruen = machine.Pin(11, machine.Pin.OUT)
gelb = machine.Pin(12, machine.Pin.OUT)
rot = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT)
```

viel besser?

Jetzt müssen wir uns die Programmlogik überlegen. Nach der Tabelle müssen je ein bis zwei Lampen eingeschaltet und die anderen ausgeschaltet werden, dann muss gewartet werden bis es mit dem nächsten Schritt weitergeht. Hier ein Vorschlag⁴¹:

```
import time

gruen = machine.Pin(11, machine.Pin.OUT)
gelb = machine.Pin(12, machine.Pin.OUT)
rot = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT)

dauer_rot_gruen = 10
dauer_wechsel = 2

while True: # unsere Ampel läuft für immer
    # Rot-Phase
    rot.on()
    gelb.off()
    gruen.off()
    time.sleep(dauer_rot_gruen)
    # Rot->Grün-Phase
```

41 Ein wichtiger Hinweis: Micropython mag Umlaute nicht so richtig. Deshalb heißt die Variable „gruen“ und nicht „grün“.

```

gelb.on()
time.sleep(dauer_wechsel)
# Grün-Phase
rot.off()
gelb.off()
gruen.on()
time.sleep(dauer_rot_gruen)
# Grün->Rot-Phase
gruen.off()
gelb.on()
time.sleep(dauer_wechsel)
# wieder von vorn

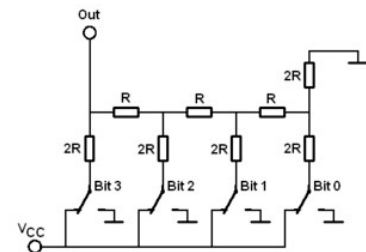
```

9 PWM

Im ersten Teil, als wir die LED analog betrieben haben, konnten wir durch die Wahl des Widerstandswertes oder durch die Ansteuerung des Transistors ihre Helligkeit steuern.

Können wir das auch „digital“ erreichen?

Eine erste Herangehensweise könnte sein, einen DAC (digital analog converter) zu benutzen. Viele Mikrocontroller haben so etwas eingebaut; der Pi Pico nicht. Man kann sich einen einfachen DAC auch selber aus Widerständen aufbauen, ein sogenanntes Widerstandsnetzwerk. Wie im Bild zu sehen, hat es digitale Eingänge (Bit0 bis Bit3), die hier durch Schalter realisiert werden; es können aber auch die Ausgänge eines Mikrocontrollers sein. Durch die Bemessung der Widerstände ergibt sich, dass jede Erhöhung der 4 Bit Zahl um 1 einen kleinen Sprung zu einer höheren Spannung am Ausgang ergibt. Es wäre also durchaus möglich, hier eine LED anzuschließen. Drei Nachteile ergeben sich für unsere Helligkeitssteuerung:



1. wir haben nur 16 Stufen (4 Bit),
2. da die Kennlinie der LED nicht-linear ist, wird im unteren Spannungsbereich die LED dunkel bleiben und im oberen Bereich werden die Helligkeitssprünge sehr groß sein.
3. Die meisten DACs und auch unser Widerstandsnetzwerk sind „hochohmig“⁴²; der LED Strom müsste also erst mal analog verstärkt werden, was zusätzliche Bauteile braucht.

Es gibt zum Glück eine Lösung, die nicht nur ohne zusätzliche Bauteile auskommt, eine hohe Auflösung bietet und – am wichtigsten – eine proportionale Helligkeitssteuerung gestattet. Das zu Grunde liegende Prinzip sieht so aus: eine Spannung von 0 V lässt *keinen* Strom durch die LED fließen, eine Spannung von 3,3⁴³ V mit entsprechendem Widerstand lässt den maximalen Strom fließen. Schalte ich nun die Spannung im Wechsel gleichlang ein- und aus, fließt zeitlich gesehen nur der halbe Strom. 50% ist die LED an, 50% ist sie aus. Wenn ich das nur schnell genug tue, sieht unser träges Auge keine Schaltvorgänge mehr, sondern nur noch eine halb so helle LED.

Eine solche Betriebsart nennt sich PWM (Puls-Weiten-Modulation). Man findet auch Begriffe wie Puls-Dauer-Modulation, Puls-Längen-Modulation oder Puls-Breiten-Modulation, gemeint ist immer dasselbe. Oben hatte ich 50% gewählt, aber es geht natürlich jedes Verhältnis von 0% bis 100%.

⁴² Auf das Thema Innenwiderstand / Impedanz gehe ich später ein.

⁴³ Wir haben noch nicht besprochen, dass der Pi Pico intern mit 3,3 V arbeitet, an den GPIOs also 3,3 V herauskommen.

Das wollen wir nun programmieren! Aber uns fehlt noch Programmierwissen, um diese Aufgabe zu lösen. Also erst mal ein kleiner Exkurs.

Bedingungen

Bislang waren unsere Programme linear; allerdings hatten wir durch „while True:“ schon eine Entscheidung, ohne es näher zu erläutern. „True“ ist in Micropython die Konstante für „wahr“ („False“ die für falsch). Der Befehl „while“ (solange) bildet eine Schleife, die erst endet, wenn der Ausdruck⁴⁴ dahinter „falsch“ wird. Bei „True“ tritt das natürlich nie ein. Wenn wir schreiben würden:

```
n = 0
while n < 3: # n kleiner 3
    n += 1   # n um eins erhöhen
    print(n)
```

erhielten wir die Ausgabe

```
1
2
3
```

Und dann würde die Schleife beendet sein.

Ein anderes Bedingungs-Statement nennt sich „if“ (wenn). Auch „if“ erwartet einen Ausdruck hinter sich, dessen Auswertung darüber bestimmt, ob die eingerückten Zeilen dahinter ausgeführt werden oder nicht. Eine oft verwendete zweite Form heißt

```
if <Ausdruck>: ... else: ...
```

Hier wird hinter „else“ (sonst) ausgeführt, wenn der Ausdruck „falsch“ ist.

MERKE: erst Bedingungen machen Programmierung sinnvoll, da sie Verzweigungen des Programmflusses ermöglichen. Sonst müsste ein Programm immer dasselbe machen, unabhängig von z.B. Benutzereingaben.

Ein PWM Programm

Wie schon gewohnt, brauchen wir zuerst ein Pflichtenheft. Damit die Auswirkung des Puls-Pause-Verhältnisses sichtbar wird, wollen wir den Duty (der Teil des PWM Signals, bei dem die LED eingeschaltet ist) innerhalb von 2 Sekunden von 0% bis 100% steigern und dann wieder in 2 Sekunden von 100% bis 0% vermindern. Die Änderung soll dabei in 1% Schritten erfolgen und die Änderungsgeschwindigkeit infolgedessen 2 Sekunden / 101 Stufen⁴⁵ = ~0,0198 Sekunden betragen. Anders ausgedrückt: alle ca. 20 ms muss der Duty erhöht oder vermindert werden.

Wir haben jetzt zwei Größen, die sich ändern müssen: den Duty (0% bis 100%) und eine Variable, die entscheidet, ob sich der Duty verändern muss. Wir nennen sie „duty“ und „interval“; beide setzen wir zunächst auf Null. Die Variable „cycle“ erhält den Wert 10000 (µs). „duty“ wird immer um 100 verändert, damit es zur Einheit µs passt. Ein Zyklus besteht immer aus der Länge Duty und der Länge, in der die LED aus ist; beide zusammen sollen aber immer gleich lang bleiben. Daher berechnen wir die Auszeit der LED zu cycle – duty. Damit die LED nicht flackert, wählen wir für die Zykluszeit 10 ms (100 Hz).

⁴⁴ Alles, was sich im weitesten Sinne berechnen lässt, ist ein Ausdruck. Ob in Python das Ergebnis wahr oder falsch ist, entscheidet sich nach der Regel: False oder 0 ist falsch, alles andere richtig.

⁴⁵ 0% ist Stufe 1, 100% ist Stufe 101

Warum benutzen wir jetzt μs ? Unsere `sleep()` Funktion kommt zwar mit Gleitkommazahlen zurecht, beim experimentieren zu Hause fiel dann aber auf, dass sie bei kleineren Werten schlampt: die Auflösung ist höchstens 1 ms; das reicht bei 100 Hz und 1% Schritten nicht aus.

Micropython stellt als Alternative die Funktion `sleep_us()` bereit. Sie benötigt als Argument eine Ganzzahl, die μs entspricht.

Wie gewohnt brauchen wir wieder eine Endlosschleife. Darin müssen wir

1. die LED einschalten
2. die duty Zeit warten
3. die LED ausschalten
4. die cycle – duty Zeit warten
5. nur dann die duty Zeit ändern, wenn 20 ms vorüber sind
6. entscheiden, ob die Duty Zeit erhöht oder erniedrigt werden muss

Die Variablen „up“ und „step“ bedürfen auch noch der Erläuterung. Mit „step“ legen wir die Schrittgröße der Variablen „duty“ fest; „up“ dagegen bestimmt die Richtung.⁴⁶

```
import time
led = machine.Pin(13, machine.Pin.OUT) #
cycle = 10000
interval = 0
step = 100
duty = 0
up = step

while True:
    led.on()
    time.sleep_us(duty)           # LED an für duty  $\mu\text{s}$ 
    led.off()
    time.sleep_us(cycle - duty)  # LED aus für cycle - duty  $\mu\text{s}$ 
    interval += 1
    if interval >= 2:
        interval = 0
        duty += up               # up ist entweder 100 oder -100
        if up > 0:              # wenn up positiv ist
            if duty >= cycle:   # und duty größer gleich cycle ist
                up = step * -1  # Richtung auf abwärts
            else:               # sonst:
                if duty <= 0:   # wenn duty kleiner gleich 0
                    up = step   # Richtung auf aufwärts
```

Das muss man erst mal sacken lassen!

Ein zweites PWM Programm

Wir haben die Möglichkeiten unseres Mikrocontrollers noch nicht ausgereizt. Die PWM „zu Fuß“ funktioniert zwar einwandfrei, aber unser Mikrocontroller und Micropython stellen eine viel elegantere Lösung zur Verfügung. Im Modul „machine“ schlummert eine Klasse⁴⁷ PWM, die auf interne Fähigkeiten des Mikrocontrollers zugreift, also eine Hardware gestützte PWM.

