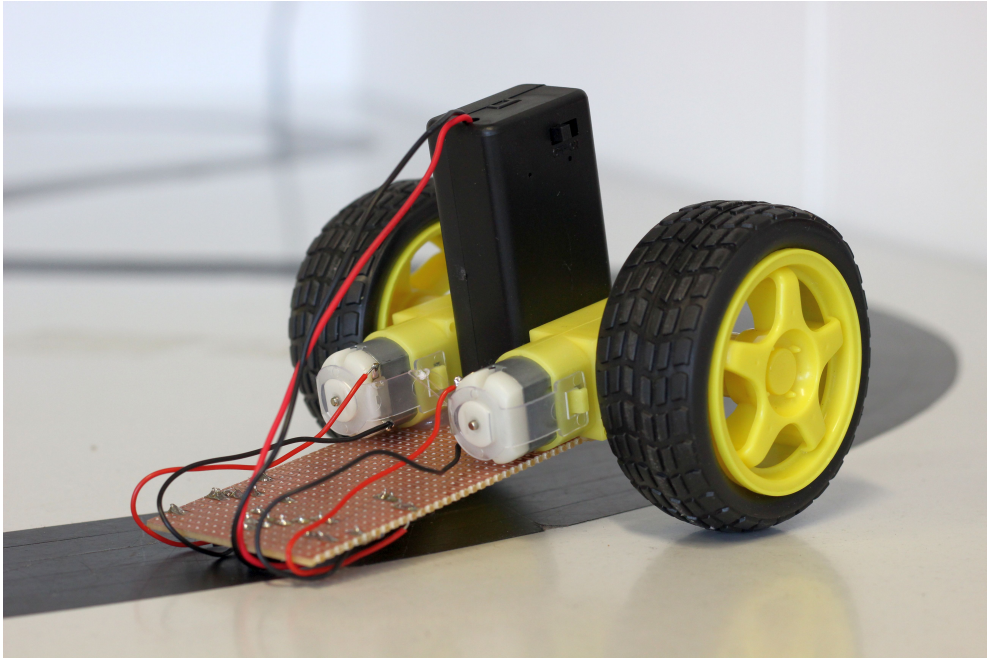
Projekt:
Elektromobil

Ein elektronischer Linienfolger



das Elektrotechnik- und Informatik-Labor der Fakultät IV
http://www.dein-labor.tu-berlin.de

Handout zum Projekt:

Elektromobil

Ein elektronischer Linienfolger

Inhaltsverzeichnis

1 Der Plan **1**

2 Elektrotechnik-Grundlagen **2**
2.1 Strom 3
2.2 Spannung 3
2.3 Widerstand 4
2.4 Diode 7
2.5 Transistor 8
2.6 Gleichstrommotor 9
2.7 Reflexkoppler 11

3 Die Schaltung **13**

4 Aufbau **15**

1 Der Plan

Das Ziel unseres Projekts ist ein kleiner Roboter, der auf einer Linie entlangfährt. Aber wie machen wir das? Wir brauchen

- einen fahrbaren Untersatz mit Rädern und Motoren (uns reichen zwei Räder),
- eine Art Auge oder Sensor, welches kontrolliert, ob wir noch auf der Linie sind oder nicht,
- eine Steuerung, die uns wieder auf die Linie lenken lässt.

Der große Trick bei diesem Projekt ist die Steuerung des Elektromobils mit Hilfe des Sensors, der nach unten auf den Boden »schaut«. Je nachdem, ob er eine helle oder eine dunkle Fläche »sieht«, wird entweder der linke oder der rechte Motor angetrieben. Es dreht sich also immer nur ein Rad. Was passiert mit einem zweirädrigen Auto, bei dem sich nur das rechte Rad dreht? Richtig, es fährt eine Linkskurve. Dreht sich nur das linke Rad, so fährt das Auto eine Rechtskurve. Und wenn ein Auto abwechselnd in Rechts- und in Linkskurven fährt, dann bewegt es sich vorwärts, wenn auch in Schlangenlinien. So ein Elektromobil nennt man auch *Linienfolger*.

In Abbildung 1 siehst du von oben, wie das Elektromobil um den Rand der schwarzen fetten Linie pendelt und sich dabei vorwärts bewegt. Das Rad, das sich gerade dreht, ist grün markiert. Das andere Rad, das gerade stillsteht, ist rot markiert.

Der Sensor ist das mit »S« beschriftete Quadrat. Er sitzt vorne an der Unterseite des Elektromobils. Wenn der Boden unter dem Sensor weiß ist (1), dann bewegt sich das Mobil nach rechts, weil sich das linke Rad dreht. Es fährt bis auf die schwarze Linie. Plötzlich ist der Boden unter

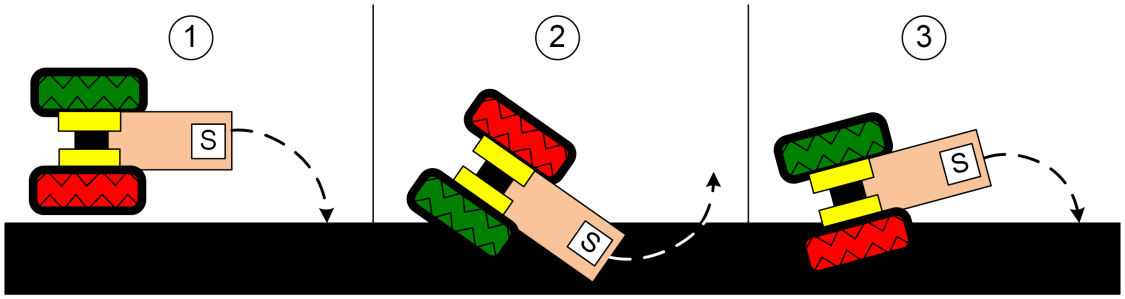


Abbildung 1: Bewegung eines Linienfolgers

dem Sensor schwarz (2). Nun dreht sich das rechte Rad. Das Mobil zieht nach links, bis der Rand der Linie überfahren wurde und der Sensor wieder eine weiße Fläche unter sich hat. Nun folgt wieder eine Rechtskurve (3). Und so pendelt das Mobil immer zwischen dem weißen Bereich außerhalb der schwarzen Linie und der schwarzen Linie selbst hin und her und schlängelt sich vorwärts. Das funktioniert auch, wenn die Linie gebogen ist oder sogar einen Rundkurs bildet. Dann kann dein Elektromobil ganz alleine Runde für Runde »autonom« fahren (beziehungsweise pendeln).

Was passiert, wenn du dein Elektromobil auf eine weiße Fläche stellst und weit und breit keine schwarze Linie in der Nähe ist? Richtig, es dreht sich im Kreis, denn das linke RAd wird sich ewig drehen und das rechte immer stillstehen.

Bevor wir nun mit dem Bauen loslegen, wollen wird dir die wichtigsten neuen Bauteile vorstellen, die dein autonom fahrendes Elektromobil braucht. Das sind natürlich die beiden Elektromotoren (einen für jedes Rad) und der Helligkeitssensor (ein sogenannter *Reflexkoppler*. Alles basiert auf Elektrotechnik. Aber was ist das überhaupt?

2 Elektrotechnik-Grundlagen

Die Elektrotechnik findet man an jeder Straßenecke. Überall blinkt es, große Leuchttafeln erzählen uns, was wir als nächstes kaufen sollen, und zu Hause flimmern im Fernseher die neuesten Nachrichten vor sich hin. Aber auch in der Natur finden wir die Elektrotechnik: wenn die grauen, dunklen Wolken am Himmel ihre Blitze zucken lassen.

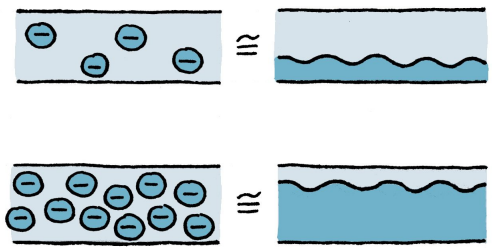
Richtig, ein Blitz ist reine Elektrizität. Die Elektrotechnik hat sich zur Aufgabe gemacht, die Elektrizität näher zu erforschen und dessen Auswirkungen zum Wohle der Menschheit einzusetzen. Wir lassen damit Lampen leuchten, Motoren drehen oder Musik erklingen.

WICHTIG
Die Elektrotechnik beschäftigt sich mit der Änderung von Strom und Spannung.

2.1 Strom

Wenn wir von einer »Strömung im Fluss« sprechen, weiß jeder, was damit gemeint ist. Ein großer Fluss heißt ja auch Strom. Wenn ein Fluss schnell fließt und viel Wasser enthält, dann hat er eine hohe Strömung. Das Gleiche gibt es in der Elektrotechnik. Statt Wasser im Flussbett haben wir ganz kleine Teilchen, die sich in einem Draht bewegen. Wir nennen diese Teilchen Ladungsträger und deren Bewegung Strom. Es gibt zwei unterschiedliche Arten von Ladungsträgern, man nennt sie negativ geladen oder positiv geladen.

