

Spurtmodelle mit Kopfhörerverstärker

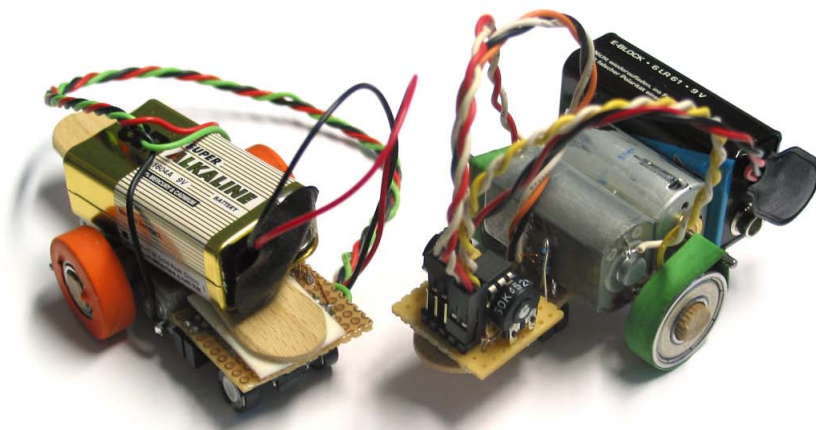
Ronald Hecht

ronald.hecht@gmx.de

22. Februar 2006

Aus der Bauanleitung „Ein Modell mit Analogrechner“ [1] wissen wir, dass die Sensoren CNY70 für eine analoge Regelung recht gut geeignet sind. Wir haben ein Modell konstruiert, das ohne zu pendeln auf der Bahn fährt und nur beim Wechsel von einer Kurvenrichtung in die andere etwas ruckt. Das Modell besitzt zwei Sensoren, mit deren Hilfe jeweils die Drehzahl des linken und des rechten Rades geregelt wird. Dazu wurde ein Operationsverstärkerschaltkreis verwendet, der sowohl den Sensorstrom verstärkt, aber auch, in Verbindung mit Leistungstransistoren, die Motoren kräftig ansteuert. Im Vergleich mit dem einfachen Spurtmodell [3] waren also die wesentlichen Verbesserungen eine echte analoge Regelung und die Fähigkeit, auch bremsen zu können.

Was kann man da eigentlich noch verbessern? Wir werden die beiden voneinander getrennten Regelschaltungen durch eine einzige ersetzen. Diese wird die Drehzahl beider Motoren regeln. Dadurch erreicht man, dass der Übergang bei der Fahrt von einer Kurvenrichtung in die andere „flüssiger“ wird. Das Modell ruckt dann nicht mehr so. Außerdem werden wir die Leistungsverstärker für die Motoren mit einem speziellen Schaltkreis aufbauen. Dieser erreicht eine höhere Ausgangsspannung bei gleicher Versorgungsspannung und liefert zudem noch einen höheren Strom.



1 Das Grundprinzip

Die Idee ist, mit nur einem Sensor die Drehzahl des linken und gleichzeitig des rechten Rades so zu regeln, dass das Modell ohne zu pendeln exakt auf der Bahn fährt. Wohingegen die Motoren beim einfachen Spurtmodell [3] nur wechselseitig ein- und ausgeschaltet werden, soll hier eine kontinuierliche Regelung der Drehzahlen erreicht werden. Zudem werden wir wieder berücksichtigen, dass nicht nur das Beschleunigen, sondern auch das Bremsen der Räder unbedingt notwendig ist.

Abbildung 1 zeigt die Ansteuerung der Räder bei der Fahrt auf der Bahn. Befindet sich der Sensor genau mittig über der schwarz-weißen Trennungslinie, soll das Modell geradeaus fahren. Beide Motoren müssen mit gleicher Drehzahl laufen. Verschiebt sich die Trennungslinie nach links, handelt es sich um eine Linkskurve. Der Sensor empfängt mehr Licht. Das linke Rad muss langsamer und das rechte schneller laufen. Bei einer Verschiebung der Trennungslinie nach rechts befindet sich das Modell in einer Rechtskurve. Der Sensor empfängt weniger Licht. Das linke Rad muss schneller laufen und das rechte langsamer.