```
led = machine.PWM(machine.Pin(13)) # PWM Instanz für LED erzeugen
led.freq(100)                     # PWM Frequenz auf 100 Hz
led.duty_ns(0)                    # Duty auf 0
```

46 Wir hätten statt `step` und `up` auch nur `up` verwenden können, müssten dann aber, wenn sich der Step-Wert ändert, an mehreren Stellen im Programm diesen Wert einsetzen. Ein „vorprogrammierter“ Fehler!

47 Die „Klasse“ gehört zur OOP und ist die Blaupause für ein Objekt.

Mit der Methode `duty_ns()` kann der Duty in Nanosekunden eingestellt werden! Allerdings gab es bei mir zu Hause Einschränkungen: bei 100 Hz funktionierte es erst ab ca. 80 ns. Wenn ich die Frequenz erhöhte, gingen auch kleinere Werte.

MERKE: viele Funktionen eines Mikrocontrollers haben Limitierungen (nach oben und unten!), die nicht beim Aufruf der Funktionen mit bestimmten Argumenten abgefangen werden! Wenn also etwas ohne Fehlermeldung startet, kann das Ergebnis doch falsch sein.

```
import time

led = machine.PWM(machine.Pin(13))
led.freq(100)
led.duty_ns(0)

duty = 0
cycle = 10_000_000 # 10 Millionen ns = 10 ms; man beachte die _ in der Zahl: sie machen sie lesbarer
step = 100_000 # 100000 ns = 0,1 ms
up = step
interval = 0

while True:
    led.duty_ns(duty)
    time.sleep_us(10000)
    interval += 1
    if interval >= 2:
        interval = 0
        duty += up
        if up > 0:
            if duty >= cycle:
                up = step * -1
            else:
                if duty <= 0:
                    up = step
```

Ich habe das Programm auf die Schnelle umgeändert, so dass es die neue Methode `duty_ns()` nutzt. Dafür habe ich die Werte der Variablenwerte angepasst und die nicht mehr benötigten Zeilen (anschalten, warten, ausschalten, warten) entfernt. Das ist ein durchaus übliches Verfahren. Dabei entstehen aber sogenannte technische Schulden. Was bedeutet das? Obwohl ich nur noch einen Wert, den Duty, ändern muss, verändere ich auch noch „interval“ und frage es mit „if“ ab. Das macht mein Programm unnötig kompliziert. Bei der nächsten Änderung denke ich vielleicht nicht mehr daran und schreibe weitere Codezeilen drumherum. Der Kern der Programmlogik wird immer weniger erkennbar!

Wir erinnern uns: „interval“ hatte die Funktion, die Änderungsgeschwindigkeit einzustellen, also wie schnell wird die LED heller und wieder dunkler. Zwei Schleifendurchläufe lang war die Wartezeit. Wenn wir im Pflichtenheft festgelegt hätten, dass die Geschwindigkeit 0,5 Sekunden betragen soll, wäre das mit unserer Programmlogik nicht möglich gewesen. Die höchste Änderungsgeschwindigkeit war nämlich 1 Sekunde. Warum?

Die Zykluszeit der PWM in dieser Programmversion wird aber nicht mehr von einer Wartezeit in der Endlosschleife bestimmt. Wie oft wir den Duty ändern, können wir direkt einstellen:

```
while True:
    led.duty_ns(duty)
    time.sleep_us(19800) # solange warten wir, bis zur nächsten Änderung; hier 19,8 ms
    duty += up
    if up > 0:
```