Negativ geladene Teilchen heißen auch *Elektronen*. Sie beschreiben den Stromfluss und werden oft als kleine Kreise mit einem Minussymbol darin gemalt. Fließen wenige Elektronen pro Zeiteinheit durch einem Draht, dann sprechen wir von einer geringen Stromstärke (oben im Bild rechts). Sind es dagegen viele Ladungsträger, so sprechen wir von einer hohen Stromstärke (unten im Bild).

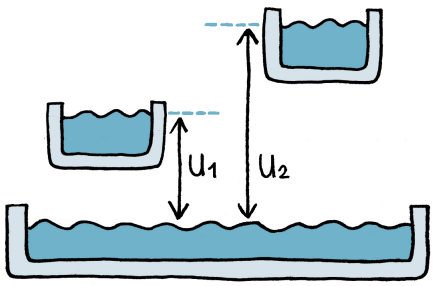


WICHTIG
Wenn sich in der Elektrotechnik Ladungsträger bewegen, spricht man von *Strom*.
Formelzeichen: I für die Stromstärke
Einheit: A (*Ampere*) zum Andenken an den Physiker *André Marie Ampère*

2.2 Spannung

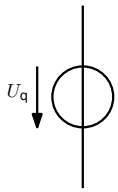
Wie fließt ein Fluss? Natürlich nur bergab, denn auf das Wasser wirkt die Erdanziehungskraft. Sie ist die Ursache der Strömung. Alles »will« nach unten: ein Apfel, den ich fallen lasse, oder das Wasser, das bergab fließt. In der Elektrotechnik gibt es ebenfalls eine Ursache für Stromfluss, diese nennen wir Spannung (auch Potentialunterschied genannt). Nur wenn Spannung vorhanden ist, bewegen sich die Ladungsträger. Nur dann also fließt Strom.

Du kannst dir eine kleinere oder höhere Spannung so vorstellen, als hättest du zwei obere Wasserbecken in unterschiedlichen Höhen und ein unteres Wasserbecken. Je höher das obere Becken, desto höher ist die Spannung (im Bild U_1 und U_2 genannt). Noch fließt hier kein Wasser. Aber sobald die Becken über Rohrleitungen miteinander verbunden werden, kann Wasser von den oberen Becken in das untere fließen.



WICHTIG
Spannung ist die Ursache, die Ladungsträger in Bewegung setzt.
Formelzeichen: U
Einheit: V (*Volt*) zum Andenken an den Physiker *Alessandro Volta*

In der Elektrotechnik gibt es Schaltungssymbole, damit jeder elektrotechnisch Begeisterte auf der Welt weiß, was man für Bauteile in einer Schaltung gemeint sind. Rechts siehst du das Symbol für eine Spannungsquelle.

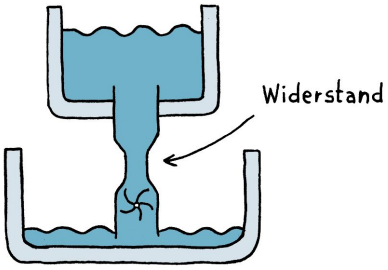


Wir haben Spannung und Strom kennengelernt. Jetzt brauchen wir noch die Bauteile, die es uns ermöglichen Strom und Spannung zu ändern.

2.3 Widerstand

Widerstand ist, wenn man sich gegen etwas wehrt! Das Bauelement *Widerstand* macht dies auch, es »wehrt sich« gegen den Stromfluss. Tatsächlich reduziert ein Widerstand die Stromstärke.

Mithilfe unseres Wassermodells kannst du dir das so vorstellen, dass der Widerstand den Querschnitt des Wasserrohrs reduziert. Die Wasserteilchen müssen sich durch die Engstelle hindurchquetschen und verlieren an Schwung. Dadurch kann im Vergleich zum Rohr ohne Verengung nur eine reduzierte Menge Wasser (Strom) in einer bestimmten Zeit durch das Rohr fließen.



Den Zusammenhang zwischen Widerstand, Spannung und Stromstärke kann man auch in einer Formel ausdrücken.

In der Formel nennen wir den Widerstandswert R (wegen des englischen Worts *resistor* für Widerstand), den Spannungswert U und den Wert der Stromstärke I. Diese für Elektrotechniker sehr wichtige Formel lautet:

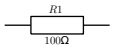
$$\boxed{R = \frac{U}{I}}$$

Die Formel bedeutet, der Widerstandswert ist gleich dem Ergebnis von Spannungswert geteilt durch Stromstärke. Weil man die Spannung U in Volt (V) misst, und die Stromstärke I in Ampere (A), ergibt sich, dass man den Widerstand $R = \frac{U}{I}$ in der Einheit $\frac{V}{A}$ misst. Der Widerstand ist allerdings eine so wichtige Größe, dass man der Einheit $\frac{V}{A}$ den Namen Ohm gegeben hat (nach dem Entdecker der Formel, dem Forscher Georg Simon Ohm). Die Formel heißt daher auch *Ohmsches Gesetz*. Häufig wird die Einheit Ohm durch den griechischen Buchstaben Omega (Ω) abgekürzt.

WICHTIG

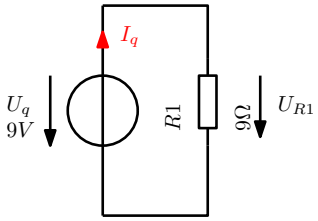
Je höher der *Widerstand*, desto mehr Spannung braucht man, um einen bestimmten Strom fließen zu lassen.
Formelzeichen: R
Einheit: Ω, (Ohm), zum Andenken an den Physiker *Georg Simon Ohm*

In Schaltplänen wird ein Widerstand anhand eines rechteckigen Schaltsymbols dargestellt. Das ähnelt auch dem Bauteil, welches aussieht wie eine kleine, mit bunten Ringen bemalte Walze:

Schaltsymbol: 

Bauteil:

Nun können wir mehr oder weniger Ladungsträger durch einen Widerstand fließen lassen, also mehr oder weniger Strom. Schauen wir uns dazu das Beispiel rechts an, in dem eine Spannungsquelle mit einer Spannung von $U_q = 9V$ mit einem Widerstand $R_1 = 9\Omega$ verbunden wird:



Wir suchen den Strom I_q in unserer Schaltung. Dazu brauchen wir die Spannung U_{R1} am Widerstand R_1. Dazu muss man wissen, dass alle Spannungen in einer Schaltung zusammengerechnet Null ergeben müssen. Mit dieser Bedingung kommen wir auf die Spannung U_{R1}. Wir rechnen $0 = U_q - U_{R1}$. Warum $-U_{R1}$? Wir starten in Richtung des Pfeiles U_q. Alle Pfeile, die in die gleiche Richtung laufen, werden addiert, und alle die entgegen laufen, werden subtrahiert. U_{R1} läuft entgegen und wird daher subtrahiert. Stellen wir die Gleichung um, so werden wir sehen, dass $U_{R1} = U_q$ ist. Da $U_q = 9V$ ist und die Spannung über R_1 die gleiche ist, liegt an dem Widerstand die Spannung von $U_{R1} = 9V$ an. Jetzt können wir mithilfe des ohmschen Gesetzes die Stromstärke I_q ausrechnen:

$$I_q = \frac{U_q}{R1} = \frac{9V}{9\Omega} = 1A$$

Um den Wert eines Widerstands abzulesen, muss man die Farben der aufgedruckten Ringe (siehe Abbildung 2) interpretieren. Es gibt meistens vier oder fünf Ringe. Bei vier Ringen entsprechen die ersten beiden Ziffern dem Zahlenwert, der dritte steht für einen Multiplikator, mit dem der Zahlenwert multipliziert wird. Bei 5 Ringen ist es ähnlich, nur stehen hier die ersten drei Ziffern für den Zahlenwert, und der vierte Ring steht für den Multiplikator.

Errätseln wir als Beispiel einen Widerstand mit vier Ringen mit den Farben Braun-Schwarz-Rot-Gold. Weil Gold und Silber nicht an erster Stelle stehen dürfen, wissen wir, dass Braun der erste, und Schwarz der zweite Ring ist. Der Tabelle können wir nun entnehmen, dass Braune für 1 steht und Schwarz für 0. Reihe die Zahlenwerte aneinander, dann erhältst du die Zahl 10.

Der Multiplikator ist der dritte Ring (Rot). Diese Farbe steht laut Tabelle für 100Ω. Der Widerstandswert ist also: $10 * 100\Omega = 1000\Omega = 1k\Omega$.

