

Ein Spurtmodell mit Analogrechner

Ronald Hecht

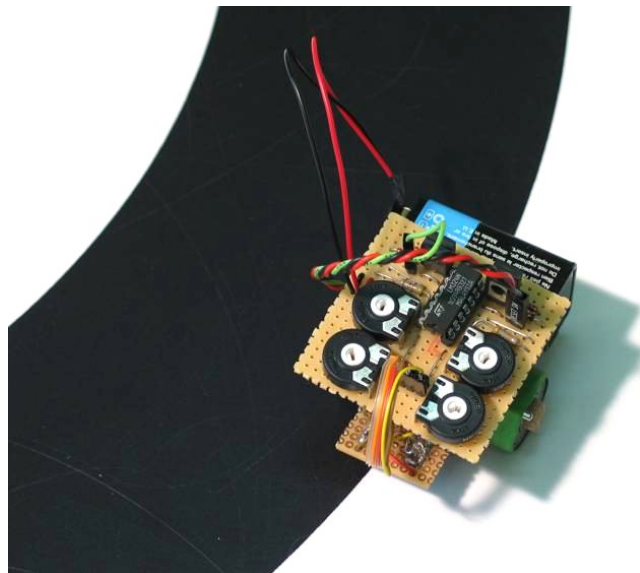
ronald.hecht@gmx.de

22. Februar 2006

Wer das einfache Spurtmodell [6] erfolgreich nachgebaut hat, wird sicherlich versucht haben, es irgendwie schneller zu machen. Aber einfache Veränderungen wie andere Motoren und Getriebe, bessere Mechanik, mehr Sensoren oder eine leistungsfähigere Spannungsversorgung liefern oft nicht den erwarteten Erfolg. Nach wie vor schwingt das Modell unermüdlich hin und her oder verlässt die Bahn sogar. So kann es jedenfalls nicht die 10 Sekunden knacken, um in den vorderen Plätzen mitzufahren.

Ideal wäre eine Konstruktion, die ohne zu schwingen genau auf der schwarz-weißen Begrenzungslinie fährt. Dazu müsste die Drehzahl der Motoren während der Fahrt immer so geregelt werden, dass das Modell den Kurven der Bahn exakt folgt. Bisher werden die Motoren jedoch einfach nur wechselseitig ein- und ausgeschaltet, was zwangsläufig zu der unschönen Pendelbewegung führt.

In der folgenden Anleitung wird gezeigt, wie man mit einigen wesentlichen Verbesserungen ein Modell baut, das ohne zu pendeln zügig und exakt auf der Bahn fährt. Dazu werden wir keinen Prozessor einsetzen, sondern nur Analog-Technik – also ein wahrer „Classicer“.



1 Die Mechanik

Zuerst schauen wir uns noch einmal die Mechanik an. Warum schwingt das Modell eigentlich immer so weit über, obwohl der Lichtsensor schon weit im hellen oder dunklen Bereich ist? Das liegt unter anderem daran, dass das sogenannte Trägheitsmoment [13] des Modells recht groß ist. Das Trägheitsmoment gibt an, wie schwer es ist, einen Körper in Rotationsbewegung zu versetzen oder dessen Rotation zu bremsen. Können wir das Trägheitsmoment des Modells verkleinern, müssen die Motoren nicht mehr so viel leisten, um das Modell in den Kurven zu drehen. Da das Trägheitsmoment um so größer ist, je weiter Massen vom Rotationsmittelpunkt entfernt sind, sollten wir versuchen, das ganze Modell kompakter aufzubauen.

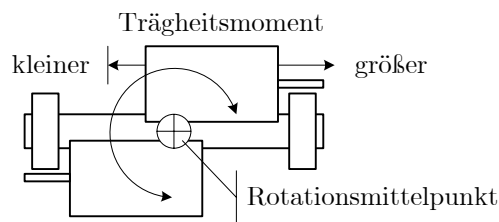


Abbildung 1: Verkleinern und Vergrößern des Trägheitsmoments

Einen wesentlichen Beitrag zum Trägheitsmoment liefern auf Grund ihrer hohen Masse die Motoren, Kugellager und Batterien. Diese müssen wir also möglichst nahe zum Rotationsmittelpunkt anordnen (vgl. Abbildung 1). Eine Möglichkeit ist, die Motoren mit den flachen Seiten zusammenzukleben. Wie Abbildung 2 zeigt, können wir dann die Dübelholzachse direkt an die Motoren kleben. Die Kugellager als Räder lassen sich wieder genauso anbringen und mit Luftballongummis antreiben. Auch hier sollte man darauf achten, dass die Kugellager möglichst dicht zusammen liegen. Dadurch reduziert sich neben dem Trägheitsmoment auch noch der Wenderadius des Modells. Dieser sollte möglichst klein sein, damit das Modell wendiger wird und besser um scharfe Kurven herumkommt.

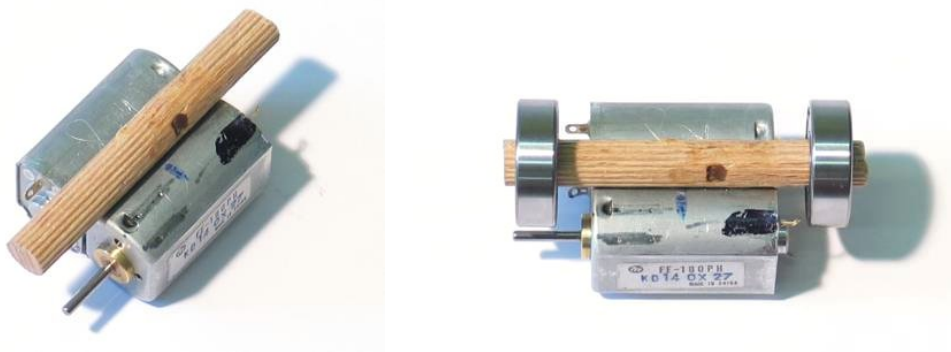


Abbildung 2: Motoren und Kugellager in kompakter Anordnung

Nun ist es jedoch etwas schwierig, das Modell zum Stehen zu bringen. Dazu sollte man ein vorderes und ein hinteres Stützrad anbauen. Hier wurden kleine auf einem dicken Draht aufgefädelte Holzperlen verwendet. Der Draht wird dann einfach direkt an die Motoren geklebt (vgl. Abbildung 3). Das vordere Stützrad kann man auch erst einmal weglassen und später zusammen mit den Sensoren anbauen (vgl. Abbildung 18). Bevor man beide Stützräder anbaut, sollte man jedoch unbedingt die Gummis aufziehen, da das Modell sonst nach der Montage kippelt.