```
    if duty >= cycle:  
        up = step * -1  
else:  
    if duty <= 0:  
        up = step
```

VI Wechselfspannung in der Elektronik

Bevor wir zu Programmierexperten werden, tauchen wir nochmal in die weite analoge Welt ein. Einige geheimnisvolle Bereiche der Elektronik habe ich weiter oben schon angedeutet. Die sollen jetzt vertieft werden.

1 Impedanz

Wenn ich mir Lautsprecher kaufe, fällt vom Fachhändler schon mal die Bemerkung, dass ihre Impedanz 8 Ohm sei. Als neugieriger Mensch wüsste ich nun gerne, was es damit auf sich hat.

Vereinfacht findet sich in einem Lautsprecher ein Magnet, eine Spule und daran befestigt die Lautsprechermembrane. Wird die nach vorn und hinten bewegt, staucht sie die Luft zusammen und es entstehen Schallwellen. Das ist ein ganz anderes Thema...

Die Energie, die dazu nötig ist, liefert ein elektrischer Strom. Er fließt durch die Spule, erzeugt darin ein Magnetfeld⁴⁸, das mit dem des Magneten interagiert. Unser Drehspulinstrument funktioniert ganz ähnlich, nur, dass hier ein Zeiger die Stärke des Magnetfeldes bzw. des Stroms durch die Spule anzeigt.

Um Musik zu hören, brauchen wir einen Verstärker. Der liefert den Strom, der durch die Lautsprecherspule fließt. Es handelt sich um einen Wechselstrom, der mal positiv und mal negativ wird. Die Geschwindigkeit der Änderung nehmen wir als Tonhöhe, die Größe, man sagt auch Amplitude, als Lautstärke wahr.

Welchen Widerstand hat die Spule? Ich habe mal mein Kapazitäts- und Spulenmessgerät an meine Wohnzimmerlautsprecher gehalten: 4,5 Ω und 15,4 μH . Der Ohm Wert sollte klar sein; was heißt μH ? Das ist die physikalische Größe „Induktivität“ mit der Einheit „Henry“ (nach dem Physiker J. Henry). Haben Induktivitäten / Spulen *zwei* Werte?

Spulen lassen sich nicht „ideal“ herstellen; sie bestehen meist aus einem Kupferdraht. Der hat einen Widerstand, der aber für die Spule gar nicht erwünscht ist.

Nur der Induktivitätswert lässt den Lautsprecher funktionieren; der Ohm Wert macht ihn nur zu einer Heizung. Denn ein Strom durch einen Widerstand erzeugt Wärme. Das durch die Induktivität erzeugte Magnetfeld aber ist dafür verantwortlich, dass sich die Lautsprechermembrane bewegt und Töne erzeugt.

Induktivitäten haben die Eigenschaft, für tiefe Frequenzen einen niedrigen, für hohe Frequenzen einen hohen Widerstand aufzuweisen. Den ohmschen Widerstand muss man sich dabei in Reihe geschaltet vorstellen. In Lautsprecherboxen gibt es häufig sogenannte Frequenzweichen, die für die oft drei Lautsprecher Bass, Mitten, Höhen, den Verstärkerstrom aufteilen. Dazu verwendet man Spulen und Kondensatoren. Letztere stellen sozusagen die Umkehrung der Spule dar: ihr Widerstand nimmt bei hohen Frequenzen ab und bei niedrigen zu.

⁴⁸ Warum ein Magnetfeld entsteht, was genau das ist usw. kann hier nur mit einem Verweis auf das Internet oder ein passendes Buch aus der Stadtbibliothek beantwortet werden.

Kondensatoren kann man „perfekter“ herstellen als Spulen; sie haben oft nur winzige ohmsche Widerstände, dafür aber leider manchmal einen induktiven Anteil und einen - parallelen - Widerstand.

Beide Bauteile zusammen oder auch einzeln stecken in fast jeder Schaltung.

MERKE: Impedanz bezeichnet den Widerstand, der sich aus den Teilen ohmscher Widerstand, Induktivität und Kapazität zusammensetzt. Dabei sind diese Teile nicht einfach alle in Reihe oder Parallel geschaltet, sondern eine Mischung aus beidem.

2 Innenwiderstand

Ein weiteres Begriff, der immer wieder auftaucht, aber oft nicht erklärt wird, ist der Innenwiderstand. Eigentlich wird durch diesen Namen schon angedeutet, worum es geht: ein Widerstand, der sich „innen“ befindet. Nehmen wir als Beispiel eine Batterie, einen 9 V Block. Die Spannung ist aufgedruckt, ebenso wo Plus und Minus sitzen.

Jetzt messe ich die Spannung an der Batterie und lege dann einen Widerstand von 100 Ω an die Kontakte. Zwei Dinge fallen auf: die Batterie hat gar nicht 9 V sondern ca. 9,4 V und die Spannung sinkt massiv, wenn die Anschlüsse des Widerstandes die Kontakte berühren; bei meiner Messung auf ca. 8,8 V. Nehme ich den Widerstand weg, steigt die Batteriespannung wieder auf 9,4 V. Nach unserer Formel $U / R = I$ würden wir erwarten, dass $9,4 \text{ V} / 100 \Omega = 94 \text{ mA}$ fließen. Es sind aber nur etwa 82 mA.

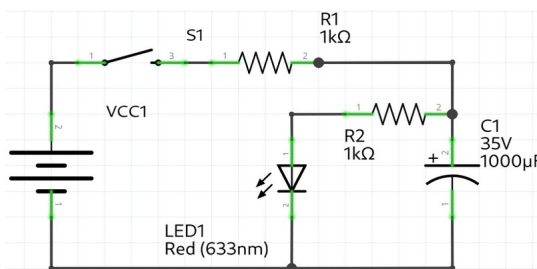
Die unerwartet höhere Spannung resultiert aus dem inneren Aufbau der Batterie, in der ein chemischer Prozess die elektrische Energie freisetzt. Das absinken der Spannung unter Last aber ist dem inneren Widerstand der Batterie geschuldet. Man kann sich, und das wird im folgenden noch häufiger so sein, die Batterie als ideale Spannungsquelle mit einem in Serie geschalteten Widerstand vorstellen. Wir können dessen Größe sogar bestimmen: $9,4 \text{ V} - 8,8 \text{ V} = 0,6 \text{ V}$, bei einem Strom von 82 mA ergeben sich $\sim 7,3 \Omega$.

Bezugnehmend auf das vorige Kapitel müssen wir noch festhalten, dass der Innenwiderstand auch eine Impedanz sein kann, also nicht rein ohmsch.

3 Kondensatoren & Spulen

Wir wollen uns nun näher mit den elektrischen Eigenschaften von Kondensatoren und Spulen⁴⁹

beschäftigen. Ihre Beschreibung als frequenzabhängige Widerstände reicht aber für das Verstehen ihres Verhaltens in Schaltungen nicht aus. Beide, Spulen und Kondensatoren, sind nämlich auch Energiespeicher. Wir bauen eine Schaltung auf, um das näher zu untersuchen.



⁴⁹ Kondensatoren, auch Kapazitäten genannt, werden in Farad (nach dem Physiker M. Faraday), Spulen in Henry gemessen. 1 F oder 1 H sind allerdings sehr, sehr groß!

Statt der Batterie nehmen wir wieder unsere 5 V aus dem USB Anschluss. Den Schalter S_1 ersetzen wir durch einen Verbindungsdraht.

Schließen wir den Stromkreis, leuchtet die LED auf. Wer sehr genau hinschaut, kann sehen, dass sie nicht sofort die volle Helligkeit erreicht. Öffnen wir nun den Stromkreis. Die LED leuchtet eine Weile weiter!

Da keine Verbindung zur Spannungsquelle mehr besteht, muss die dafür nötige Energie aus dem Kondensator kommen.

Ein ähnlich einfaches Experiment mit einer Spule ist leider schwieriger aufzubauen. Man braucht einen sehr hohen Induktivitätswert und muss die LED umdrehen. Auch die Spule speichert Energie. Sie gibt sie aber erst wieder ab, wenn die Versorgungsspannung abgeschaltet wird. Dann ist erkennbar, dass die LED kurz aufleuchtet.

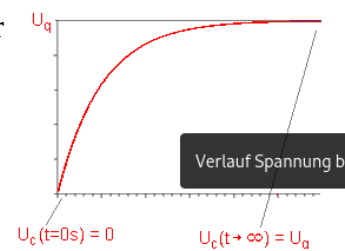
Es gibt Unterschiede zwischen Kondensator und Spule.

1. Kondensator: Beim Einschalten fließt sofort ein Strom hinein, die Spannung am Kondensator steigt von 0 V bis zum Maximum.

2. Spule: Beim Einschalten fließt *kein* Strom, aber die Spannung an der Spule entspricht der Maximalspannung, dann steigt der Strom bis zu seinem Maximum.

Es gibt auch Gemeinsamkeiten. Die Spannung am Kondensator und der Strom in der Spule steigen nicht linear, sondern exponentiell an.

Ich komme noch mal auf die Vorstellung eines frequenzabhängigen Widerstandes zurück. Das Einschalten stellt eine sehr schnelle Änderung der Spannung dar; schnelle Änderung, das kennen wir aus hier schon vorher Behandeltem, entspricht einer hohen Frequenz. Und wir haben gesagt: eine Kondensator hat für hohe Frequenzen einen niedrigen Widerstand. Daher fließt auch sofort der volle Strom. Umgekehrt bei der Spule: die hat einen hohen Widerstand bei hohen Frequenzen; es fließt daher zunächst kein Strom.



Jetzt bleibt noch eine Frage: warum musste die LED in der Schaltung mit Spule herumgedreht werden?

Beim Kondensator fließt ein Strom beim Einschalten hinein, beim Ausschalten hinaus. Obwohl sich die Stromrichtung umkehrt, bleibt sie für die LED gleich; unser Kondensator ersetzt sozusagen die Versorgungsspannung.