Der letzte Ring (Gold) sagt etwas darüber aus, wie zuverlässig diese Angabe ist, denn bei der Produktion gibt es immer gewisse Abweichungen vom Sollwert. In diesem Fall ist es Gold, somit

ist die Abweichung garantiert kleiner als 5% des Widerstandswertes, also $+/-50\Omega$.

Falls du keine Lust hast, jedes Mal ein Rätsel zu lösen, wenn du den Wert eines Widerstands bestimmen willst, kannst du den Wert auch einfach mit dem Multimeter messen oder eine App wie *Electrodroid* verwenden.

Farbe		1. Ring	2.(3.) Ring	3.(4.) Ring	4.(5.) Ring
		1. Ziffer	**2. Ziffer**	**Multiplikator**	**Toleranz**
----------	Keine	--------	--------	----------	± 20 %
	Silber	--------	--------	0,01 Ω	± 10 %
	Gold	--------	--------	0,1 Ω	± 5 %
	Schwarz	--------	0	1 Ω	----------
	Braun	1	1	10 Ω	± 1 %
	Rot	2	2	100 Ω	± 2 %
	Orange	3	3	1 $k\Omega$	----------
	Gelb	4	4	10 $k\Omega$	----------
	Grün	5	5	100 $k\Omega$	± 0,5 %
	Blau	6	6	1 $M\Omega$	± 0,25 %
	Violett	7	7	10 $M\Omega$	± 0,1 %
	Grau	8	8	100 $M\Omega$	± 0,05 %
	Weiß	9	9	1 $G\Omega$	----------

Abbildung 2: Farbcode von Widerständen

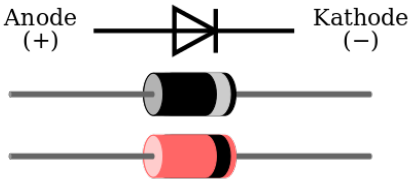
Extrem wichtig !!!

Elektronik-Profis sind faul. Sie haben sich angewöhnt, bei sehr großen Zahlen nicht immer alle Stellen auszuschreiben, sondern sie mit Buchstaben abzukürzen. Dabei gibt es für jeweils einen Faktor von tausend einen anderen Buchstaben. Statt 120000Ω würde man einfach $120k\Omega$ schreiben. Es ist in einer Schaltung natürlich nicht egal, ob der Widerstand (oder ein beliebiges anderes Bauelement) plötzlich um den Faktor 1000 größer oder kleiner ist! Ein vergessenes oder überlesenes k oder M ist häufig der Grund dafür, warum die aufgebaute Schaltung nicht das tut, was sie tun soll.

Potenz	Faktor	Abkürzung
10^6	1000000	M (*Mega*)
10^3	1000	k (*Kilo*)
10^0	1	-
10^{-3}	0.001	m (*Milli*)
10^{-6}	0.000001	U (*Mikro*)
10^{-9}	0.000000001	n (*Nano*)

2.4 Diode

Dioden sind *Halbleiterbauelemente*: sie leiten den Strom (je nach Temperatur) mal mehr, mal weniger gut. Das Schaltzeichen der Diode ist ein Dreieck mit einem senkrechten Strich an der Spitze. Wenn das Dreieck in einem Stromkreis in Richtung Minuspol weist, dann ist die Diode richtig herum (in *Durchlassrichtung*) eingebaut und lässt den Strom hindurchfließen. Weist das Dreieck in Richtung Pluspol, so lässt die Diode keinen Strom durch (sie *sperrt*, bzw. ist in *Sperrichtung* eingebaut).



Die Anschlussbeinchen einer Diode werden auch *Kathode* (K) und *Anode* (A) genannt. Beim Bauteil ist die Kathode mit einem Ring gekennzeichnet. Manche Dioden leuchten, wenn sie in Durchlassrichtung eingebaut sind. Das sind LEDs (*Licht emittierende Dioden*) und haben beim Schaltsymbol kleine Pfeile am Dreieck, welche Lichtstrahlen symbolisieren sollen.

Eine Diode direkt am Pluspol einer Schaltung heißt auch *Gleichrichterdiode*. Sie dient dazu die Schaltung zu schützen, falls du aus Versehen die Batterie falsch herum anschließt. In diesem Fall kann kein Strom durch die Schaltung fließen, weil die Diode dann sperrt. Das kannst du dir wie ein Rückschlagventil mit einer Kugel und einer Sprungfeder in einem Wasserrohr vorstellen: Wenn ein Druck (eine Spannung) auf dieses Ventil (Diode) in Sperrrichtung wirkt, wird der Wasserfluss (Strom) blockiert. In Durchlassrichtung muss der Druck (die Spannung) groß genug sein, um die Federkraft des Ventils zu überwinden. Dadurch öffnet das Ventil (die Diode) den Durchlass, und der Strom kann fließen. Diesem Druck, welcher im Wassermodell zum Überwinden der Federkraft notwendig ist, entspricht bei einer Diode die so genannte *Schwellenspannung*, die in Flussrichtung an der Diode anliegen muss, damit sie leitend wird. Bei gewöhnlichen Siliziumdioden liegt diese Spannung bei ca. 0,6 - 0,7 V.

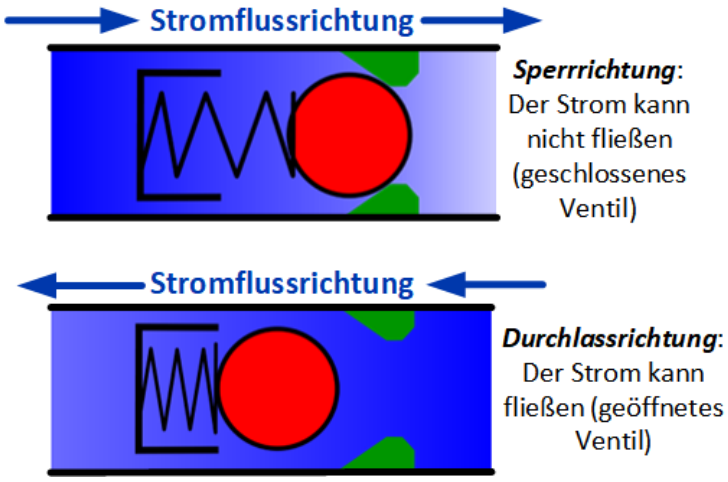


Abbildung 3: Diode als Rückschlagventil in Durchlass- und Sperrrichtung

Weil Dioden von sich aus den Strom nicht begrenzen, darf man sie niemals ohne Widerstand (genannt Vorwiderstand) an eine Spannungsquelle anschließen. Dioden vertragen ungefähr 20 bis 50 mA. Ein höherer Strom würde sehr schnell zum Tod des Bauelementes führen. Den Vorwiderstand berechnest du so:

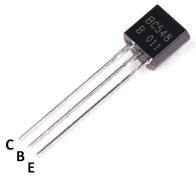
$$R_{Vor} = \frac{U_B - U_D}{I_D}$$

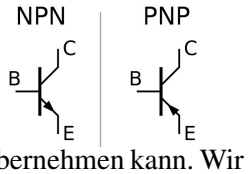
R_{Vor}: gesuchter Vorwiderstand,
U_B: vorhandene Betriebsspannung,
U_D: Durchlassspannung der Diode (aus Datenblatt),
I_D: Durchlassstrom der Diode (aus Datenblatt)

Mit den Beispielwerten $U_B = 9V$, $U_D = 1,6V$ und $I_D = 30mA$ erhältst du $R_{Vor} = 247\Omega$.

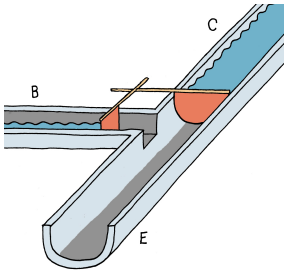
2.5 Transistor

Ein Transistor ist ein elektronisches Halbleiterbauelement, das zum Schalten und Verstärken von elektrischem Strom verwendet wird. Er hat drei Anschlussbeinchen. Sie haben die Namen Basis (B), Kollektor (C) und Emitter (E). Im Schaltsymbol sind die Anschlüsse normalerweise nicht beschriftet, aber man erkennt die Basis, die im rechten Winkel zu den anderen beiden Anschlüssen steht. Je nach Transistortyp weist ein Pfeil dann entweder Richtung Emitter (dieser Typ heißt NPN-Transistor) oder Richtung Basis (dann ist es ein sogenannter PNP-Transistor).