Abbildung 3: Luftballongummis als Antrieb und Stützräder aus Holzperlen

Nun haben wir eine extrem kompakte Mechanik, die sehr wendig ist. Das Trägheitsmoment und der Wendekreis sind kleiner geworden. Wer möchte, kann schon mal versuchen, die einfache Zwei-Transistor-Schaltung an diesem Modell zu testen. Die Batterien müssen dazu aber genau mittig auf dem Modell platziert werden. Hat sich was verändert oder sogar verbessert?

2 Die Elektronik

An der Elektronik werden wir zwei wesentliche Verbesserungen vornehmen. Einerseits werden wir nicht nur zwischen schwarz und weiß unterscheiden, sondern auch alle dazwischenliegenden Grautöne auswerten. Diese benutzen wir, um die Drehzahl der Motoren genau zu regeln. Andererseits werden wir die Motoren nicht nur beschleunigen sondern auch bremsen.

2.1 Grundprinzip

Wenn das Modell genau auf der schwarz-weißen Linie fährt, sollen beide Motoren mit voller Drehzahl laufen. Kommt das Modell in eine Linkskurve, also in den weißen Bereich, wird das linke Rad etwas gebremst. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, wird dadurch die Spur nach links korrigiert. Kommt das Modell in eine Rechtskurve, also in den schwarzen Bereich, wird das rechte Rad gebremst.

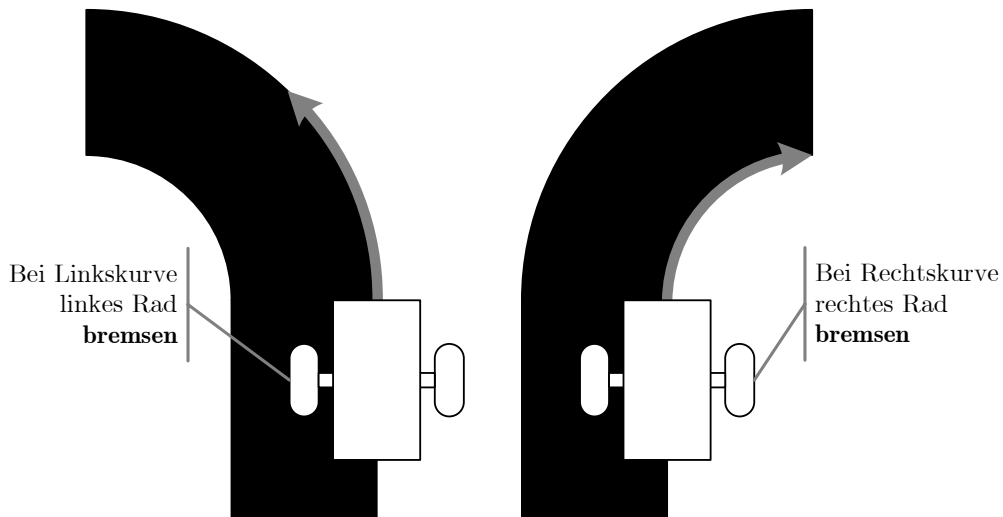


Abbildung 4: Bremsen statt Beschleunigen

Um dies zu realisieren, verwenden wir zwei dicht nebeneinander liegende Sensoren (vgl. Abbildung 5). Mit dem linken Sensor wird das linke Rad geregelt und mit dem rechten Sensor das rechte Rad. Befindet sich der linke Sensor im schwarzen Bereich und der rechte im weißen, laufen beide Motoren mit voller Drehzahl. Fährt das Modell auf eine Linkskurve auf, empfängt der linke Sensor mehr Licht, wodurch das linke Rad gebremst werden muss. Bei einer Rechtskurve empfängt der rechte Sensor weniger Licht. Das rechte Rad muss gebremst werden.

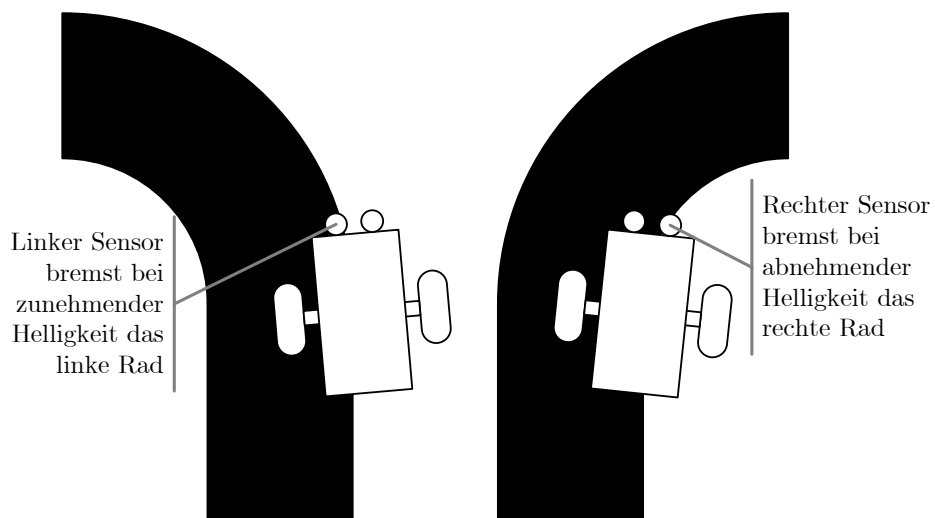


Abbildung 5: Fahren mit zwei Sensoren

2.2 Grau erkennen

Kann man überhaupt mit dem bisher verwendeten Reflexkoppler CNY70 verschiedene Grautöne erkennen? Die klare Antwort heißt: Ja, das geht! Aus Abbildung 11 im Datenblatt [8] können wir entnehmen, dass mit zunehmenden Abstand des Sensors zur reflektierenden Oberfläche d (Distance) ein fast linearer Zusammenhang zwischen der Verschiebung s (Displacement) und dem Ausgangstrom des Reflexkopplers besteht. Dazu sollten wir den Sensor mindestens in einem Abstand von 5 mm zur Bahnoberfläche betreiben. Im Anwendungsdatenblatt [9] finden wir in Abbildung 15d zudem noch, dass die LED und der Fototransistor des Reflexkopplers bezogen auf die schwarz-weiße Trennlinie hintereinander liegen müssen (vgl. Abbildung 6), damit die Graukurve noch flacher und linearer wird. Bei 5 mm Abstand zur reflektierenden Oberfläche beträgt die Umschaltdistanz, also der Graubereich des Sensors, dann etwa 6 mm. Vereinfacht sieht das dann so aus:

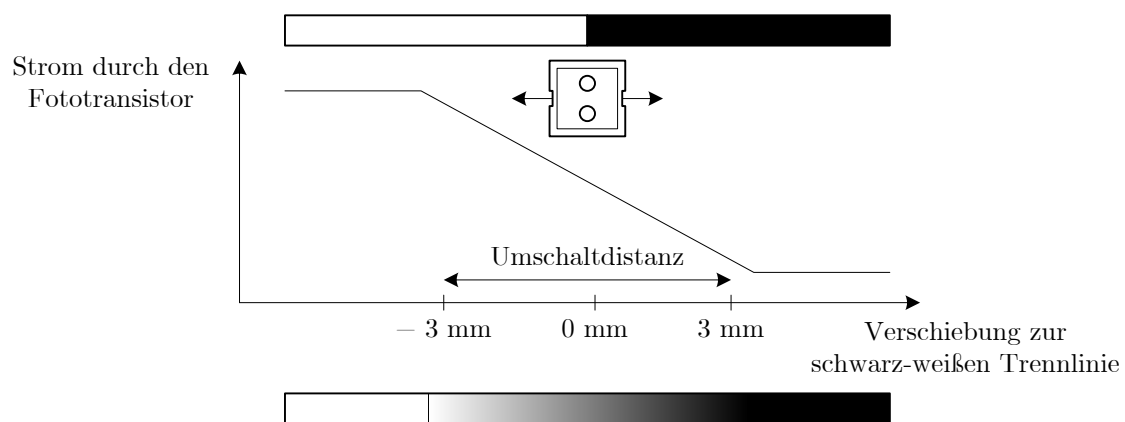


Abbildung 6: Grau erkennen mit dem Reflexkoppler CNY70

Der Fototransistor im Reflexkoppler liefert also einen bestimmten Strom in Abhängigkeit von der Verschiebung zur schwarz-weiß-Linie in einem Bereich von 6–7 mm. Das entspricht etwa der Größe des Sensors. Nun ist es die Aufgabe, diesen Strom in eine Spannung umzuwandeln, mit der wir dann den entsprechenden Motor steuern. Dies kann man mit einer Transistorschaltung machen. Einfacher, genauer und besser einstellbar geht das aber mit einem Operationsverstärker.

2.3 Einfacher geht's mit einem Operationsverstärker

Ein Operationsverstärker (OPV) [12] ist ein Bauelement, mit dem man sehr einfach Verstärkerschaltungen und analoge Rechenschaltungen aufbauen kann. Deshalb wird er gern in Reglern und Analogrechnern eingesetzt. Ein OPV hat neben der Versorgungsspannung drei Anschlüsse: einen invertierenden ($-$) und einen nichtinvertierenden ($+$) Eingang und einen Ausgang (vgl. Abbildung 7). Die Grundfunktion dieses Bauelements ist es, eine Spannungsdifferenz zwischen dem nichtinvertierenden und dem invertierenden

Eingang unendlich zu verstärken und am Ausgang auszugeben. Unendliche Verstärkung ist natürlich nicht möglich. Tatsächlich haben aber reale OPVs eine Verstärkung von mehr als 10000.

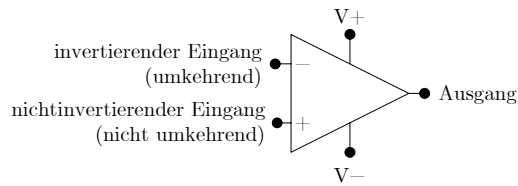


Abbildung 7: Operationsverstärker

Nun will man Signale normalerweise nicht unendlich verstärken, sondern nur um einen bestimmten Betrag. Dafür haben sich einige Grundschaltungen bewährt. Für unseren Fall brauchen wir eine Schaltung, die einen kleinen Eingangsstrom in eine Spannung umwandelt. Dies geht mit einem Strom-Spannungs-Wandler (I - U -Wandler) [7]. Er erzeugt eine Ausgangsspannung $U_a = -I_e \cdot R1$. Mit $R1$ kann man also die Verstärkung einstellen. Das Minuszeichen bedeutet, dass der Eingangstrom invertiert behandelt wird. Ein hoher Strom führt demnach zu einer niedrigen Ausgangsspannung. Dies leuchtet ein, da die Stromquelle (Fototransistor des CNY70) am invertierenden Eingang angeschlossen ist.

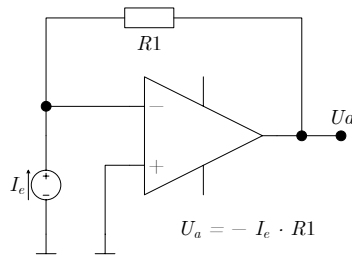


Abbildung 8: Strom-Spannungs-Wandler

Auch bei schwarzer Bahnoberfläche fließt ein kleiner Strom durch den Fototransistor. Da wir diesen nicht verstärken wollen, müssen wir diesen Dunkelstrom irgendwie am I - U -Wandler vorbeischleusen. Dazu bauen wir noch einen Widerstand $R2$ ein, der den Dunkelstrom des Fototransistors vom Eingang des OPV wegführt. An dem nichtinvertierenden Eingang müssen wir noch eine Referenzspannung anlegen, die den Bezugspunkt für die Differenz zwischen dem nichtinvertierenden und invertierenden Eingang bildet. Wir verwenden hier einen einfachen Spannungsteiler bestehend aus den zwei gleichen Widerständen $R3$ und $R4$. So liegt dort die halbe Versorgungsspannung an.