Bei der Schaltung mit der Spule könnten wir, wäre die LED nicht herumgedreht, beim Einschalten ein sehr kurzes Aufblitzen sehen. Mit den Bauelementen⁵⁰, die wir hier benutzen, sehe ich das allenfalls auf dem Oszilloskop. Beim Ausschalten mit verpolarter LED, Plus am Minusanschluss, ist deutlich ein Leuchten zu erkennen. Die Spannung an der LED muss also ihre Polarität vertauscht haben.

So wie am Kondensator der Strom die Richtung wechselt, wechselt an der Spule die Spannung die Richtung.

50 Die für das Experiment verwendete Spule hat 15 mH!

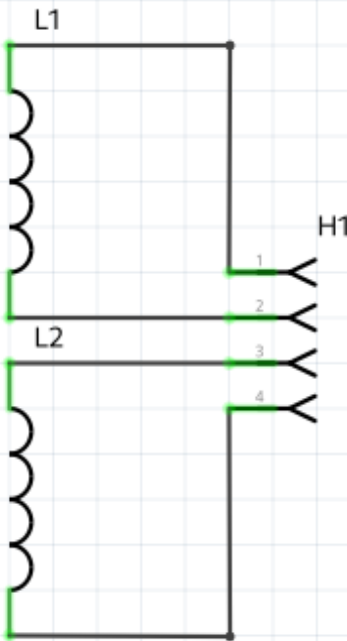
Eine Eigenschaft des Kondensators, dass er für die Frequenz 0 Hz einen unendlichen Widerstand hat, bewirkt noch ein Phänomen, das äußerst wichtig aber schwer verständlich ist. Zunächst muss ich aber noch etwas vorab erklären. Eine Gleichspannung kann nämlich eine Wechselspannung „enthalten“. Wenn eine Gleichspannung von, sagen wir 2,5 V, sich nach oben und unten um 1 V wiederkehrend ändert, haben wir eine Wechselspannung von 2 V, die einer Gleichspannung überlagert ist. Im nächsten Kapitel über Transistoren werden wir das am Beispiel sehen.

Wenn ich nun aber diese überlagerte Gleichspannung durch einen Kondensator schicke, kommt nur noch die Wechselspannung an; der Gleichspannungsanteil ist wie weg gezaubert.

Das noch „mystischere“ passiert, wenn ich den Kondensator am Ausgang wieder auf eine Gleichspannung treffen lasse: die Wechselspannung überlagert sich dieser Gleichspannung. Wenn ich beispielsweise über einen Widerstand den Kondensator an den Plus Pol meiner Stromversorgung anschlieÙe, erhalte ich so Spannungen, die höher als meine Spannungsversorgung sind!

4 Transformator

Ein Sonderfall der Induktivität muss hier unbedingt noch behandelt werden: der Transformator. Aus dem Latein kommt das Wort „transformare“, das soviel wie „umwandeln“, „verwandeln“ bedeutet.



Wenn man zwei Spulen in Reihe schaltet, erhält man einen Spannungsteiler. Das ist noch nicht sehr aufregend. Wenn ich aber zwei Spulen mit einem *gemeinsamen* Kern⁵¹ verwende, erhalte ich ganz interessante und unerwartete Ergebnisse.

Speise ich eine Wechselspannung an H1 Pin 1 und 2 ein, erhalte ich auch an Pin 3 und 4 eine Spannung; sie ist umgekehrt-proportional zum Verhältnis der Windungszahlen.

Ein Beispiel: 20 Windungen in Spule L1 und 10 Windungen in Spule L2 ($1 / (20 / 10)$) ergeben die Hälfte der Spannung an L2. Die Spannungen sind völlig unabhängig voneinander (man nennt das auch galvanische Trennung). Ich kann also auch Pin 2 und 3 verbinden⁵². Immer noch erhalte ich an L2 die halbe Spannung. Messe ich jetzt zwischen Pin 1 und 4, erhalte ich die $1 \frac{1}{2}$ fache Spannung. Also auch „hoch“-transformieren geht. Natürlich auch mit

getrennten Wicklungen. Dazu muss ich nur die Spannung an L2 einspeisen und an L1 abnehmen.

Wenn ich mir anschau, welche Ströme fließen, kann ich herausfinden, dass ich sekundärseitig in unserem erstgenannten Beispiel fast den doppelten Strom an L2 entnehmen kann. Es findet nicht nur eine Spannungs-, sondern auch eine Stromtransformation statt, und zwar im proportionalen Verhältnis der Windungszahl. Also:

$$U_{\text{sekundär}} = 1 \left(\frac{\text{Windungen}_{\text{primär}}}{\text{Windungen}_{\text{sekundär}}} \right) * U_{\text{primär}}$$

$$I_{\text{sekundär}} = \left(\frac{\text{Windungen}_{\text{primär}}}{\text{Windungen}_{\text{sekundär}}} \right) * I_{\text{primär}}$$

51 Als Kern bezeichnet man ein Material, in dem der sogenannte magnetische Fluss sich ausbreiten kann.

52 Man nennt das Spartransformator, weil nur eine, angezapfte Wicklung nötig ist.

Früher enthielten fast alle Geräte, die mit Netzspannung liefen einen Transformator, der Eingangsseitig mit den 230 V / 50 Hz unseres Stromnetzes verbunden war und sekundärseitig die gewünschte Wechselspannung, z.B. 5 V bei immer noch 50 Hz lieferte. Wir haben schon erfahren, dass unsere Elektronikprojekte eine Gleichspannung benötigen. Also müssen wir die 5 V noch gleichrichten, glätten und stabilisieren⁵³.

Heutige (Schalt-) Netzteile benutzen aber nicht mehr die 50 Hz Netzwechselspannung direkt. Warum? Wir wissen, dass Spulen für niedrige Frequenzen einen niedrigen Widerstand haben. Also muss man für 50 Hz sehr große Induktivitäten verwenden. Die machen die Netztrafos groß und schwer. Was wäre nun, wenn wir statt 50 Hz 500 kHz nähmen? Wir könnten viel kleinere und leichtere Spulen einsetzen, nur, wie kommt man an die 500 kHz?

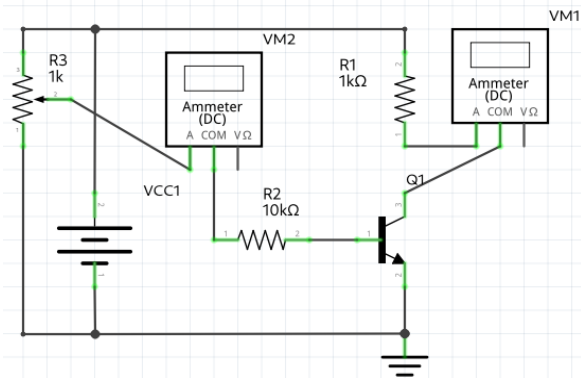
Die heutige Elektronik mit ihren integrierten Schaltungen (hunderte Transistoren in einem winzigen Gehäuse) macht es möglich. Zunächst wird die Netzspannung direkt gleichgerichtet, die entstehende, sehr hohe Gleichspannung mit einer PWM in die 500 kHz umgewandelt und in einem sehr kleinen Trafo auf die gewünschte Spannung heruntertransformiert!

5 Transistorschaltungen

Wie ein Transistor physikalisch funktioniert, wissen wir nicht⁵⁴. Wir haben nur eine Analogie kennengelernt. Die ist aber so gut, dass wir damit alle drei Grundschaltungen verstehen und unter Hinzunahme einiger Formeln auch berechnen können.

Die Emitterschaltung

Die Grundschaltungen heißen nach dem Anschluss, der an Masse liegt. Bei der Emitterschaltung liegt der Emitter an Masse. Sie ist die wichtigste, weil meist verwendete Schaltungsart. Im Bild sieht man gut, dass der Emitter (der Anschluss mit dem Pfeil) direkt mit Masse verbunden ist. Vom Kollektor nach Plus liegt ein Widerstand. Die Messgeräte messen den Strom und wir tun so, als ob sie keinen Einfluss auf die Schaltung haben.



Unsere „Wasserrad“ Erklärung sagte ja, dass Wasser / Strom in die Basis hinein fließen muss, um einen größeren Strom vom Kollektor zum Emitter hervorzurufen. Der kleine Pfeil erinnert nicht umsonst an eine Diode: es ist eine! Bei der LED haben wir gesehen, dass bei kleinen Spannungen erst mal kein Strom floss, Stichwort Nichtlinearität. Hier ist es genauso, die Schwelle liegt für Silizium-Transistoren bei 0,6 V. Werden am linken Anschluss von R_2 mehr als ca. 0,6 V angelegt, beginnt ein Basisstrom und ein Kollektorstrom zu fließen.

53 Dazu gibt es ein eigenes Kapitel.
54 Wer das wissen will, sei wieder auf das Internet oder Bücher verwiesen.

53 Dazu gibt es ein eigenes Kapitel.

54 Wer das wissen will, sei wieder auf das Internet oder Bücher verwiesen.

Wir brauchen jetzt: zwei Multimeter und ein Potentiometer. Den Schleifer des Potis legen wir über das Multimeter VM2 im Strommessmodus an R_2 , die anderen Anschlüsse an Masse und Plus. Mit dem zweiten Multimeter VM1 messen wir den Strom in den Kollektor. Wir drehen das Poti solange, bis der Strom hier 2,5 mA beträgt; wir schauen auf das andere Multimeter und lesen den Strom ab.

Jetzt wird vielleicht ersichtlich, warum Elektroniker nie genug Messgeräte haben können!

Die Stromwerte können stark streuen, je nach Transistortyp aber auch innerhalb eines Typs. Jetzt müssen wir wieder einmal rechnen:

$$\begin{aligned} 2,5 \text{ mA} * 1 \text{ k}\Omega &= 2,5 \text{ V} && \# \text{ die Spannung am Kollektor} \\ 2,5 \text{ mA} / (\text{von mir gemessene}) 5,5 \mu\text{A} &&& \# \text{ ein Verhältnis: } \sim 454 \end{aligned}$$

Dafür, dass wir die Spannung am Kollektor zu $U/2$ (halbe Versorgungsspannung) gewählt haben, gibt es einen guten Grund. Von hier aus können wir ein zu verstärkendes Signal je ca. 2,5 V nach „oben“ und „unten“ aussteuern. Man nennt dies auch den Arbeitspunkt einstellen.

Bei 2,5 mA an 1 k Ω brauche ich nur 5,5 millionstel Ampere in die Basis hinein. Wenn ich ein sehr genaues Messgerät hätte, könnte ich zeigen, das der Strom aus dem Emitter heraus genau diese 5,5 μA größer ist, als der Kollektorstrom. Es geht halt nix verloren!

Wir haben jetzt mit dem Verhältnis Kollektorstrom zu Basisstrom die *Stromverstärkung* des Transistors berechnet. Welche Spannungsverstärkung hat unsere Schaltung? Warum interessiert das überhaupt?