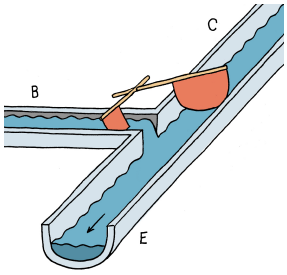




Das Tolle an einem Transistor ist, dass er gleich zwei wichtige Funktionen übernehmen kann. Wir können ihn als Schalter nutzen oder als Stromverstärker. Oder als eine Kombination aus beidem. Wie ein Transistor funktioniert, schauen wir uns das Ganze zunächst einmal wieder an unserem Wassermodell an. Hier entsprechen die drei Anschlüsse eines Transistors drei Rohrenden, die zu einem T-Stück verbunden sind. Das eine Rohr (die Basis) ist erheblich enger als das damit verbundene Rohr (mit den Enden Kollektor und Emitter). Und ganz wichtig: Es gibt zwei miteinander verbundene Klappen, in jedem Rohr eine. Ist die Spannung an B sehr klein, dann fließt im Basis-Rohr zu wenig Wasser, um die kleine Klappe zu bewegen. Dann kann auch im breiteren Rohr kein Wasser fließen, auch wenn dort vielleicht mehr Wasser gegen die große Klappe drückt – die große Klappe kann nur durch die kleinere geöffnet werden!



Nun wird durch eine Schaltung an der Basis eine Spannung erzeugt: Der Wasserdruck im engen Basis-Rohr steigt und kann die kleine Klappe bewegen. Sie öffnet sich, und ein wenig Wasser fließt von der Basis in das große Rohr, wo es Richtung Emitter weiterfließt. Gleichzeitig öffnet sich mit der kleinen Klappe durch die mechanische Verbindung auch die große. Das bisher am Kollektor angestaute Wasser fließt jetzt ungehindert vom Kollektor durch das große Rohr zum Emitter. Der Strom wurde hier nicht nur eingeschaltet, seine Stromstärke ist im Vergleich zum Basis-Emitter-Strom auch erheblich höher. Man sagt, der Transistor »steuert durch«.



Die Spannung, die man an der Basis braucht, damit der größere Strom vom Kollektor zum Emitter fließen kann, beträgt etwa $0,7V$. Eine kleine Spannungsänderung an der Basis kann also eine große Änderung beim Strom vom Kollektor zum Emitter bewirken. Der Strom kann bis zu 1000-fach verstärkt werden!
Transistoren sind sehr wichtige elektronische Bauteile. Es gibt eigentlich keine elektronischen Geräte ohne Transistoren. Alleine in einem einzigen PC oder einem Smartphone sind mehrere Milliarden davon verbaut – allerdings sind diese sehr viel kleiner als die Transistoren, die wir hier benutzen werden.

2.6 Gleichstrommotor

Der Elektromotor ist ein Bauteil, welches die elektrische Energie in eine Bewegung umsetzt. Voraussetzung dafür ist das Prinzip, dass bewegte Ladungsträger ein Magnetfeld erzeugen (genannt *elektromagnetisches Prinzip*). Also fangen wir am besten damit an.

Magnetfeld

Die Drehbewegung wird durch Magnetkraft erzeugt. Magnete kennst du bestimmt. Sie haften beispielsweise am Kühlschrank oder an anderen Eisenoberflächen. Magnete ziehen andere Magnete an oder stoßen sie ab. Ein Magnet hat immer einen Nord- und Südpol. Zwischen diesen beiden Polen wirkt die Magnetkraft (man nennt sie auch magnetisches Feld).

Wenn du zwei Magnete mit ihren gleichartigen Polen aufeinander zu bewegst, dann kannst du die Magnetkraft spüren: Die Magnete stoßen sich ab. Wenn du zwei verschiedenartige Pole aufeinander zu führst, dann merkst du: Die Magnete ziehen sich an.

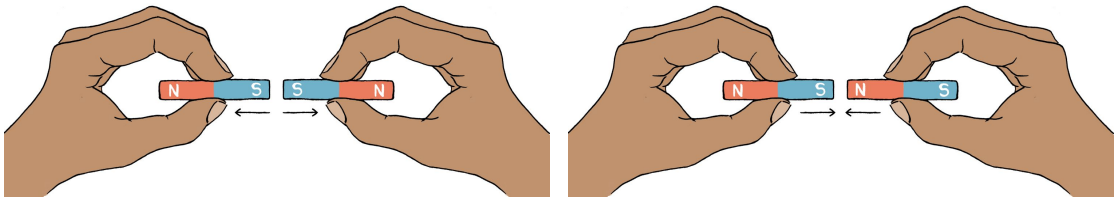
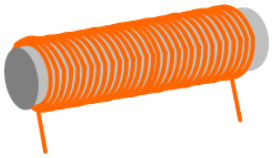


Abbildung 4: Magnetkraft

Das elektromagnetische Prinzip

Was haben Magnete mit Elektrizität zu tun? Dahinter steckt das sogenannte *elektromagnetische Prinzip*. Das bedeutet, dass ein Draht, der von Strom durchflossen wird, ein magnetisches Feld bekommt: Es wirkt eine Magnetkraft im Kreis um den Draht herum.

Wickelt man den Draht in engen Schlaufen auf, dann erhält man eine *Spule*. In der Spule addieren sich die vielen kleinen Magnetkräfte, die rund um den Draht herum wirken, zu einer großen Magnetkraft, die durch das Loch der Spule wirkt (natürlich nur, falls Strom durch den Draht fließt). Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule ist viel stärker als das von einem einfachen Draht. Meistens wird diese Spule auf einen Eisenstab gewickelt, das verstärkt das magnetische Feld noch mehr. Eine solche auf einen Eisenstab gewickelte Spule heißt *Elektromagnet*.



Kühlschrankmagnete haben dauerhaft magnetische Kräfte, sonst würden sie plötzlich vom Kühlschrank fallen. Sie werden daher Dauermagnete genannt. Die Magnetkraft von Elektromagneten besteht nur, solange Strom durch sie hindurchfließt. Hört der Stromfluss auf, dann hört auch die Magnetkraft auf. Diese Effekte von Dauermagneten und Elektromagneten werden kombiniert, um mit Hilfe von elektrischem Strom eine Motorachse zum Drehen zu bringen.

Die Spule dreht sich

In einem Elektromotor wird eine Spule beweglich innerhalb eines Dauermagneten positioniert (im Bild hat der Dauermagnet Hufeisenform). Man könnte beispielsweise den Eisenkern der Spule mit einem Nagel in der Mitte lose auf dem Untergrund befestigen, so dass die Spule um den Nagel rotieren kann.

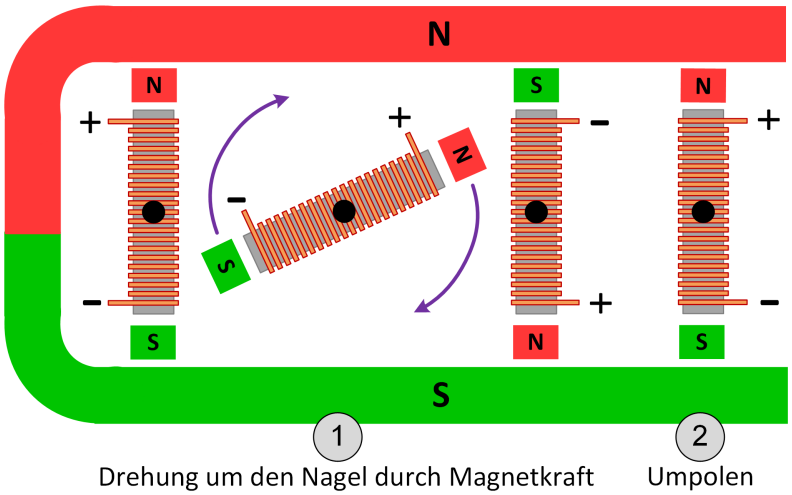


Abbildung 5: Wirkungsprinzip eines Elektromotors

Wird nun die Spule von Strom durchflossen und zum Magneten, so wird ihr Nordpol vom Nordpol des Dauermagneten abgestoßen und ihr Südpol vom Südpol des Dauermagneten. Die Spule dreht sich ein Stück, und zwar so weit, bis ihr Nordpol so nah wie möglich an den Südpol des Dauermagneten herangekommen ist (1). Immerhin, eine halbe Umdrehung ist schon geschafft. Der Elektromotor soll jedoch nicht nur eine halbe Umdrehung machen, sondern sich

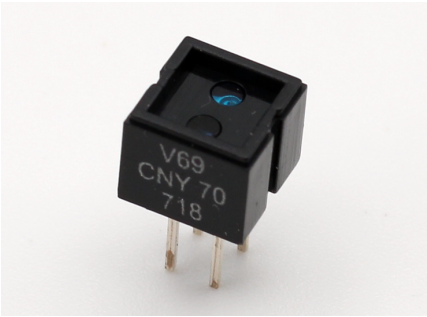
ständig weiterdrehen. Nur so kann er schließlich ein Rad unseres kleinen Elektromobils zum Rollen bringen. Wie bekommt man das hin?