Wie schon erwähnt, invertiert die Schaltung in Abbildung 9 den Eingangstrom. Wenn also mehr Licht auf den Fototransistor fällt, sinkt die Ausgangsspannung. Das würde den Motor bremsen. Diese Schaltung eignet sich also für den linken Sensor, denn der soll ja immer im Dunkeln bleiben. Die Schaltung lässt sich aber auch recht einfach für den rechten Sensor anpassen. Wir müssen einfach den Fototransistor und den Widerstand

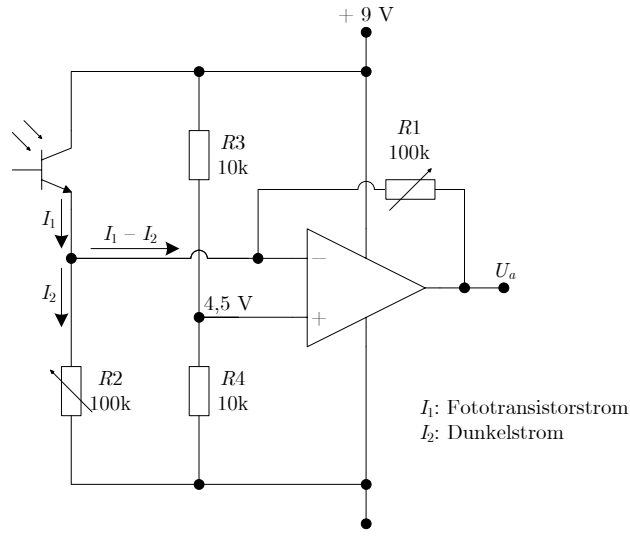


Abbildung 9: Wandlung des Fototransistorstroms in eine Spannung

$R2$ tauschen. Fließt nun ein Strom durch den Fototransistor, fließt er vom Eingang des OPVs weg, was dann einen Anstieg der Ausgangsspannung bewirkt.

Damit wir die Verstärkung und den Dunkelstrom noch nachträglich einstellen können, bauen wir für $R1$ und $R2$ 100 k Ω -Potentiometer ein. Als Operationsverstärker können wir hier den preiswerten Basteltyp LM324 verwenden [5]. Wie man in Abbildung 16 erkennt, hat er gleich vier OPVs auf einem Chip. Man muss aber unbedingt aufpassen, dass man die Versorgungsspannungseingänge nicht vertauscht. Das würde den Schaltkreis sofort zerstören.

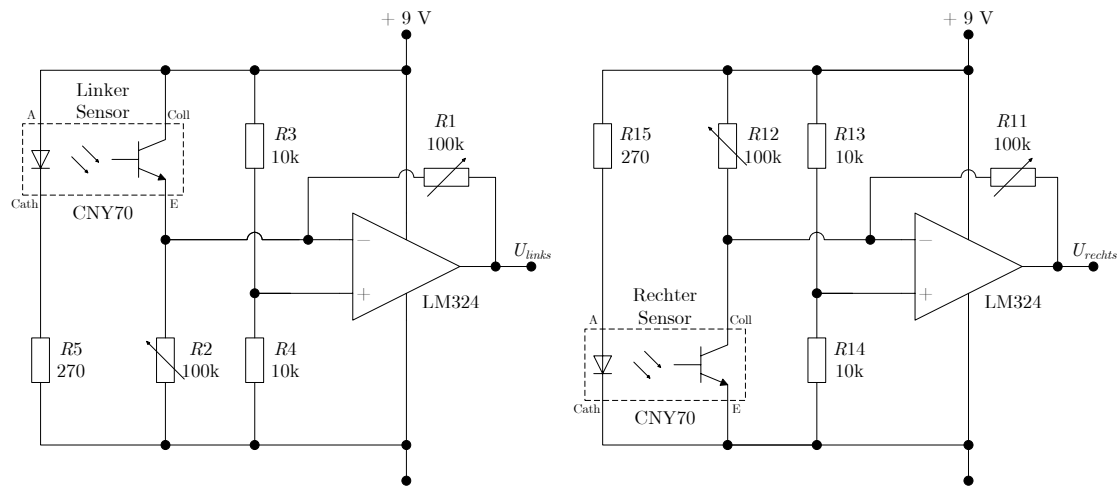


Abbildung 10: Vorverstärker für beide Sensoren

Die Schaltung für die Verstärkung des Fototransistorstroms beider Sensoren ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Einstellwerte der Widerstände $R1$, $R2$, $R11$ und $R12$ sind von der Beschaffenheit der Bahn und ein wenig vom Umgebungslicht abhängig. Bei der Justierung sollte man grundsätzlich so vorgehen:

- $R1$ und $R11$ auf etwa $10\text{ k}\Omega$ einstellen
- Linken Sensor genau mittig über der schwarz-weißen Trennungslinie platzieren
- $R2$ so einstellen, dass am Ausgang die halbe Versorgungsspannung anliegt
- Rechten Sensor genau mittig über der schwarz-weißen Trennungslinie platzieren
- $R12$ so einstellen, dass am Ausgang die halbe Versorgungsspannung anliegt
- Modell so platzieren, dass es genau mittig auf der schwarz-weißen Trennungslinie steht, der linke Sensor ist im Dunklen, der rechte im Hellen
- $R1$ und $R11$ so weit vergrößern, dass sich die jeweilige Ausgangsspannung nicht weiter erhöht.

$R2$ und $R12$ verschieben die Kennlinie der Schaltung nach links oder rechts. Mit $R1$ und $R11$ stellt man die Steilheit ein (vgl. Abbildung 11). Die Kurven sollten bezogen auf die schwarz-weiße Trennungslinie symmetrisch und möglichst flach sein. Dennoch sollte bei Verschiebung des Sensors am Ausgang des OPVs die maximale Ausgangsspannung (Versorgungsspannung $-1,4\text{ V}$) und minimale Ausgangsspannung ($0,7\text{ V}$) erreicht werden (vgl. Abbildung 11). Hier hilft nur Experimentieren. Richtwerte für die eingestellten Werte sind für $R2$ und $R12$ etwa $20\text{ k}\Omega$. $R1$ und $R11$ sind immer etwas kleiner also z.B. $17\text{ k}\Omega$.