In sehr vielen Schaltungen, z.B. der Audioelektronik, möchte ich eher Spannungen als Ströme verstärken. Unser Bipolar-Transistor ist aber ein Stromverstärker. Kleiner Basisstrom, größerer Kollektorstrom. Ich könnte auf reine Spannungsverstärker-Bauelemente, z.B. FETs oder MOS-FETs ausweichen. Die haben aber eventuell andere Nachteile.

Um die Spannungsverstärkung zu berechnen, muss ich tief in die Physikkiste greifen und Boltzmann-Konstante etc. bemühen oder eine stark vereinfachte⁵⁵ Formel nehmen. Sie lautet:
 $I_C / 26 \text{ mV} * R_C$ # I_C = Kollektorstrom, R_C = Kollektorwiderstand

Die 0,26 mV sind eine, sehr temperaturabhängige, Konstante, die U_T (Temperaturspannung) genannt wird. Wir rechnen das für unsere Schaltungsdimensionierung durch
 $2,5 \text{ mA} / 0,26 \text{ mV} * 1 \text{ k}\Omega = \sim 96$ ⁵⁶

Meine Messungen, die ich mit Wechselspannung durchführe⁵⁷, ergeben ca. 85.

Die Regeln, die ich daraus ableiten kann:

1. höherer Kollektorwiderstand = höhere Verstärkung
2. höherer Kollektorstrom = dito

Anders formuliert: ein hoher Kollektorstrom und ein hoher Kollektorwiderstand sorgen für eine hohe Spannungsverstärkung. Halt, da widerspricht sich doch etwas! Bei gegebener Versorgungs-

55 Die Formel gilt unter mehreren Annahmen: kleine Signale, relativ kleiner Kollektorwiderstand (< 50 k Ω).

56 Vereinfacht nach Tietze/Schenk, Halbleiter-Schaltungstechnik, 8. Auflage 1986, S. 40

57 Ich speise 1 mV aus meinem Signalgenerator ein und messe die Spannung am Kollektor mit dem Oszilloskop.

spannung erniedrigt ein höherer Kollektorwiderstand doch den Kollektorstrom! Um eine möglichst hohe Verstärkung zu erreichen muss ich also gegebenenfalls auch die Versorgungsspannung erhöhen.

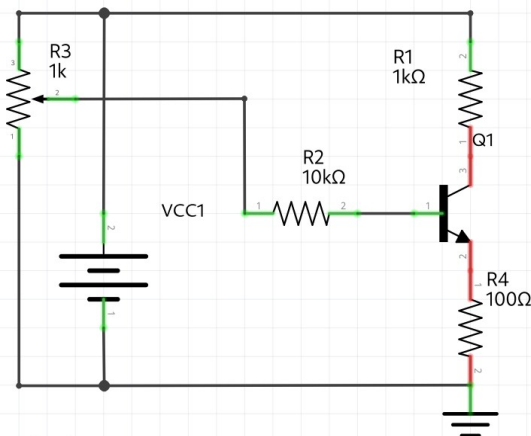
Schon während des Experimentierens fällt auf, wie instabil unser Stromwerte sind; immer wieder muss ich am Poti drehen, um wieder 2,5 mA einzustellen. Ein Grund dafür ist U_T : kleinste Temperaturänderungen haben große Auswirkungen auf die Verstärkung und damit den Kollektorstrom. Ein schöner Test besteht darin, die Lötkolbenspitze einige Millimeter neben den Transistor zu halten und dabei die Messinstrumente zu beobachten.

Gegenkopplung, ein Exkurs

Um die Schaltung stabil zu bekommen, muss ich etwas tun, was der Elektroniker als „Gegenkopplung“ bezeichnet. Darunter fallen alle Maßnahmen, die einen Teil der Verstärkung dazu einsetzen, sie wieder zu reduzieren.

Das klingt paradox: erst bemühe ich mich darum, etwas zu verstärken, und dann senke ich die Verstärkung wieder!

Schauen wir uns zunächst einmal an, wie man „gegenkoppelt“⁵⁸.



Die Messinstrumente habe ich der Übersichtlichkeit halber weggelassen. Hinzugekommen ist R_4 .

Steigt der Kollektorstrom, steigt gleichermaßen auch der Strom durch R_4 . In Zahlen:

wenn der Kollektorstrom um 1 mA steigt, wird die Kollektorspannung 1 V kleiner (die Spannung an R_1 1 V größer), die Spannung an R_4 0,1 V größer. Nur 0,1 V? Richtig: $100 \Omega * 1 \text{ mA} = 0,1 \text{ V}$.

Wenn die Emitterspannung steigt, wirkt sie einem positiven Eingangssignal entgegen. Sie „koppelt entgegen“, und zwar zu einem Zehntel der verstärkten Spannung.

Bei negativem Eingangssignal tritt der gleiche Effekt auf, nun sinkt die Emitterspannung und arbeitet gegen eine sinkende Eingangsspannung.

Die Verstärkung unserer Emitterschaltung beträgt nun etwas weniger als 10 (das Verhältnis Kollektorwiderstand zu Emitterwiderstand). Je höher die Verstärkung ohne R_4 war, desto mehr nähert sie sich an die 10 an.

Ich habe die Nichtlinearität schon betont. Ohne Gegenkopplung wirkt sie sich stark aus; je größer das Eingangssignal, desto höher der Klirrfaktor. Richtig, der Begriff aus der Audiotechnik gilt allgemein für Schaltungen mit nicht-linearen Bauelementen. Durch die Gegenkopplung erreiche ich a) eine Verbesserung der Temperaturstabilität⁵⁹ und b) eine Verringerung des Klirrfaktors.

⁵⁸ Es gibt auch andere Arten der Gegenkopplung. Das gegen gekoppelte Signal muss aber invertiert sein, sonst erhalte ich eine Mitkopplung.

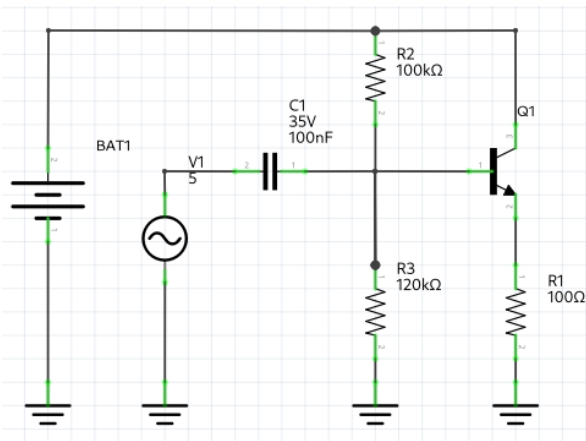
⁵⁹ Die sogenannte Temperaturdrift erniedrigt sich um den Faktor der Gegenkopplung.

Zusammenfassung Emitterschaltung

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Emitterschaltung eine Palette guter Eigenschaften besitzt:

1. relativ hoher Eingangswiderstand
2. Ausgangswiderstand (Innenwiderstand) in der Größe des Kollektorwiderstandes
3. hohe, durch die Gegenkopplung leicht einstellbare Verstärkung, in diesem Fall niedriger Klirrfaktor
4. guter Frequenzgang⁶⁰.

Die Kollektorschaltung oder Emitterfolger



Die Kollektorschaltung ist am einfachsten zu erklären. Sie hat zwei Namen. Kollektorschaltung verweist darauf, dass der Kollektor auf festem Potential liegt; bei NPN Transistoren ist das Plus oder die Versorgungsspannung.

Der zweite Name, Emitterfolger, deutet an, dass der Emitter der Spannung an der Basis folgt und das in weiten Grenzen unabhängig vom Lastwiderstand R_1 . Der Eingang ist hochohmig, der Ausgang niederohmig. In der Schaltung im Bild links wird die Versorgungsspannung durch R_2 und R_3 geteilt; um die

Ausgangsspannung auf die halbe Versorgungsspannung zu bringen, muss R_3 etwas größer als R_2 sein, um die 0,6 V Durchlassspannung auszugleichen.

Die Spannungsverstärkung liegt knapp unter eins. Anwendung findet sie immer dann, wenn das Eingangssignal einen hohen Innenwiderstand besitzt. In der Audioelektronik wäre das z.B. ein Kondensatormikrofon.

Die Basisschaltung

Sie sei erwähnt, aber nur ganz kurz, da sie außer in Hochfrequenzschaltungen keine Rolle spielt. Bei ihr liegt die Basis an Masse. Das Eingangssignal wird am Emitter eingekoppelt.

Eine reale Transistorschaltung: zweistufiger Verstärker

Bislang haben wir eher Prinzipschaltungen gesehen, die so in freier Wildbahn nicht auftauchen.

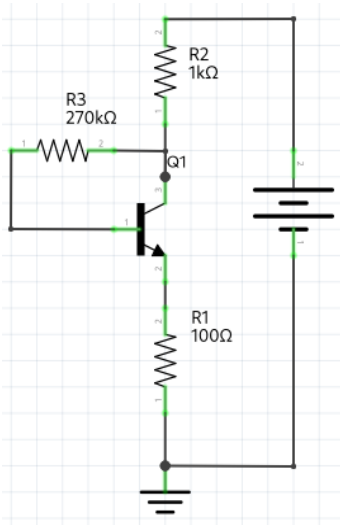
Da ich zudem noch nicht näher auf das Thema Arbeitspunkteinstellung eingegangen bin, hole ich das hier nach. Wir hatten gesehen, dass der Arbeitspunkt bei der Emitterschaltung ungefähr die halbe Versorgungsspannung betrug. Das der Kollektorwiderstand den maximalen Strom gegen Masse bestimmt und damit auch den Ausgangswiderstand, leuchtet ein, wenn man sich vorstellt, dass bei gesperrtem Transistor ein Kurzschluss vom Kollektoranschluss nach Masse den Strom

⁶⁰ Als Frequenzgang bezeichnet man den Verlauf der Verstärkung über die Frequenz, z.B. 20 – 20 kHz bei einem Audio-Verstärker.

U_{batt} / R_C fließen lässt. Wenn der Transistor diesen Strom durch sich (vom Kollektor zum Emitter) fließen lässt, ist die niedrigste Ausgangsspannung erreicht, sperrt er, die höchste.

Hat die nächste Stufe einen relativ niedrigen Eingangswiderstand, wird diese höchste Ausgangsspannung nie erreicht. Dann ergibt es Sinn, den Arbeitspunkt tiefer zu legen, um die Verzerrungen zu verkleinern.⁶¹

Bei unserem Experiment hatten wir den Basisstrom über ein Potentiometer eingestellt. Wenn man aber für jede Transistorstufe so ein Poti vorsehen wollte, wäre das teuer und würde unnötig Platz verbrauchen. Schöner wäre es, nur ein oder zwei Widerstände verwenden zu müssen.



Hier nun ein erster Entwurf. Es fallen zwei Dinge auf: wir nutzen wieder einen Widerstand vom Emitter nach Masse und der Basisstrom wird über einen sehr großen Widerstand vom Kollektor abgeleitet.

Dass der Widerstand R_1 eine Gegenkopplung hervorruft und die Spannungsverstärkung in etwa auf das Verhältnis R_2 / R_1 einstellt, haben wir schon gehört. Neu ist eine weitere Gegenkopplung durch R_3 . Was geschieht, wenn die Eingangsspannung steigt? Das Kollektorpotential sinkt und der Strom in die Basis wird kleiner. Das wirkt der Eingangsspannungserhöhung entgegen. Da der Widerstand aber sehr hoch ist, bleibt die Auswirkung nur sehr gering. Gemessen habe ich eine Verstärkung von knapp unter 10.