Ganz einfach! Durch Umpolen der Spannung kann man die Stromrichtung umdrehen und damit auch die Richtung der Magnetkraft der Spule (2). Nun ist plötzlich der Südpol der Spule ganz nah am Südpol des Dauermagneten. Was passiert? Die Pole stoßen sich ab, und die Spule dreht sich wieder weiter.

Damit die Spule nicht zum Stillstand kommt, wird die an ihr angelegte Spannung immer wieder umgepolt und so ihre magnetischen Pole immer wieder vertauscht. Die drehende Spule ist dann die Drehachse unseres Elektromotors, an der wir das Rad des Elektromobils befestigen.

2.7 Reflexkoppler

Der Reflexkoppler steuert in deiner Schaltung die Fahrtrichtung deines Elektromobils: er schaltet je nach Farbe des Untergrunds (schwarz oder weiß) den linken oder den rechten Motor an. In Abbildung 6 links kannst du ihn sehen: eine kleine Box mit zwei Löchern auf der Oberseite, wobei in einem der beiden Löcher eine bläuliche LED schimmert.



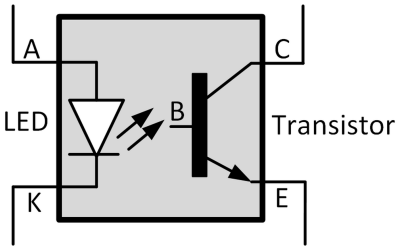


Abbildung 6: Reflexkoppler: Bauteil und innerer Aufbau

Ins Innere hineingeschaut

Wenn du ins Innere eines Reflexkopplers schaust oder besser auf sein Schaltbild (Abbildung 6 rechts), erkennst du zwei dir bekannte Bauteile: eine Leuchtdiode (LED) und einen Transistor.

Die LED hat zwei Anschlussbeinchen, die Anode (A) und die Kathode (K). Der Transistor hat drei Anschlussbeinchen, die Basis (B), den Kollektor (C) und den Emitter (E), wie du vielleicht noch weißt. Du siehst aber, dass nur der Kollektor und Emitter nach außen geführt sind, denn sonst hätte der Reflexkoppler fünf Anschlussbeinchen.

Was machen die LED und der Transistor nun gemeinsam in diesem kleinen Würfel?

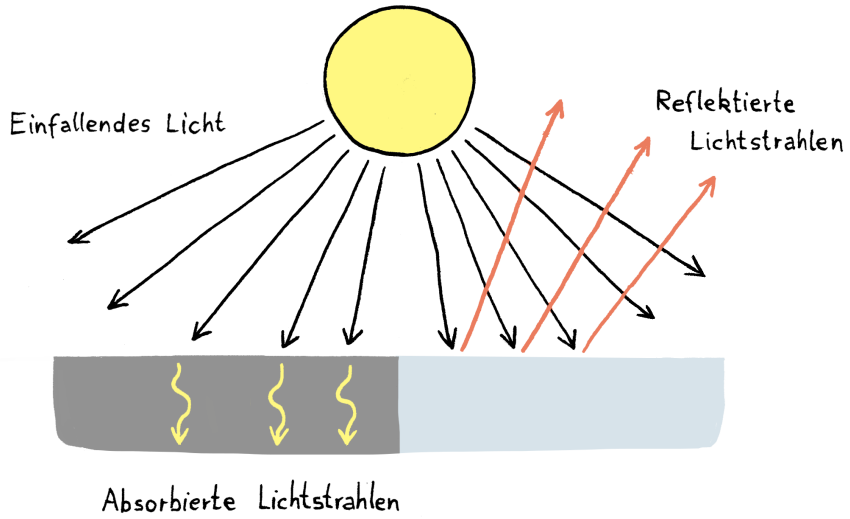
Bei der Leuchtdiode handelt es sich um eine Infrarot-LED. Sie versteckt sich hinter dem blauen runden Fenster des Reflexkopplers. Ihr Licht kannst du mit bloßem Auge nicht sehen. Durch eine Kamera betrachtet, beispielsweise durch die eines Smartphones, kannst du jedoch die lila leuchtende LED erkennen, wenn Strom durch sie hindurchfließt.

Im Schaltbild des Reflexkopplers erkennst du, dass der Basisanschluss des Transistors im Inneren des Reflexkopplers liegt. Diese Basis ist ein lichtempfindlicher Sensor, der auf einfallendes

Licht reagiert. Die einfallenden Lichtteilchen (Photonen) haben so viel Energie, dass sie wie ein in die Basis fließender Strom wirken und somit den Kollektor-Emitter-Strom einschalten. Einen solchen Transistor nennen wir *Phototransistor*. Seine lichtempfindliche Basis befindet sich hinter dem dunklen Fenster auf der Oberseite des Reflexkopplers.

Da siehst du Schwarz

Du kennst das sicherlich aus dem Sommer. Scheint die Sonne und du hast ein schwarzes T-Shirt an, wird dir ziemlich schnell heiß. Tauschst du dein schwarzes T-Shirt aber gegen ein weißes, erträgst du die heißen Sonnenstrahlen wesentlich besser. Das liegt daran, dass schwarze bzw. dunkle Oberflächen Licht schlucken. Man sagt auch, sie absorbieren das einfallende Licht. Weiße oder helle Oberflächen hingegen werfen die eintreffenden Lichtstrahlen zurück. Man spricht hier davon, dass sie das einfallende Licht reflektieren:



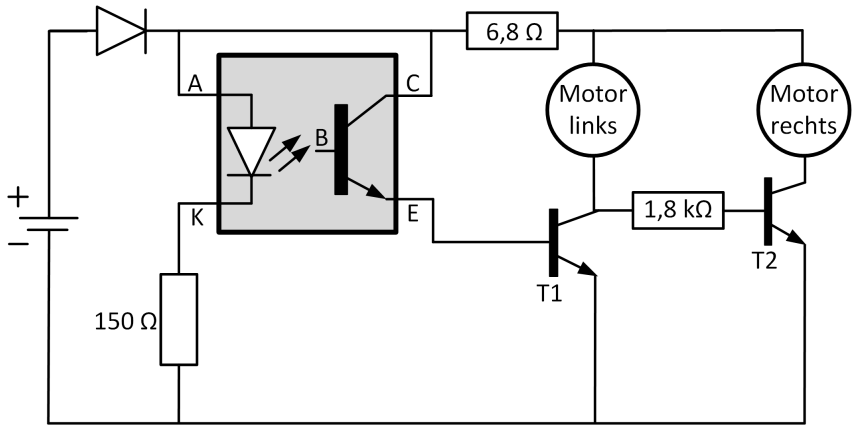
Diese Eigenschaft wollen wir auch für unser Elektromobil nutzen. Unser Reflexkoppler wird später unten am Elektromobil angebracht, so dass seine zwei kleinen Fenster auf den Boden gerichtet sind. Wird die LED im Reflexkoppler von Strom durchflossen und beginnt zu leuchten, so wird ihr Licht von der Oberfläche des Bodens entweder reflektiert oder absorbiert. Das hängt davon ab, ob das Licht der LED auf den weißen Untergrund oder auf die schwarze Linie strahlt.

Wird das Licht vom Untergrund reflektiert (der Boden ist also hell), so treffen die reflektierten Lichtstrahlen auf den lichtempfindlichen Sensor des Phototransistors. Nun kann der Phototransistor durchsteuern und ein Strom fließt zwischen Kollektor und Emitter. Den wollen wir nutzen, um einen der beiden Motoren zum Drehen zu bringen. Wird das Licht jedoch absorbiert (der Boden ist also dunkel, weil das Licht auf die schwarze Linie strahlt), dann kann der Phototransistor auch nicht durchschalten. In diesem Fall soll unsere Schaltung den anderen Motor zum Drehen bringen.

Durch dieses abwechselnde An- und Abschalten der beiden Motoren wackelt das kleine Elektromobil also hin und her und folgt der schwarzen Linie in ganz eigenen Schlangenlinien.