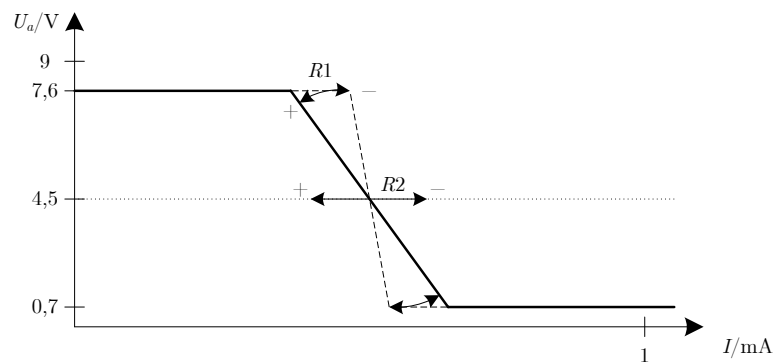


Abbildung 11: Einstellung der linken Vorstufe mit $R1$ und $R2$

2.4 Beschleunigen und Bremsen im Gegentakt

Wir haben jetzt je eine Spannung zur Ansteuerung des linken und des rechten Motors erzeugt. Es ist jedoch nicht ratsam, einen Motor direkt an den $I-U$ -Wandler zu schließen.

Der hohe Motorstrom kann die Funktion des Wandlers erheblich beeinträchtigen. Besser ist es, wenn wir für die Ansteuerung der Motoren eigene Leistungsverstärker aufbauen. Wir können dazu die beiden übrigen Operationsverstärker im LM324 verwenden. Da wir dafür keine Spannungsverstärkung brauchen, sondern Leistungsverstärkung, bietet sich die Spannungsfolgerschaltung wie in Abbildung 12 an [12]. Sie hat eine Spannungsverstärkung von 1, einen hohen Eingangswiderstand (keine Beeinflussung der Eingangsspannungsquelle) und einen niedrigen Ausgangswiderstand (Lastunempfindlich). Dadurch wird unser I - U -Wandler nicht durch den Motor gestört.

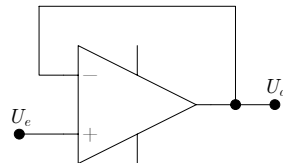


Abbildung 12: OPV als Spannungsfolger

Zuerst jedoch ein paar Worte zum Beschleunigen und Bremsen. Wenn ein Motor erst einmal läuft und kein großes Drehmoment liefern muss (Leerlauf), benötigt er nicht viel Strom. Dies ist der Fall, wenn das Modell schon in Bewegung ist und auch kaum Reibung auftritt. Die hier verwendeten Motoren FF-180PH von Mabuchi brauchen dann etwa 10–20 mA. Das ist nicht viel. Diesen Strom könnte der Operationsverstärker schon allein liefern. Muss der Motor jedoch seine Drehzahl erhöhen, also seinen eigenen Motoranker auf größere Umdrehungen bringen und auch noch das Gewicht des Modells beschleunigen, benötigt der Motor mehr Kraft, also einen höheren Strom. Das können hier schon mal wesentlich mehr als 100 mA werden. Bei stärkeren Motoren natürlich noch mehr. Diesen Strom sollte unser Leistungsverstärker bei gleichbleibender Ausgangsspannung unbedingt liefern. Dazu können wir einfach einen NPN-Leistungstransistor an den Ausgang des OPVs anschließen. Er verstärkt in dieser Beschaltung nicht die Spannung sondern nur den Strom. Auch er arbeitet hier als Spannungsfolger. (Grundschiung: Transistor als Impedanzwandler [10, 7]).

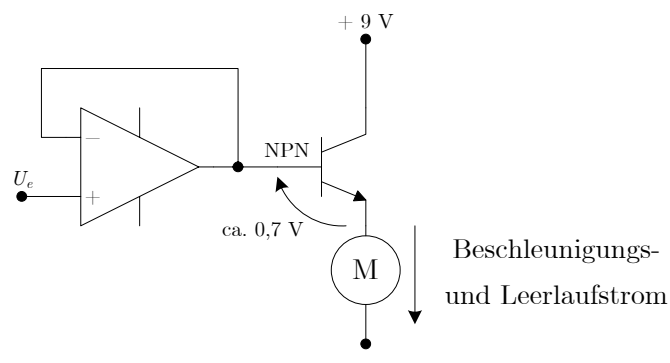


Abbildung 13: Treiben von Lasten mit Leistungstransistor am OPV-Ausgang

Das Beschleunigen sollte jetzt funktionieren. Aber wie bremst man einen Motor und warum müssen wir überhaupt bremsen? Reicht es nicht, einfach nur die Spannung zu verringern? In dem einfachen Spurtmobil wird mit je einem Transistor einer der beiden Motoren eingeschaltet. Liefern sie genügend Strom, klappt das mit dem Beschleunigen gut. Wenn sie jedoch sperren, ist der Stromkreis nicht mehr geschlossen, d.h. der Motor läuft frei. Mit einem einfachen Experiment können wir überprüfen, was da genau passiert. Wir legen an einem Motor Spannung an. Der Motor sollte fast sofort die maximale Drehzahl erreichen. Beschleunigen klappt super! Trennen wir aber die Spannungsquelle vom Motor, öffnen also den Stromkreis, läuft der Motor noch recht lange weiter (1–2 Sekunden) bis er schließlich stehen bleibt. Genau das passiert auch bei dem einfachen Spurtmobil und führt zu seinem ausgeprägten Pendelverhalten. Die Motoren reagieren sehr langsam auf die Unterbrechung des Stromkreises. Dieser Effekt wird noch zusätzlich verstärkt, wenn der Motor eine große Masse bewegt oder in Rotation versetzt hat. Dessen Massenträgheit bzw. Trägheitsmoment führt zu einem noch länger anhaltenden Weiterlaufen des Motors. So funktioniert Bremsen also nicht.