Wie kommt man aber auf den Wert von R_3 ? Machen wir eine grobe Rechnung. Um die ca. 2,5 V am Kollektor zu erhalten, muss der

Strom durch den Kollektorwiderstand 2,5 mA betragen.

Damit beträgt der Spannungsabfall am Emitterwiderstand $100 \Omega * 2,5 \text{ mA} = 0,25 \text{ V}$. Zu diesen addieren wir die Basis-Emitterspannung von $\sim 0,6 \text{ V}$ und erhalten 0,85 V. Wenn wir von 2,5 V Kollektorspannung diese 0,85 V abziehen, erhalten wir 1,65 V. Wir kennen die Stromverstärkung des Transistors (454) und errechnen: $2,5 \text{ mA} / 454 = \sim 0,0055 \text{ mA}$ Basisstrom.

Jetzt rechnen wir:

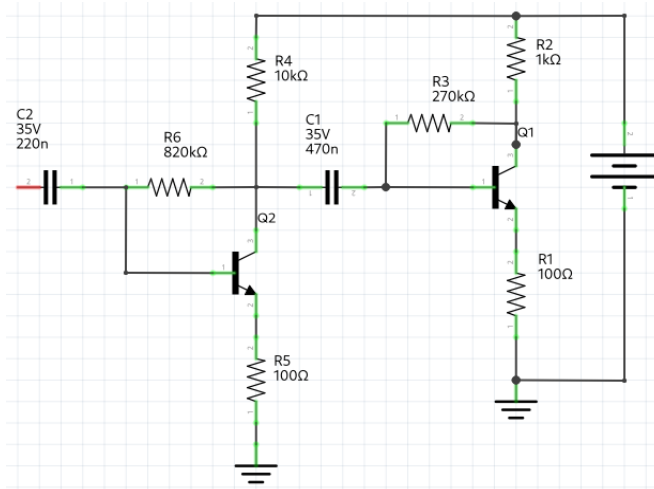
$$1,65 \text{ V} / 0,0055 \text{ mA} = \sim 300 \text{ k}\Omega$$

Wir wählen einen verfügbaren Wert⁶² von 270 kΩ!

61 Die Linearität der Transistorkennlinie wird schlechter, je mehr ich mich den beiden Extremen Transistor sperrt oder Transistor maximal leitend nähere.

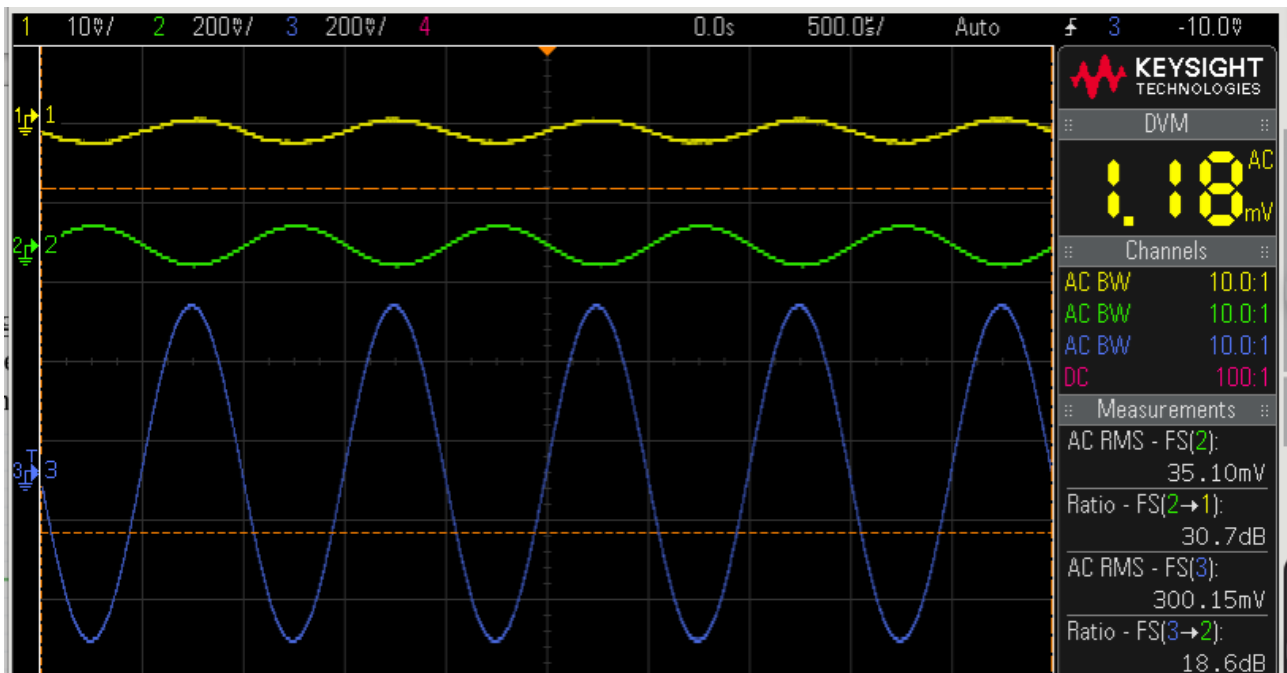
62 Welche Werte verfügbar sind, wurde weiter oben, im Kapitel „Über Bauteile, Familien und anderes“ erläutert.

Wir fügen die zweite Stufe hinzu. Sie wird die Eingangsstufe. Sie besteht aus Q₂, R₄, R₅, R₆. Seine



Berechnung erfolgt gleich zu R₃⁶³. Da ich keinen genau passenden hatte, wählte ich 1 MΩ, womit sich eine kleinere Kollektorspannung als 2,5 V ergab. Der höhere Basisstrom erniedrigt die Kollektorspannung; da in der 1. Stufe aber nur eine kleine Signalspannung verarbeitet werden kann (und muss), stört das nicht. Auch hinzugekommen sind die Kondensatoren C₁ und C₂. Während C₂ den Eingang vor Gleichspannungen schützt, koppelt C₁ die erste Stufe an die zweite, ebenfalls die Kollektorgleichspannung von Q₂ nicht durchlassend.

Obwohl das Verhältnis R₄ / R₅ 100 beträgt, verstärkt diese Stufe „nur“ um das ca. 35fache. Das liegt daran, dass die Spannungsverstärkung ohne Emitterwiderstand ($0,25 \text{ mA} / 0,26 \text{ mV} * 10 \text{ k}\Omega = \sim 96$) kleiner als dieses Verhältnis ist. Je mehr sich diese Werte annähern und je größer der Kollektorwiderstand, desto größer wird die Abweichung. Die Gesamtverstärkung mit gut 300 lässt sich aber sehen, auch auf dem Oszilloskop:



63 Bei gewünschter Kollektorspannung von 2,5 V müssen diesmal 0,25 mA fließen. $100 \Omega * 0,25 \text{ mA} = 0,025 \text{ V}$; $0,6 \text{ V} + 0,025 \text{ V} = 0,625 \text{ V}$; $2,5 \text{ V} - 0,625 \text{ V} = 1,875 \text{ V}$; $1,875 \text{ V} / 0,00055 \text{ mA}$ (Basisstrom für 0,25 mA Kollektorstrom) = $\sim 3,4 \text{ M}\Omega$.

Die gelbe Kurve ist das Eingangssignal (hier im 10 mV Messbereich⁶⁴), die Grüne am Kollektor der ersten, die Blaue an der zweiten Stufe. Diese beiden werden im 200 mV Bereich gemessen. Rechts im Bild werden Messwerte angezeigt. Das Signal vom Generator beträgt 1 mV_{eff} (1 kHz), an der ersten Stufe dann schon 35,1 mV, an der zweiten 300 mV. Mit „Ratio“ (Verhältnis) wird der Verstärkungsfaktor angezeigt. Der Elektroniker macht das in dB, das ist eine logarithmische Skalierung⁶⁵.

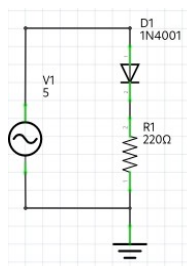
6 Netzteile

Meine ersten Bastelprojekte waren oft Netzteile. Erstens brauchte man sie sowieso, und zweitens waren sie recht einfach zu entwickeln und zu bauen.

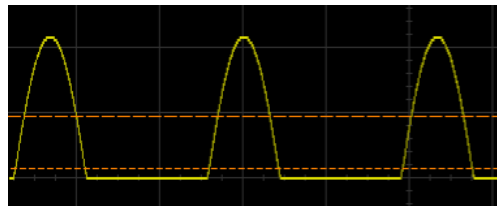
Was genau meint „Netzteil“? Man kann damit die ganze Strecke vom Trafo über Gleichrichtung und Stabilisierung in einem Gehäuse mit Bedienelementen zur Einstellung der gewünschten Spannung meinen, wie sie z.B. in einem Labornetzteil anzufinden ist.

In einem Hifi Audioverstärker befindet sich aber auch ein „Netzteil“. Das liefert mehrere, feste Spannungen: für den Vorverstärker, für die Endstufen. Nicht alle werden stabilisiert.

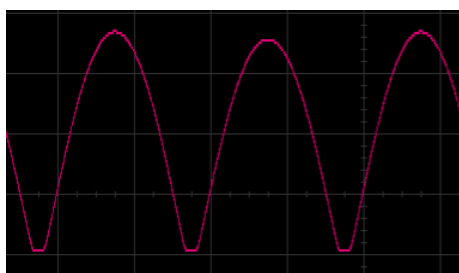
Gleichrichtung



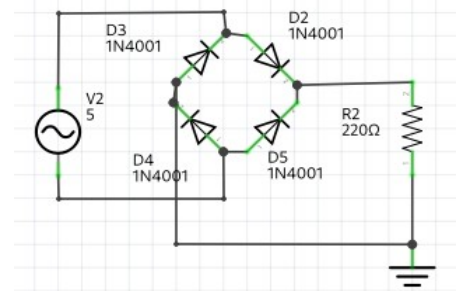
Die einfachste Form der Gleichrichtung wird im Bild links gezeigt. Man nennt es auch Einweggleichrichtung, weil von der Wechselspannung nur die positive Halbwelle genutzt wird. Auf dem Oszilloskop sieht das wie im Bild rechts aus. Auf den ersten Blick erkennt man, wie ineffektiv das ist.



Zum Glück gibt es mit dem sogenannten Brückengleichrichter eine Alternative. Die Schaltung, hier diskret mit vier einzelnen Dioden aufgebaut, sorgt für zwei Halbwellen;



gleichsam nach „oben“ geklappt. Das sieht deutlich besser aus. Die kleinen Abflachungen unten entstehen durch die Dioden; auch in

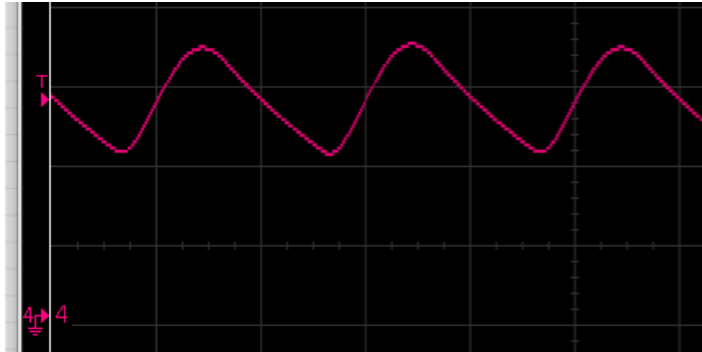


Durchlassrichtung fallen ca. 0,6 V an ihnen ab. Auf eine weitere Besonderheit sei noch hingewiesen: bei der Einweggleichrichtung war das untere Ende der Wechselspannung die Masse; jetzt geht das nicht mehr, denn es liegt eine Diode dazwischen.

⁶⁴ Oszilloskope verwenden den Spitzenwert der Spannung als Messbereichsangabe, nicht den RMS Wert. 1 mV_{RMS} vom Signalgenerator entsprechen ca. 2,8 mV Spitze-Spitze.

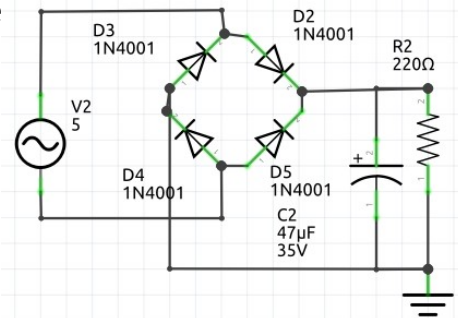
⁶⁵ Wer es genau wissen will, sei auf das Internet verwiesen.

Von einer Gleichspannung sind wir aber noch weit entfernt. Hier kommt der Kondensator ins Spiel! Der kann Energie speichern und – in der umgekehrten Stromrichtung – wieder abgeben. Was



geschieht wohl, wenn ich einen anschließe? Ohne den Lastwiderstand R_2 erhalten wir eine gerade Linie in Höhe der Spitzenspannung. Mit Widerstand schaut es so

aus, wie im Bild links. Man beachte



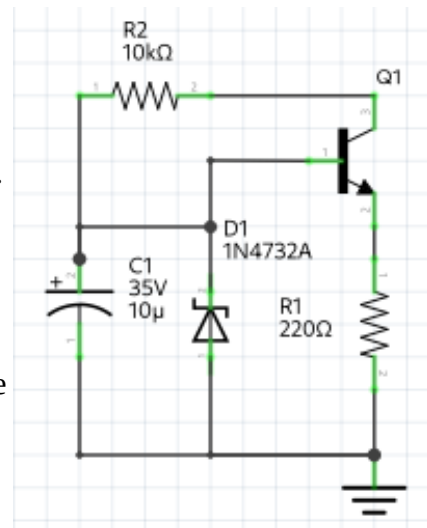
das Massesymbol links unten. Wir sehen eine von einer Wechselspannung überlagerte Gleichspannung. Da, wo die Kurve nach oben geht, lädt die Wechselspannungsquelle den Kondensator bis auf die Spitzenspannung auf, dann entlädt der Widerstand den Kondensator (abfallende Kurve) bis die nächste Halbwelle wieder lädt ...

Stabilisierung

Hier habe ich bewusst ein ungünstiges Verhältnis zwischen Widerstands- und Kondensatorgröße gewählt, um den Effekt, den man Rippelspannung nennt, zu demonstrieren. Selbst bei besserer Dimensionierung taucht die Rippelspannung immer auf, sobald ein Laststrom fließt.

Ohne aktive Bauelemente bekomme ich das nicht in den Griff. Also bauen wir eine einfache, aber sehr wirksame Stabilisierungsschaltung auf.

Am Kollektor von Q_1 speisen wir die rippelige Spannung ein. Der Transistor arbeitet in Kollektorschaltung (Emitterfolger). Wir sehen ein neues, unbekanntes Bauelement D_1 : eine Zehnerdiode. Sie ist in Sperrichtung angeordnet! Ähnlich wie unsere schon behandelten LEDs, die aber in Durchlassrichtung, weist sie eine stark unlineare Kennlinie auf. Sobald eine bestimmte Sperrspannung⁶⁶ überschritten wird, „bricht“ sie durch und der Strom steigt so steil an, dass die abfallende Spannung kaum noch ansteigt. Wie immer bei solch unlinearen Kennlinien muss auf einen passenden Vorwiderstand geachtet werden. Sonst steigt der Strom über den maximal zulässigen Wert und die Diode wird zerstört.



⁶⁶ Es gibt Zehnerdioden mit den verschiedensten Sperrspannungen, aber es gibt Sprünge.

Über den Widerstand R_2 wird der Kondensator C_1 aufgeladen; wegen der parallelen Zehnerdiode auf maximal deren Sperrspannung. Das nennt man „Stabilisierung“, da bei wechselnden Eingangsspannungen die Spannung am Kondensator (fast) gleich bleibt. Der Trick besteht nun darin, dass wir diese stabilisierte Spannung an die Basis des Transistors legen. Obwohl nur ein kleiner Strom durch R_2 fließt, kann am Emitter ein großer Strom (in etwa um den Stromverstärkungsfaktor des Transistors multipliziert) abgenommen werden. Wir erinnern uns, dass bei der Kollektorschaltung der Ausgangswiderstand klein war; wir können also unterschiedlich große Widerstände für R_1 nehmen und erhalten doch ziemlich genau die Spannung der Zehnerdiode weniger die Durchlassspannung der Basis-Emitterstrecke. Entscheide ich mich für eine Zehnerdiode mit 5,6 V, erhalte ich am Ausgang ca. 5 V.