3 Die Schaltung

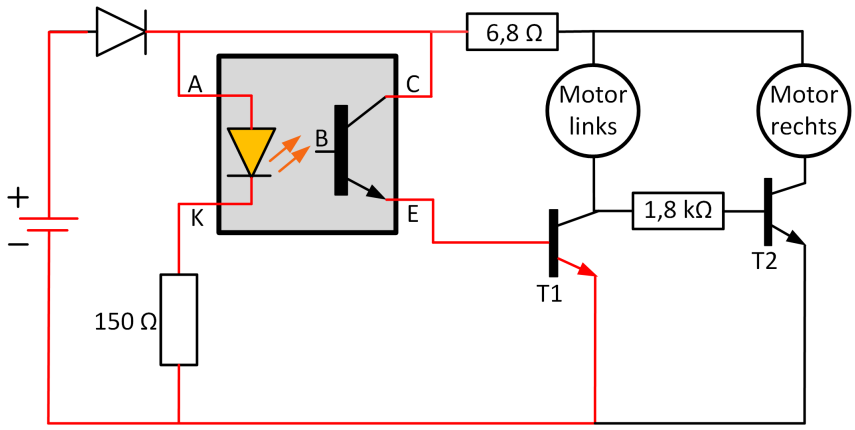
Im Schaltplan unseres Elektromobils siehst du, wie die beiden Motoren mit den anderen Bauteilen verbunden sind, um die Räder abhängig von der Untergrundfarbe zum Rollen zu bringen:



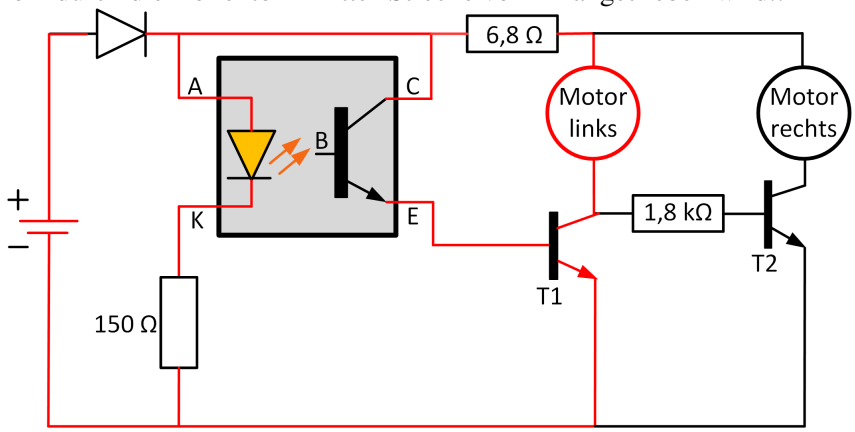
Als Energiequelle verwenden eine 9V-Blockbatterie. Außerdem siehst du den Reflexkoppler, die beiden Motoren, zwei Transistoren, drei Widerstände und eine Gleichrichterdiode direkt am Pluspol der Batterie. Die Diode dient dazu, die Schaltung zu schützen, falls du aus Versehen die Batterie falsch herum anschließt.

Den *Reflexkoppler* kannst du gut erkennen. In der Schaltung wurde er durch einem Vorwiderstand von 150Ω zur Strombegrenzung ergänzt, damit seine Infrarot-LED nicht kaputt geht.

Schauen wir uns zunächst an, was passiert, wenn du dein Elektromobil auf weißen Untergrund links neben die fette schwarze Linie setzt. Der Reflexkoppler »sieht« den hellen Untergrund. Der reflektiert das Licht der LED, was dazu führt, dass die lichtempfindliche Basis des im Reflexkoppler eingebauten Transistors so viel Strom bekommt, dass der Transistor im Reflexkoppler durchsteuert. Im Bild siehst du, wie der Strom nun durch die Kollektor-Emitter-Strecke im Reflexkoppler fließt und damit auch durch die Basis-Emitter-Strecke von Transistor T1:



Das führt dazu, dass Transistor T1 nun ebenfalls durchsteuert. Es dreht sich der linke Motor, der vom Strom durch die Kollektor-Emitter-Strecke von T1 angetrieben wird:.

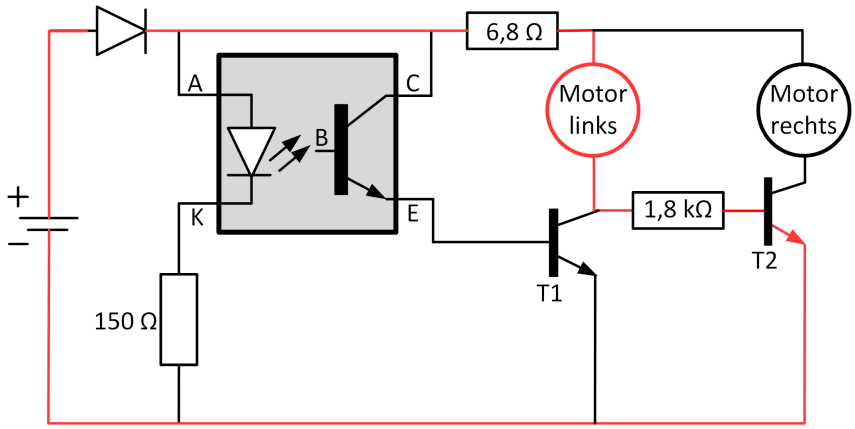


Der Widerstand von $6,8\Omega$ dient dazu, die Spannung so zu begrenzen, dass sich die Motoren nicht zu schnell drehen. Wenn am Ende alles funktioniert, aber du der Meinung bist, dass dein Elektromobil zu langsam ist, dann kannst du diesen Widerstand durch einen mit einem kleineren Wert ersetzen. Davon wird dein Elektromobil schneller.

Solange der Reflexkoppler auf hellen Untergrund schaut, wird sich der linke Motor drehen und das Elektromobil also eine Rechtskurve fahren.

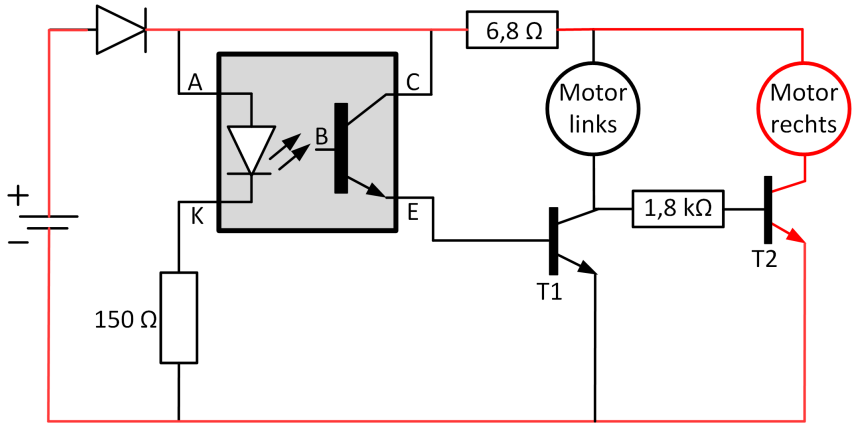
Kaum hat sich das Auto ein Stück nach rechts bewegt, strahlt die Infrarot-LED schon auf dunklen Untergrund, weil sie die schwarze Linie erreicht hat. Das Licht der Infrarot-LED wird vom Untergrund absorbiert, die lichtempfindliche Basis des im Reflexkoppler eingebauten Transistors bekommt keinen Strom mehr ab. Der Transistor im Reflexkoppler kann also nicht mehr durchsteuern. Da kein Strom durch die Kollektor-Emitter-Strecke im Reflexkoppler fließt und damit auch nicht in die Basis von Transistor T1, sperrt dieser Transistor. Findet der Strom nun einen anderen Weg durch die Schaltung?

Tatsächlich, es gibt noch den Weg über den linken Motor durch den Widerstand von $1,8k\Omega$ über die Basis-Emitter-Strecke von T2. Den neuen Weg für den Strom siehst du hier:



Diesen Weg hat der Strom nicht genommen, solange T1 noch passierbar war, denn über T1 war der Widerstand ja viel geringer. Jetzt aber, wo T1 sperrt, bleibt kein anderer Weg übrig.

Da nun die Basis-Emitter-Strecke von T2 vom Strom durchflossen wird, kann T2 durchsteuern: der Strom fließt nun über die Kollektor-Emitter-Strecke von T2 und treibt den rechten Motor an:



Der rechte Motor dreht sich, solange der Untergrund schwarz ist. Das Elektromobil fährt nun eine Linkskurve. »Sieht« der Reflexkoppler wieder eine weiße Fläche unter sich, so beginnt das Spiel von vorne.

4 Aufbau

Jetzt geht es los! Du baust ein kleines Elektromobil auf zwei Rädern zum autonomen Fahren entlang einer schwarzen Linie.

Was du brauchst...

Wir haben für dich auch schon herausgefunden, wo du die Sachen kaufen kannst – nämlich bei den Internet-Versandhändlern Segor, Reichelt, Pollin, Conrad und Opitec.

» Segor: https://www.segor.de/

» Reichelt: https://www.reichelt.de/

» Pollin: https://www.pollin.de/

» Conrad: https://www.conrad.de/

» Opitec: https://www.opitec.de/

Die Firma Conrad hat in vielen Städten auch Filialen, wo du hingehen kannst. Der Einfachheit halber haben wir die genauen Bezeichnungen und die Artikelnummern bei den Bauteilen schon dazu geschrieben. Die Preise sind nur grobe Richtlinien und waren aktuell, als wir die

Bauanleitung geschrieben haben. An Werkzeug benötigst du einen Lötkolben und Lötzinn, eine Entlötpumpe, einen Seitenschneider, Permanentmarker Stärke M in vier Farben, sowie eine Heißklebepistole.