Erinnern wir uns einmal an ein Fahrraddynamo. Dieser ist eigentlich nichts weiter als ein Motor, der von außen in Drehbewegung versetzt wird und dadurch Spannung erzeugt. Schließen wir immer mehr Glühlampen parallel an, wird es immer schwerer den Dynamo zu drehen. Wenn wir ihn sogar kurzschließen (Das sollte man lieber nicht mit einem teuren Nabendynamo ausprobieren.), geht es richtig schwer. Das Rad bleibt fast sofort wieder stehen. Das ist Bremsen! Also müssen wir den Motor in unserem Modell kurzschließen oder anders ausgedrückt: überflüssige Bewegungsenergie „verheizen“. Dazu bauen wir zusätzlich einen PNP-Transistor in unsere Schaltung ein, der diese Energie in Wärme umwandelt. Der Strom für die Beschleunigung fließt nun nach wie vor durch den NPN-Transistor. Der Bremsstrom wird vom PNP-Transistor aufgenommen (vgl. Abbildung 14).

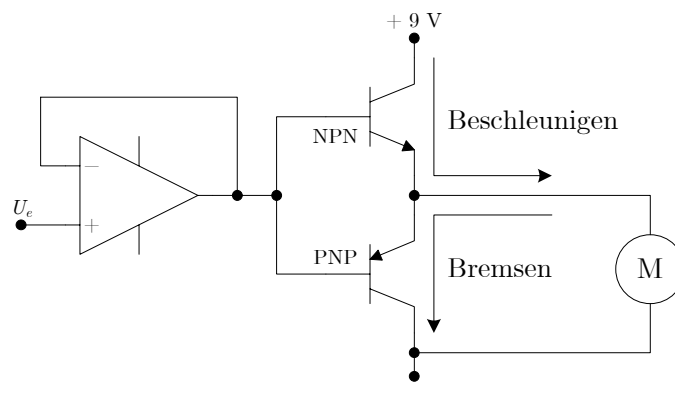


Abbildung 14: Ströme in einer Gegentaktendstufe

Diese einfache Schaltung wird Gegentaktendstufe genannt [11, 7], weil beide Transistoren im Gegentakt arbeiten. Sie wird hauptsächlich in Audio-Leistungsendstufen eingesetzt. Noch besser und linearer funktioniert sie, wenn wir den invertierenden Eingang des OPVs

am Ausgang der Schaltung anschließen. Außerdem sollten wir noch sogenannte Freilaufdioden einbauen, welche die von den Motorspulen verursachten Induktionsströme kurzschließen. Das erhöht die Lebensdauer der Schaltung erheblich. Abbildung 15 zeigt unseren fertigen Leistungsverstärker für die Motoren zum Beschleunigen und auch Bremsen.

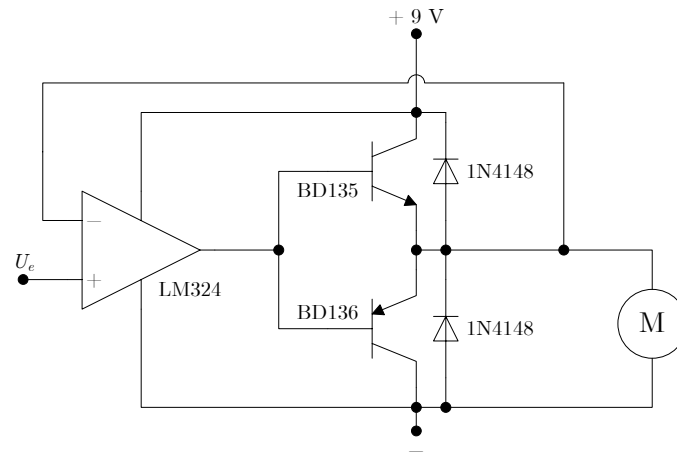


Abbildung 15: Leistungsverstärker

Als Transistoren kann man eine ganze Reihe von Typen verwenden. Jedoch sollten der NPN- und der PNP-Transistor als Komplementärtypen gewählt werden. Komplementär heißt, dass beide Transistoren in ihren Kenndaten genau aufeinander abgestimmt sind. Es eignen sich z.B. BD135/BD136 [1, 2] oder BD433/BD434 [3, 4].

2.5 Alles im Zusammenspiel

Wenn wir noch einmal alle Schaltungsteile zusammenfassen, ergeben sich für die Ansteuerung des linken und des rechten Rades fast identische Schaltungen. Sie besitzen je einen Reflexkoppler mit LED-Vorwiderstand, einen I - U -Wandler und eine Leistungsendstufe. Alle OPVs sind in einem LM324 Schaltkreis untergebracht (vgl. Abbildung 16). Die komplette Schaltung für das Modell ist in Abbildung 17 dargestellt.

3 Endmontage

Die Reflexkoppler können wir zusammen mit seinen LED-Vorwiderständen auf eine kleine Leiterplatte löten, die wir vorn am Modell mit einem dicken Draht ankleben. Hier aber aufpassen, dass der rechte Sensor nun anders angeschlossen wird! Zu dieser Leiterplatte führen wir vier Kabel: Plus, Minus, linker und rechter Sensorausgang. Außerdem kann man an diese Platine das vordere Stützrad anbringen (vgl. Abbildung 18).

Die Vor- und Endstufen passen komplett in einen LM324 Operationsverstärkerschaltkreis. Wir sollten diesen aber nie direkt auflöten, sondern in eine IC-Fassung setzen. So können wir ihn einfacher austauschen, falls er einmal kaputt geht. Diese Fassung