Was passiert mit dem Ripple? Er stellt ja gerade eine wechselnde Eingangsspannung dar, wird also durch die Schaltung eliminiert!⁶⁷

67 Die Rippelspannung darf nur nie kleiner werden als die erwünschte Ausgangsspannung.

VII Messgerätekunde

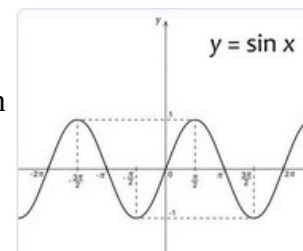
Mein Lieblingsthema in der Elektronik sind Messgeräte. Zum einen, weil sie helfen, Schaltungen zu verstehen, zum anderen, weil sie selbst meist fantastische Beispiele für überragende Elektronik sind. Analysiert man ihren Aufbau und Funktion, gewinnt man tiefe Einblicke.

1 Das Oszilloskop

Eines der vielseitigsten Instrumente ist das Oszilloskop. Der lustige Name kommt aus dem lateinischen und bedeutet „oszillieren“, schwingen und „skop“ ist etwas zum sehen, das Wort Teleskop ist geläufig.

Man kann also Schwingungen sehen! Das Multimeter zeigt Größen an, z.B. 0,4 V. Mit unseren digitalen Geräten kann man sogar erkennen, ob es sich um eine Gleich- oder Wechselspannung handelt. Aber „wie“ die Schwingung aussieht, zeigt nur das Oszilloskop.

Und Schwingungen können ganz verschieden aussehen. Unsere PWM erzeugt Kurven, die wie Rechtecke, jeweils abwechselnd ohne Ober- oder Unterkante, geformt sind. Die Netzspannung an der Steckdose hat Sinusform. Die sieht aus wie in dem Bild und hat ganz besondere Eigenschaften. Man kann diese Kurve erzeugen, indem man außen an einen Pappkreis einen Bleistift anbringt, diesen Kreis gleichmäßig schnell dreht und darunter ein Blatt Papier auch gleichmäßig durchzieht. Im Kraftwerk entsteht die Sinuskurve dadurch, dass sich in einem Generator ein Magnet in einer Spule dreht.



Wenn ich auf einer Gitarre eine Saite an zupfe, entsteht auch eine Sinuswelle; sie hat aber „Ober-töne“, d.h. statt einem Ton A mit 110 Hz erhalte ich auch noch eine Reihe höherer Töne. Die machen den schönen Klang aus! Eine reine Sinuswelle hat keine Obertöne. Und klingt ziemlich schlecht ...

Obwohl nicht alles „klirrt“, nennt man Oberwellen oder besser den Anteil der Oberwellen am Grundton Klirrfaktor.

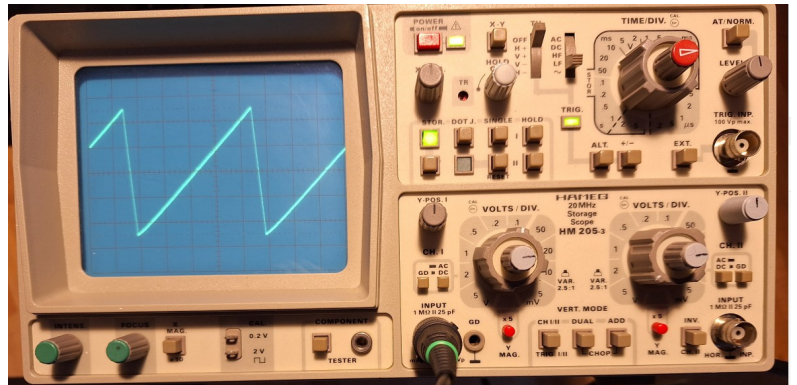
Ich schweife ab. Wir waren beim Oszilloskop. Dort kann man zwar sehen, dass eine Schwingung sinusförmig ist, ihren Oberwellenanteil kann man aber nicht gut erkennen⁶⁸. Es gibt dafür spezielle Messinstrumente, die deswegen auch Klirrfaktormessgeräte heißen.

Viele Kurven haben eine völlig unregelmäßige Form. Das Signal unserer seriellen Schnittstelle ist so eines. Hier ist ohne Oszilloskop (fast) nichts mehr zu machen, wenn es nicht funktioniert. Warum fast? Weil findige Elektroniker Messschaltungen entwickeln und bauen, die das spezielle Problem lösen.

⁶⁸ Außer bei Oszilloskopen mit einer FFT (hier müsste ich jetzt eine Fußnote in der Fußnote anfügen: bitte googeln) Funktion: auf meinem kann ich ab etwa 1% einen Klirrfaktor erkennen.

Funktion

Wie funktioniert ein Oszilloskop? Mit Hilfe einer Bildröhre (auch Braunsche Röhre genannt) kann man auf einer Mattscheibe einen Lichtpunkt erzeugen. Die Röhre erlaubt, den Lichtpunkt über zwei Spannungen in horizontaler und vertikaler Richtung zu bewegen. Das Oszilloskop erzeugt jetzt einmal eine Spannung, die den Bildpunkt von links nach rechts und wieder zurück, diesmal aber viel schneller, bewegt. Die zu messende Spannung wird benutzt, um den Lichtpunkt nach oben und unten abzuweichen. Das heißt also, dass die vertikale Spannung über die Zeit (horizontal) abgebildet wird. Das sieht, bei einem dreieckförmigen Signal, so aus wie im Bild.



Das Gerät hat ganz schön viele Knöpfe! Es ist auch nicht leicht zu bedienen. Auch hier hilft die moderne Digitaltechnik. Sie erlaubt einen Automatikmodus, der alle Einstellungen selbständig durchführt. Mein 40 € Oszilloskop demonstriert das! Ohne zu wissen, was Ablenkgeschwindigkeit, Triggerung⁶⁹ etc. bedeuten, kann das, was abgebildet wird, aber nicht sinnvoll interpretiert werden.

Früher waren Oszilloskope rein qualitative Messgeräte, d.h. man konnte die Kurvenform sehen, aber die Größen, die quantitativen Messwerte nur grob ablesen. Auch das hat sich mit den digitalen Oszilloskopen geändert; sie liefern über eine Reihe von sogenannten Messfunktionen genaue Werte der Größen wie Spitze-Spitze-Spannung, Frequenz, Puls-Pause-Verhältnis etc. und das alles übersichtlich auf dem LCD Bildschirm als Zahlen.

Obwohl digitale Oszilloskope völlig anders funktionieren als Analoge, entspricht die Signaldarstellung auf dem Bildschirm genau den Analogen: das Signal wird in seinem zeitlichen Ablauf gezeigt. Durch die Digitalisierung des Eingangssignals kann man aber das Bild "einfrieren", Berechnungen auf das Eingangssignal anwenden (z.B. die schon erwähnte FFT, aber auch Addition oder Multiplikation), genaue Messwerte abrufen, den Triggerpunkt ausserhalb des gezeigten Bildes wählen etc.

Benutzung

Sind keine Automatikfunktionen vorhanden oder will man lieber selber bestimmen, wie gemessen werden soll, dann stellt man an einem Oszilloskop die Triggerung auf automatisch⁷⁰, dann die vertikale Empfindlichkeit für den gewählten Kanal⁷¹ ein. Das entspricht der Bereichswahl bei manuellen Multimetern. Meist folgt die Einstellung dem 1 - 3 - 5 Schema, d.h. man kann z.B. 1 V, 3 V oder 5 V pro Teilstrich wählen. Ich drehe den im Bild mit VOLTS/DIV überschriebenen Knopf von ganz

⁶⁹ Um ein stabiles Bild zu bekommen, sorgt das Oszilloskop dafür, dass die Ablenkung bis zum Eintreten eines bestimmten Ereignisses wartet.

⁷⁰ In diesem Modus wird die Ablenkung auch gestartet, wenn kein Triggersignal erkannt wurde.

⁷¹ Heutzutage haben Oszilloskope fast immer zwei oder mehr Kanäle genannte Eingänge. Jeder davon kann unabhängig in der Empfindlichkeit geregelt werden.

Links (das ist die unempfindlichste Stellung) solange nach rechts, bis die Kurve so hoch wie möglich wird, aber nicht über den Bildschirm hinausragt. Mit dem Knopf TIME/DIV stelle ich die Ablenkgeschwindigkeit ein. Sie kann in Zeiteinheiten wie 10 ms / Teilstrich gewählt werden. Gegebenenfalls muss ich, wenn die Zeitablenkung weit außerhalb der Signalfrequenz lag, die Prozedur beginnend mit der Vertikaleinstellung wiederholen.

Jetzt kann man sich der Triggerung zuwenden, um ein möglichst stehendes Bild zu erhalten. Die einfachste Form der Triggerung besteht in der Erkennung von sogenannten Flanken, das sind die wählbar aufwärts oder abwärts weisenden Kurvenzüge. Bei dem Dreiecksignal im Bild sieht man schön, dass mit aufsteigender Flanke ab ca. 100 mV⁷² getriggert wurde: der Kurvenzug beginnt immer ab dem ersten Teilstrich oberhalb der Mittellinie (die stark gestrichelt ist), das Bild steht.

Flankenrichtung, die Höhe des Triggerpunktes, Ankopplung mit oder ohne Gleichspannung, selbst Frequenzfilter können ausgewählt werden. Überhaupt sind die Triggerfähigkeiten ganz entscheidend für die Qualität eines Oszilloskops.

Tastköpfe

Die zu messende Spannung wird über sogenannte Tastköpfe an das Oszilloskop übergeben. Da Oszilloskope auch hohe bis sehr hohe Frequenzen anzeigen können, kann man ein Signal nicht mit zwei einfachen Kabeln anschließen. Das im Detail zu erklären, sprengt hier den Rahmen. Es sei nur verraten, dass für hohe Frequenzen ein gerader Draht eine Spule ist und die hat, das haben wir schon gelernt, bei hohen Frequenzen einen hohen Widerstand.

Ein Tastkopf ist nun so aufgebaut, dass er auch diese hohen Frequenzen über ein spezielles Kabel (Koaxialkabel) an den Eingang des Oszilloskops legen kann. Dabei teilt er dafür die Spannung aber um den Faktor 10 und erhöht gleichzeitig den Eingangswiderstand des Oszilloskops von 1 auf 10 MΩ. Sogenannte 1 : 1 Tastköpfe oder solche mit Umschaltmöglichkeit auf 1 : 1 in dieser Stellung sind im eigentlichen Sinne des Wortes keine „Tastköpfe“; sie haben gegenüber der 10 : 1 Variante eine deutlich eingeschränkte Bandbreite. Was ist das nun wieder? Beim HiFi Audioverstärker sprechen wir vom Frequenzgang, z.B. von 20 Hz bis 20 kHz. Das ist seine Bandbreite. Ein Oszilloskop kann Bandbreiten von 20 MHz, wie das im Bild, und mehr haben.