Eine Übersicht, wo du Werkzeuge und nützliche Geräte für Elektronik-Profis wie ein Multimeter bekommst, findest du in unserer Übersicht *TU-it-yourself-Grundausstattung* http://www.dein-labor.tu-berlin.de/sites/default/files/TU-it-yourself-Grundausstattung.pdf.

Eine Anleitung zum Löten findest du in unserem *TU-it-yourself-Lötkurs* http://www.dein-labor.tu-berlin.de/sites/default/files/TU-it-yourself-Loetkurs_0.pdf.

Bauteile für die Schaltung

» einen Widerstand 150Ω, 1 Watt
Conrad: Metallschicht-Widerstand 150 Ohm 1 W, B.nr. 1585432 - 62 (0,07 €)

» einen Widerstand $6,8\Omega$, 1 Watt
Conrad: Metallschicht-Widerstand 6,8 Ohm 1 W, B.nr. 419303 - 62 (0,18 €)

» einen Widerstand $1,8k\Omega$
Pollin: Widerstand-Sortiment B.nr. 221464 (7,25 €)

» einen Reflexkoppler CNY70
Conrad: CNY70 Reflective Optical Sensor B.nr. 800201610 - 62 (3,03€für 5 Stück)

» eine Gleichrichterdiode 1N4001
Conrad: Gleichrichterdiode B.nr. 162213 - 62/ 0,02 €)

» zwei Transistoren BD679
Reichelt: BD679 Darlington Transistor Art.-Nr.: BD 679 (0,28 €)

» vier Stücke Schaltdraht, 7cm lang, zwei in Rot, zwei in Schwarz
Segor: Schaltdraht YV 0,5mm schwarz und rot (je 1,90 €für 10m)

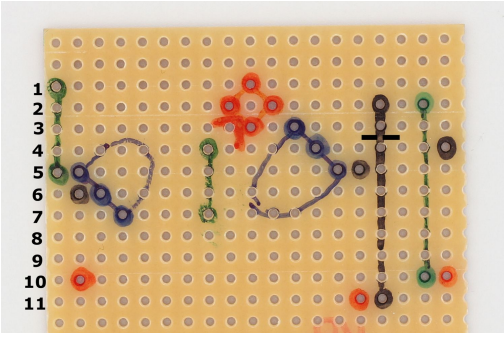
» zwei einachsige Elektro-Getriebemotoren mit passenden Laufrädern
Opitec: Getriebemotor, ein Abtrieb, 120:1 Art.-Nr.: 213704 (2,29 €)
Opitec: Luftreifen auf Felge, groß ø 70 mm Art.-Nr.: 815560 (1,49 €)

» eine 9V-Blockbatterie
aus dem Supermarkt (1,00 €)

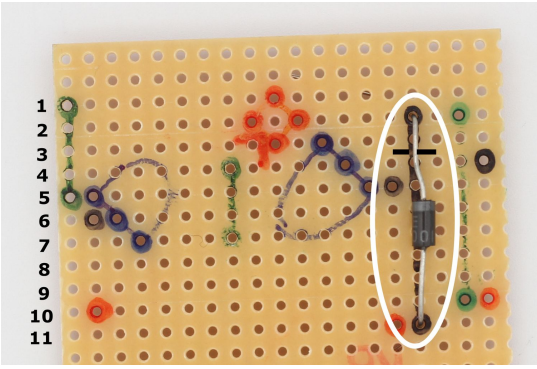
» einen Batteriehalter für eine 9V-Blockbatterie
Reichelt: Batteriehalter 9V Block Art.-Nr.: HALTER 1X9VS (0,93 €)

» eine Streifenrasterplatine 50 x 100 mm groß
Pollin: Streifenrasterplatine B.nr. 440457 (6,50 €für 10 Stück)

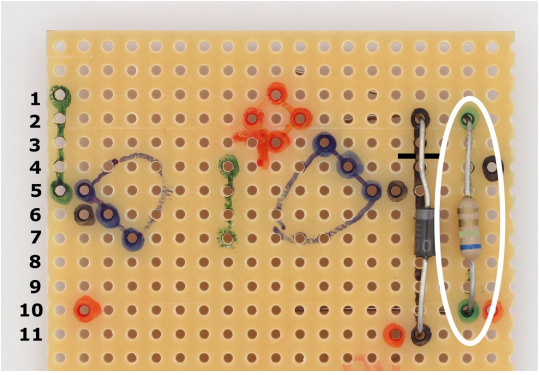
Jetzt wird gebaut!



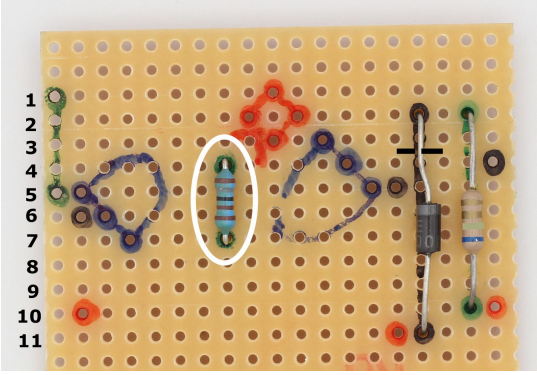
1. Zeichne mit Permanentmarker die Positionen für die Bauteile auf die Streifenplatine. Das hilft dir, die Bauteile an die richtige Position zu setzen. Die Kupfersterifen verlaufen von links nach rechts auf der Rückseite der Platine.



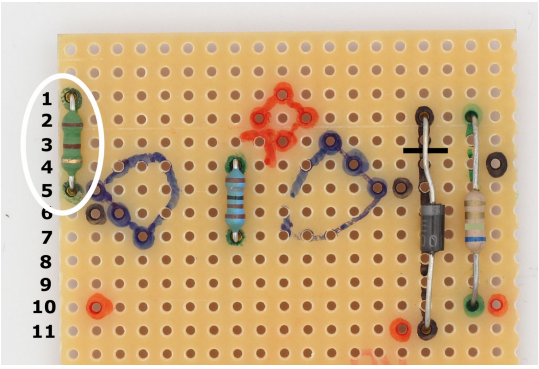
2. Baue zuerst die Diode ein. Sie schützt die Schaltung, falls die Batterie versehentlich verkehrt herum angeschlossen wird. Der helle Strich auf dem Bauteil kommt an die Seite mit dem Strich auf der Platine. Löte die Diode in Streifen 2 und Streifen 11.



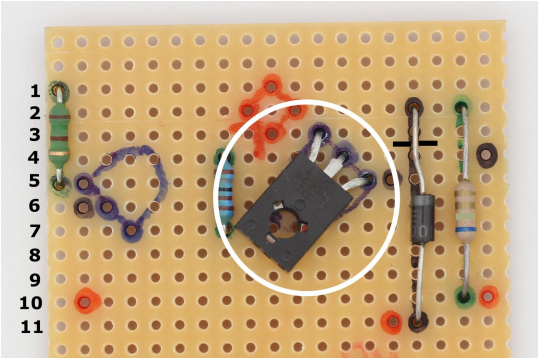
3. Setze als nächstes den **6,8-Ω-Widerstand** neben die Diode in die Platine, in die Streifen 2 und 10, und löte ihn an.



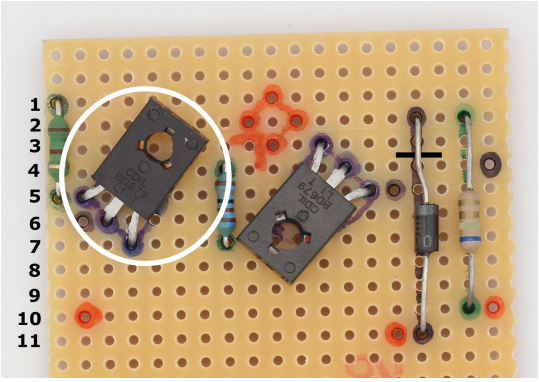
4. Setze den **1,8-kΩ-Widerstand** in die mittlere Markierung auf die Platine in die Streifen 4 und 7, und löte ihn an.



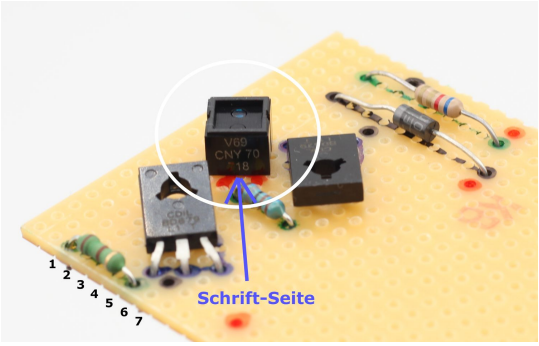
5. Setze den **150-Ω-Widerstand** in die linke Markierung auf die Platine in die Streifen 1 und 5, und löte ihn an.