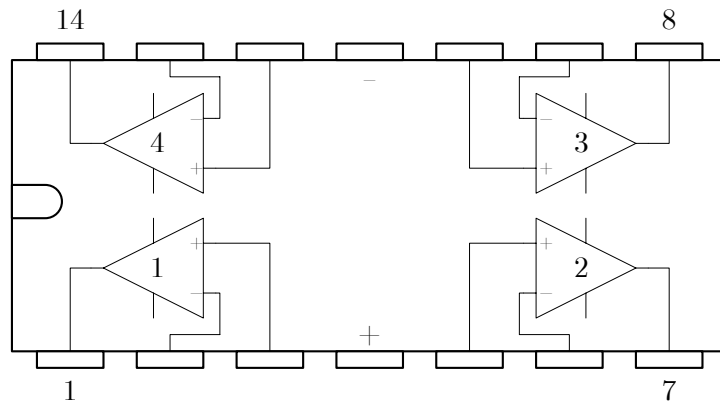


Abbildung 16: Anschlüsse und innerer Aufbau des OPV-Schaltkreises LM324

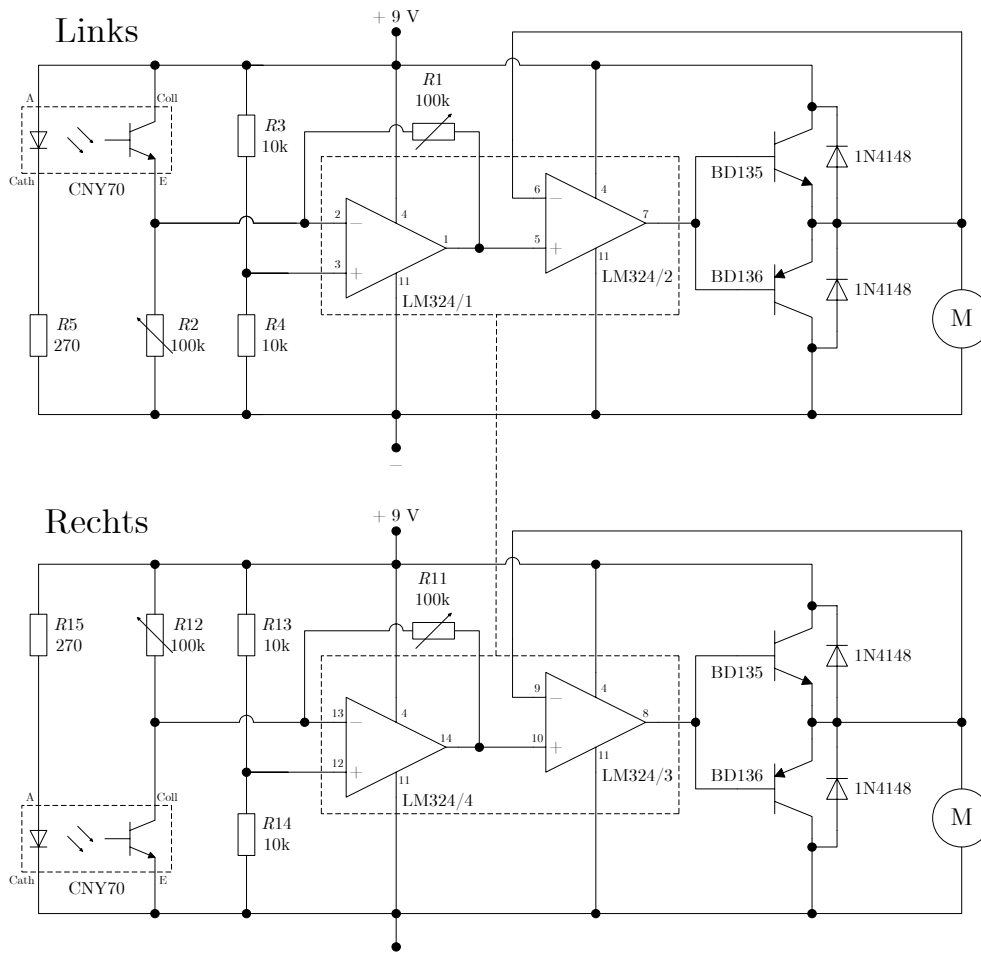


Abbildung 17: Gesamte Schaltung für links und rechts

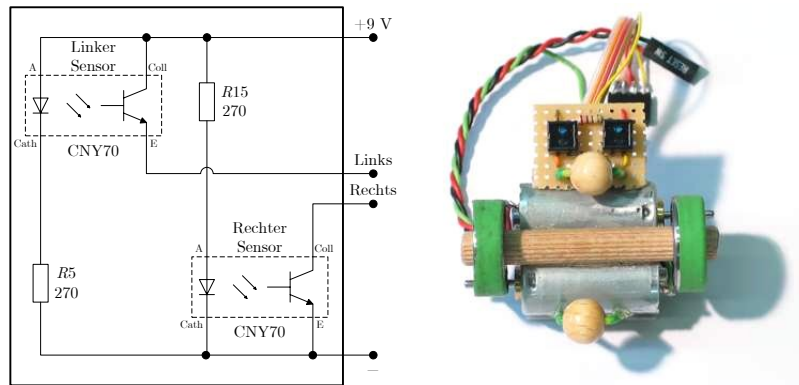


Abbildung 18: Sensorplatine

löten wir zusammen mit den Transistoren, Dioden und Widerständen auf eine weitere Lochrasterplatine (vgl. Abbildung 19), welche wir später oben auf dem Modell anbringen. Wer ein Elektronik-Steckbrett hat, sollte die Schaltung aber erst mal damit aufbauen.

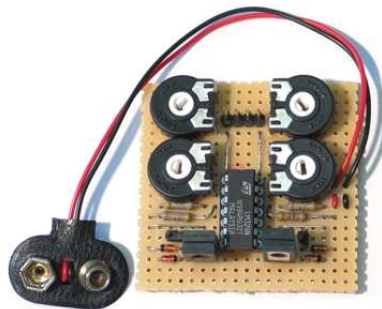


Abbildung 19: Verstärkerplatine

Damit wir testen können, ob unsere Schaltung auch funktioniert, empfiehlt es sich, vorerst lange Kabel an die Motoren und die Sensorplatine anzulöten. So können wir die Schaltung mit einem Netzteil auf dem Experimentiertisch betreiben. Dabei sollte man aber unbedingt darauf achten, dass die Motorkabel nicht in der Nähe der Sensorkabel verlaufen. Also kein Flachbandkabel zusammen für Motoren und Sensoren verwenden! Sonst stören die hohen Motorströme die kleinen Sensorströme.

Wenn soweit alles funktioniert, können wir die Verstärkerplatine auf das Modell setzen. Hier sind dem Ideenreichtum keine Grenzen gesetzt. Richtig stabil ist es, wenn man die Drähte zu den Motoren als Stützen missbraucht. Dazu einfach dicke, nicht flexible Drähte verwenden, die man zuerst an die Leiterplatte und anschließend an die Motoren lötet. Es genügt aber auch, die Leiterplatte mit etwas zweiseitigem Klebeband auf dem Modell zu fixieren. Dabei aber keinen Kurzschluss produzieren! Zum Schluss setzen wir noch die Batterie auf das Modell.