2 Multimeter

Was wäre eine Elektronikerwerkstatt ohne Multimeter⁷³? Kaum vorstellbar! Da tragbar⁷⁴, mit Batterie oder Akku ausgestattet, kann man damit fast überall, auch auf die Schnelle, messen. Sie können immer Spannungen und Ströme erfassen, auch Widerstandsmessungen sind die Regel. Kapazitäten manchmal, Induktivitäten gehören fast nie dazu.

Multimeter messen Gleichspannungen und – sinusförmige – Wechselspannungen. Bis auf hochpreisige Ausnahmen (Stichwort True RMS oder Echteffektivwert) führen andere Kurvenformen zu falschen Messergebnissen!

⁷² Wer jetzt sehr aufmerksam das Bild studiert und sagt: der Knopf steht aber doch auf 10 mV / DIV, der hat Recht. Es wurde aber ein 10 / 1 Tastkopf verwendet und der senkt die Empfindlichkeit um den Faktor 10.

⁷³ Sie werden auch Vielfach- oder Mehrfachmessgeräte genannt.

⁷⁴ Es gibt auch stationäre Multimeter. Sie sind besonders für feste Arbeitsplätze gedacht und oft besonders genau.

Der Grund dafür liegt in der mathematisch eindeutigen Beziehung zwischen Spitzenwert und RMS⁷⁵ Wert, im deutschen auch Effektivwert genannt, bei Sinusspannungen. Die Spitzenspannung, die im Multimeter tatsächlich gemessen wird, wird durch die Formel $U_{Spitze} = \sqrt{2} * U_{eff}$ umgerechnet.

Auch die Bandbreite ist stark eingeschränkt, oft nur wenige Kiloherz. Das alles hört sich schlimmer an, als es ist: wenn man es weiß und berücksichtigt, kommt man doch zu guten Ergebnissen.

Jetzt wird auch klar, warum ein Multimeter zwei einfache einzelne Kabel benutzt und benutzen kann! Wir sind sehr, sehr weit von Hochfrequenz entfernt!

Der Eingangswiderstand des Messinstruments stellt noch ein wichtiges Kriterium dar. Bei der Spannungsmessung soll er möglichst hoch sein; heutzutage sind es meist 10 MΩ. Bei Strommessungen ist es umgekehrt: hier möchte man einen möglichst kleinen Widerstand haben, denn er liegt ja in Reihe zum Messobjekt. Eine andere Sichtweise verdeutlicht dies vielleicht noch mehr: da ich mit dem Strommessgerät den Spannungsabfall an einem im Messgerät eingebauten Widerstand messe (und nicht den Strom direkt), verfälscht ein hoher Spannungsabfall den erhaltenen Wert.

Zu den Hauptanwendungen eines Multimeters gehört die Messung der Gleichspannungen oder -ströme einer Schaltung, das Messen von Widerstandswerten, die Prüfung von Dioden und grob von Transistoren, indem man die Sperr- und Durchlassrichtung ermittelt. Ein oft eingebauter Piepser gestattet die akustische Kontrolle von Verbindungen: piept es, liegt ein niedriger Widerstand bzw. Durchgang zwischen den Messspitzen vor.

Mit den oben genannten Einschränkungen lassen sich auch Wechselspannungen messen; die Verstärkung einer Transistorstufe durch Messung an Eingang und Ausgang und Division der Werte.

Wechselspannungen und Ströme, die an der Sekundärseite eines Transformators anfallen, lassen sich ebenfalls gut messen (50 Hz!).

3 Multimeter + Oszilloskop

In den letzten Jahren finden immer mehr Kombinationen aus Oszilloskop und Multimeter auf den Konsumentenmarkt. Sie vereinen ein grafisches Display mit dem Gehäuse eines Multimeters, Strom- und Spannungsmessfunktionen über die gewohnten dicken Kabel mit Tastkopfeingängen (sogenannte BNC Buchsen). Der Oszilloskopteil entspricht einem sehr preiswerten normalen Oszilloskop, meist mit einer Bandbreite um die 10 MHz, oft zweikanalig, der Multimeterteil beschränkt sich bei den mir bekannten Geräten auf die Grundfunktionen Spannung, Strom, Widerstand. Um die 100 € fängt es an; als Einstiegsgerät auch für Anfänger scheint es mir sehr geeignet.

4 Spezielle Messgeräte

Während Multimeter und Oszilloskop eher Generalisten sind, gibt es viele Messgeräte, die nur für einen Zweck gebraucht werden können; für den dann aber sehr oft richtig gut.

75 RMS steht für root mean square und meint das Gleichspannungsäquivalent einer Wechselspannung. D.h. eine Wechselspannung von 1 V RMS würde in einem Widerstand die gleiche Wärme erzeugen wie eine Gleichspannung von 1 V. Im deutschen wird von „effektivwert“ gesprochen.

Ein solch dediziertes Messgerät heißt z.B. „LCR“. Es kann Induktivitäten⁷⁶, Kapazitäten und Widerstände messen und auch noch deren Qualität, also ob ein Kondensator doch ein bisschen Gleichstrom durchlässt⁷⁷ oder den schon erwähnten, immer vorhandenen, ohmschen Widerstand von Spulen.

Der Bauteiletester stellt auch so ein besonderes Messgerät dar. Er kann neben Widerstands-, Kapazitäts- und teilweise Induktivitätswerten, auch Dioden, LED und Transistoren ausmessen und dann z.B. angeben, an welchem Beinchen die Basis, der Kollektor und der Emitter liegen. Eine große Hilfe bei unbekanntem Bauteilen!

Ein Signalgenerator misst zwar nichts, liefert aber die Signale zum Testen. Für den Anfang reichen preiswerte Geräte, die mindestens Sinus- und Rechteckkurven (mit einstellbarem Tastverhältnis) bereitstellen können.

Auch ein Signalverfolger kann gute Dienste leisten. Es handelt sich um einen Verstärker mit Lautsprecher, bei dem man verschiedene Empfindlichkeiten einstellen kann. In unserem zweistufigen Verstärker würde man den Tastkopf an verschiedenen Punkten der Schaltung ansetzen und unterschiedlich laute Töne hören. Die Lautstärke ist das Maß für die Verstärkung. Auch Verzerrungen lassen sich – in Grenzen – lokalisieren. Er ersetzt zwar kein Oszilloskop, aber erlaubt schnelle Vergleichsmessungen: wo wird es lauter / leiser?

VIII Schneller zum Ziel: was beim Rechnen zu beachten ist

Wie man unschwer aus dem bisherigen Text ersehen kann, gehören Elektronik und grundlegende Mathematik zusammen. Ohne Formeln auszurechnen bleibt das Basteln oft ein unsystematisches Experimentieren, das zwar auch zum Ziel führen kann, oft aber viel Zeit verbraucht und in Sackgassen führt.

Genauigkeit

Wenn man schon viel rechnen muss, dann sollte das aber möglichst schnell gehen. Der erste Fehler, den man machen kann, ist *zu große* Genauigkeit. Wenn meine Bauteile und meine Messgeräte Toleranzen im Prozentbereich haben, ergibt es wenig Sinn, bis in den Promillebereich genau zu rechnen. Natürlich sind damit nicht die Nullen vor der Zahl gemeint!

Überschläge

Eine große Hilfe beim Beschleunigen von Berechnungen sind Überschläge der Größenordnung. Mit einer Größenordnung sind die Faktoren 10, 100, 1000 bzw. 0,1, 0,01, 0,001 usw. gemeint. Wenn ich einen Strom im Mikroamperebereich bei einer Spannung im Voltbereich messe, muss der Widerstand im Megaohmbereich liegen.

Hier nun einige Formeln; sie sollen nur als Anregung dienen.

⁷⁶ Warum „L“, wenn es Induktivitäten misst? L steht für die physikalische Einheit Selbstinduktivität.

⁷⁷ Sogenannte Elektrolytkondensatoren, die sehr hohe Kapazitätswerte erreichen können, haben einen, wenn auch hohen Widerstand.

$$\begin{aligned}
V / A &= \Omega \\
V / mA &= k\Omega \\
V / \mu A &= M\Omega \\
A * \Omega &= V \\
mA * \Omega &= mV \\
mA * k\Omega &= V
\end{aligned}$$

Größen in Formeln

Wenn ich U durch I dividiere erhalte ich Ohm. Wenn ich eine Formel wie 30 V / 0,5 mA = ? ausrechnen will, kann ich sie so umformen:

$$\frac{30}{0,5} * \frac{V}{mA} = 60 * \frac{V}{mA}$$

Volt durch mA ergibt, wie oben schon gezeigt, kΩ.

Was kommt heraus, wenn ich

300 mV durch 30 mV dividiere?

$$\frac{300}{30} * \frac{mV}{mV} = 10$$

Man sieht schön, dass sich die mV wegekürzen. Es kommt also eine reine Zahl heraus.

Jetzt noch die Herleitung der Leistungsformel $U * I = P$ in der Variante $U^2 / R = P$, weil $U / R = I$:

$$U * \frac{U}{R} = P$$

Wieder kann ich den Bruch umformen und erhalte $(U * U) / R$ oder eben U^2 / R .

Wenn ich also Einheiten oder Größen konsequent mitberücksichtige, erhalte ich nicht nur gültige Werte sondern auch die korrekten Einheiten dazu.