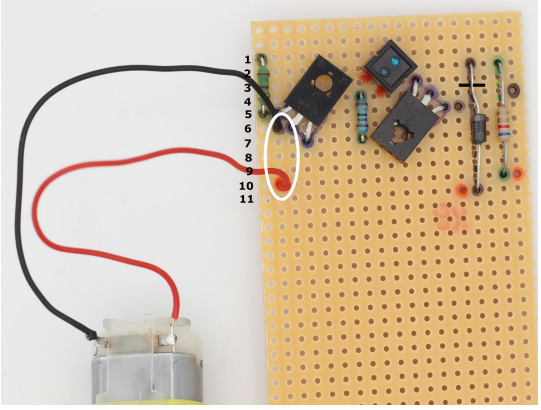
6. Setze einen der beiden **Transistoren (BD679)** in die Platine. Seine schwarze Seite schaut zur Außenkante der Platine und die silberne Seite nach innen, Stecke die Beine des Transistors erst in die Löcher der Platine (in Streifen 3, 4 und 5) und biege ihn dann flach auf die Platine, so dass die schwarze Seite nach oben gerichtet ist.



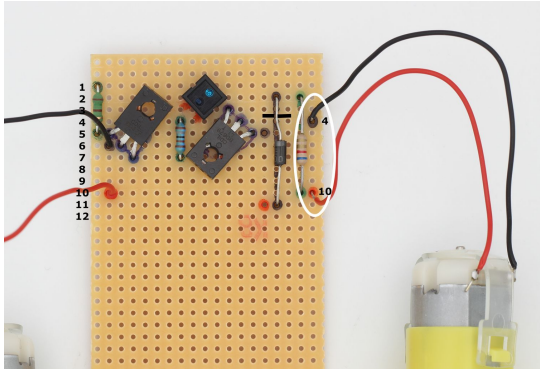
7. Stecke in gleicher Weise den zweiten **Transistor (BD679)** in die Platine. Die schwarze Seite des Transistors schaut zur Außenkante der Platine und die silberne Seite zum bereits eingelöteten Transistor. Stecke die Beine des Transistors erst in die Löcher der Platine (in Streifen 5, 6 und 7) und biege ihn dann flach auf die Platine.



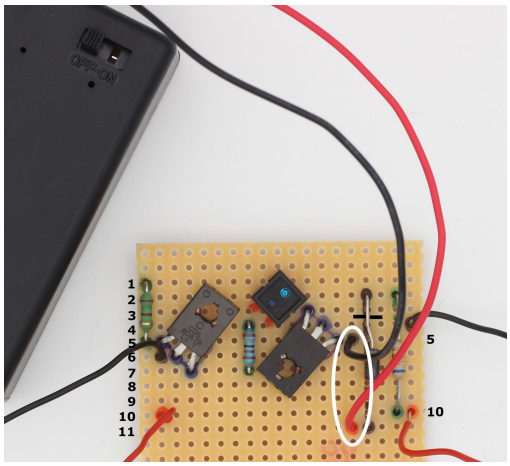
8. Setze den Reflexkoppler in die rot markierten Löcher in die Streifen 1, 2 und 3. Beachte, dass die Seite des Reflexkopplers mit der aufgedruckten Schrift mit der roten Pfeilmarkierung auf der Platine übereinstimmt!



9. Verbinde den ersten Motor (rotes Anschlusskabel rechts) mit der Platine. Stecke das rote und das schwarze Anschlusskabel des Motors auf die Markierung auf der linken Seite der Pölatine in die Streifen 6 und 10 und löte beide Kabel fest.

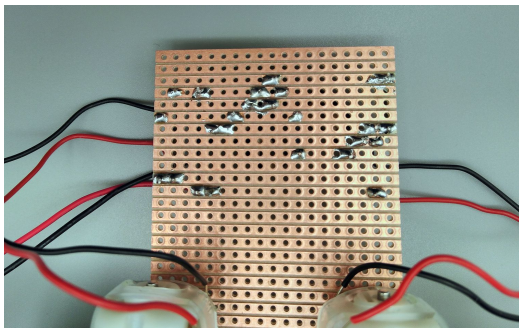


10. Verbinde auch den zweiten Motor mit der Platine. Stecke das rote und schwarze Anschlusskabel des Motors neben die Diode und den 6,8Ω-Widerstand in die äußeren Markierungen (Streifen 4 und 10) auf der Platine und löte beide Kabel fest.

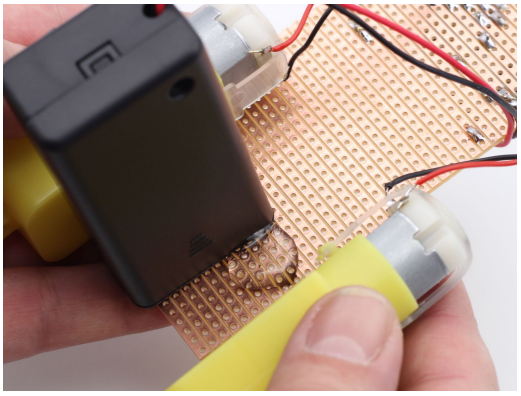


11.Jetzt fehlt nur noch der Batteriehalter. Stecke das rote und schwarze Batteriekabel zwischen die Diode und den Transistor in die Markierungen in Streifen 11 und 5 auf der Platine und löte beide Kabel fest.

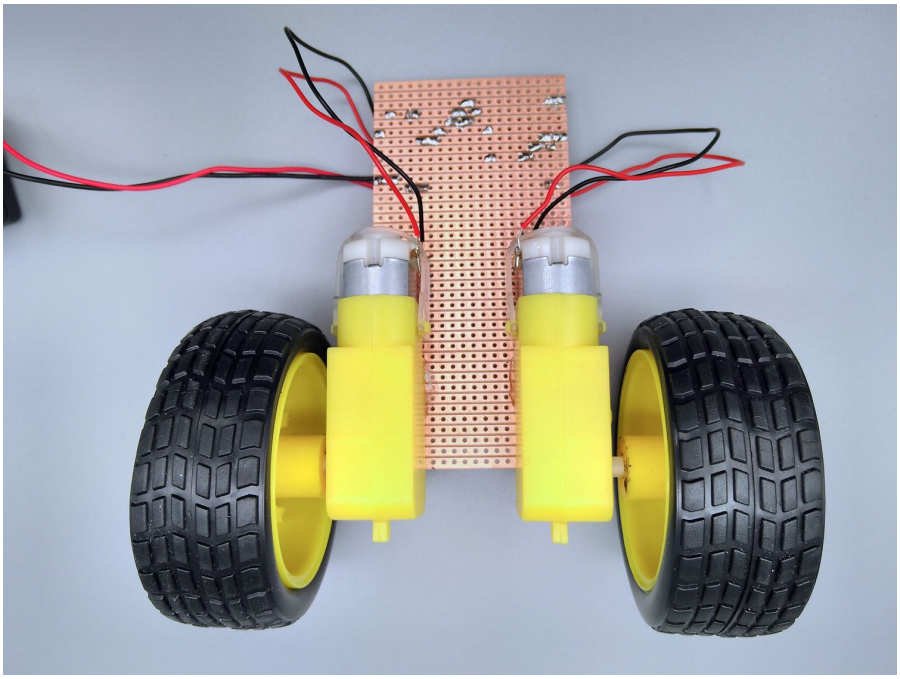
12. Teste einmal deine Schaltung, indem du deine 9V-Batterie im Batteriehalter befestigst und ihn anschaltest. Dein linker Motor sollte sich drehen. Wenn du jetzt ein Stück weißes Papier vor den Reflexkoppler halst, schaltet er um und dein rechter Motor beginnt sich zu drehen. Wenn das funktioniert, gehe zu Schritt 14. Wenn nicht, dann gehe zu Schritt 13.



13 Falls die Motoren sich nicht auf die beschriebene Weise drehen, gehe auf Fehlersuche. Prüfe mit deinem Multimeter oder mit scharfen Augen, ob sich Lötbrücken zwischen zwei benachbarten Streifen befinden und entferne sie mithilfe deiner Entlötpumpe. Auf dem Bild siehst du, wie die Platine auf der Kupferseite aussehen sollte, wenn alle Lötstellen in Ordnung sind.



14. Klebe die Motoren auf deine Platine. Nutze als Abstandshalter deinen Batteriehalter. Achte darauf, dass du den Batteriehalter nicht mit an der Platine festklebst. Klebe die Motoren weit hinten auf die Platine, so dass ein Teil des gelben Gehäuses über die Platine nach hinten hinausragt.



Fertig ist dein Elektromobil! Ab auf die Teststrecke.