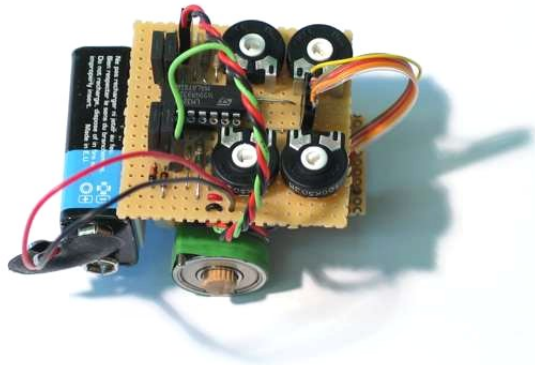


Abbildung 20: Das fertige Modell

4 Ein paar Warnungen

Obwohl die Schaltung sehr zuverlässig arbeitet, ist sie sehr anfällig gegen grobe Fehler. Es können sogar einige Bauteile kaputt gehen. Bei den niedrigen Kosten ist das aber zu verschmerzen. Man sollte deshalb lieber gleich ein paar mehr Transistoren und Operationsverstärkerschaltkreise bestellen.

Wie auch beim einfachen Spurtmobil darf man den **Strom durch die LED des CNY70** nie größer als 50 mA werden lassen. Ohne Vorwiderstand an 9 V wird die LED sofort zerstört. Der optimale Strom liegt bei 20–30 mA. Man sollte als Vorwiderstand also 270–390 Ω verwenden.

Der Operationsverstärkerschaltkreis reagiert empfindlich auf das Vertauschen der Versorgungsspannungsanschlüsse. Er wird dann sofort zerstört. Deshalb beim Anschließen der Batterie immer auf die Polung achten! Wenn man den OPV mit einer **IC-Fassung** versieht, kann man ihn leicht austauschen. Aber immer darauf achten, dass er wieder richtig herum eingesetzt wird, sonst ist der nächste im Eimer!

Die **Leistungstransistoren** können auch recht leicht abbrennen, wenn man die Ausgänge zu lange **kurzschließt**. Da wir sie nicht gekühlt haben, können sie beim Anschließen zu **starker Motoren** auch den **Hitzetod** sterben. Um das zu vermeiden, sollten die Transistoren mit kleinen Kühlkörpern oder Kühlblechen versehen werden. Bei den Mabuchi-Motoren ist das alles aber nicht nötig. Dennoch sollte man die **Temperatur** gelegentlich **überprüfen**.

Vorsicht auch beim **Einbau der Dioden**. Wenn man sie verpolt, schließen sie den Ausgang auch kurz, was entweder die Dioden oder die Transistoren zerstören kann.

5 Tipps zur Weiterentwicklung

Die hier verwendeten Motoren liefern eigentlich erst bei 12 V genügend Umdrehungen und Drehmoment. Mit einer 9 V-Batterie und den Spannungsverlusten durch den OPV und die Transistoren kommt man leider nur bis maximal 7 V Ausgangsspannung. Man

sollte sich also einen Motor suchen, der schon bei kleinen Spannungen hohe Umdrehungen liefert.

Die Geschwindigkeit des Modells kann man leicht mit der Formel $v = s/t = d \cdot \pi \cdot n$ berechnen, wobei d der Wellendurchmesser des Motors und n die Umdrehungen pro Sekunde sind. Will man also in 5 s um die Bahn kommen, muss die Geschwindigkeit etwa 1 m/s sein. Bei einem Wellendurchmesser von 2 mm braucht man dann etwa 9000–10000 Umdrehungen pro Minute. Werden diese nicht ganz erreicht, kann durch Vergrößern der Motorwelle mit etwas Schrumpfschlauch nachgeholfen werden.

Die beiden Reflexkoppler kann man noch dichter nebeneinander setzen. Dadurch wird der Übergang von einer Kurvenrichtung in die andere noch weicher. Das leichte Überschwingen im Umschaltzeitpunkt kann dadurch fast eliminiert werden.

6 Stückliste

Stück	Beschreibung	Typ
2	Motoren	Mabuchi FF-180PH
2	Kugellager	608
1	Dübelholz	8 mm Durchmesser
1	Luftballon	
2	Stützräder	
2	Reflexkoppler	CNY70
1	4-fach Operationsverstärker im DIL14 Gehäuse	LM324N
1	IC-Fassung (IC-Sockel) für Operationsverstärker	DIL14
2	NPN-Leistungs-Transistoren	BD135
2	PNP-Leistungs-Transistoren	BD136
4	10 k Ω Widerstände (1/4 W)	
2	270 Ω Widerstände (1/4 W)	
4	100 k Ω Potentiometer	
4	Dioden	1N4148
1	9 V Batterie oder Akku	
1	Batterieanschlussclip	
	Kabel, Lochrasterplatine	

Literatur

- [1] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL: *BD135/137/139*, February 2000.
- [2] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL: *BD136/138/140*, February 2000.
- [3] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL: *BD433/435/437*, June 2001.
- [4] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL: *BD434/436/438*, June 2001.

- [5] NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION: *LM124/LM224/LM324/LM2902 Low Power Quad Operational Amplifiers*, August 2000.
- [6] PFÜLLER, H.: *Einfaches Spurtmobil mit zwei Transistoren*.
<http://spurt.uni-rostock.de/>.
- [7] SEIFART, M.: *Analoge Schaltungen*. Verlag Technik Berlin, 5. Aufl., 1996.
- [8] VISHAY: *CNY70: Reflective Optical Sensor with Transistor Output*, April 2000.
- [9] VISHAY: *Application of Optical Reflex Sensors TCRT1000, TCRT5000, CNY70*, February 2002.
- [10] WIKIPEDIA: *Impedanzwandler*. <http://de.wikipedia.org/>.
- [11] WIKIPEDIA: *Leistungsverstärker*. <http://de.wikipedia.org/>.
- [12] WIKIPEDIA: *Operationsverstärker*. <http://de.wikipedia.org/>.
- [13] WIKIPEDIA: *Trägheitsmoment*. <http://de.wikipedia.org/>.