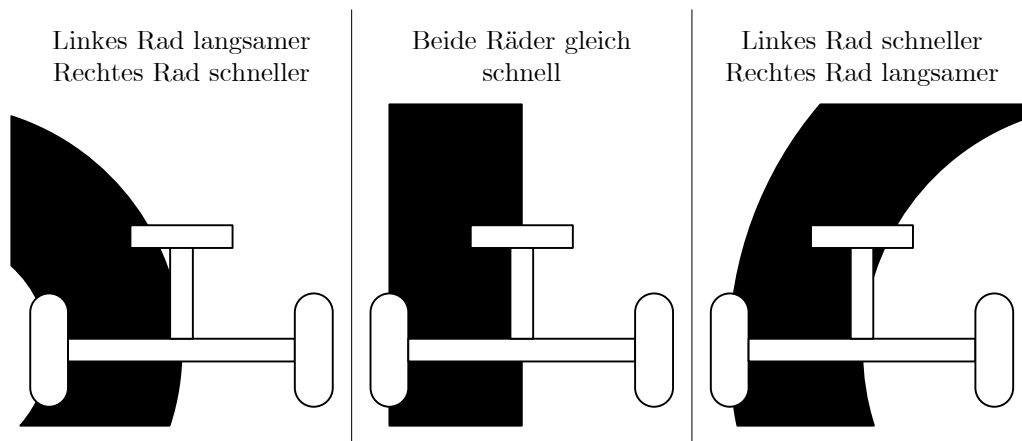


Abbildung 1: Grundprinzip des Modells

Da hier die Drehzahl der Räder entgegengesetzt erhöht und verringert wird, spricht man von einer differentiellen Ansteuerung. Dabei bestimmt das arithmetische Mittel der Drehzahlen der beiden Motoren die Geschwindigkeit des Modells und die Differenz der Drehzahlen die Enge der Kurve. Das wird noch genauer in Abschnitt 8 erklärt. Zunächst genügt es aber vollkommen die Abbildung zu verstehen.

Neben einer geeigneten Mechanik für das Modell benötigen wir also einen Sensor, der die Abweichung von der schwarz-weißen Trennungslinie ermittelt – und zwar in beide Richtungen. Außerdem brauchen wir Leistungsverstärker für die Motoren, die ein kräftiges Beschleunigen und Bremsen ermöglichen und noch eine clevere Schaltung für die differentielle Ansteuerung. Alle diese Baugruppen werden in den folgenden Abschnitten gezeigt und erklärt.

2 Die Mechanik

Obwohl die Mechanik im Vorgängermodell [1] schön kompakt war, konnte man bei der Montage der Stützräder verzweifeln. Entweder hat das Modell gekipelt oder die Klebestellen hielten nicht. Deshalb hier eine andere Aufbauvariante.

Zuerst kleben wir wieder beide Motoren (Mabuchi FF-180PH) an den ebenen Flächen zusammen. Jetzt kommt wieder ein Eisstieler ins Spiel. Diesmal müssen wir uns aber einen Magnum von Langnese gönnen. Dieser Eisstieler ist an den Enden breiter. Wir werden später sehen, warum wir das brauchen. Den Eisstieler kleben wir unter die beiden Motoren.

Nun wird es etwas kompliziert. In das Dübelholz für die Räder müssen wir eine Nut fräsen, die so breit wie die Mitte des Eisstieler ist. Dazu können wir einen Dremel verwenden, aber auch eine grobe Feile oder Raspel. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, kleben wir das Dübelholz mit der Nut über dem Eisstieler zwischen die beiden Motoren.

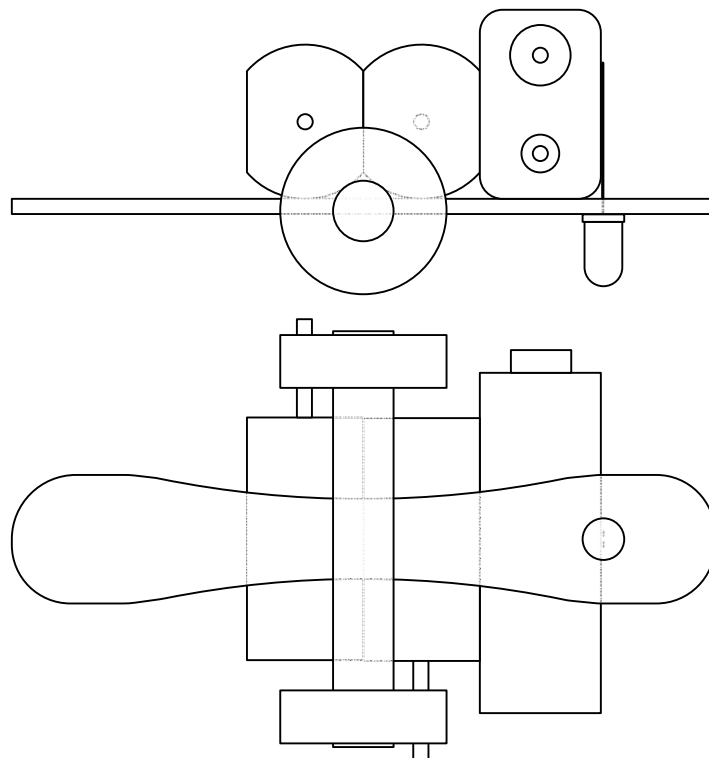


Abbildung 2: Die Mechanik des Modells im Maßstab 1:1

Als Stütze verwenden wir diesmal einfach eine LED. Dazu boren wir zwei kleine Löcher in den Eisstieler. Dort können wir die Anschlüsse durchstecken. Die LED sollte von allein halten, da sich an den Anschlüssen immer kleine Abstandhalter befinden. Den Abstand der LED zu den Motoren sollte man so wählen, dass dort eine 9 V-Batterie dazwischen passt. Wie man schon erahnen kann, wird vorn am Eisstieler der Sensor angebracht. Dazu aber später mehr.

3 Die Sensorik

Bewegt man den Reflexkoppler CNY70 über der Bahn von der schwarzen zur weißen Oberfläche, gibt es einen Bereich, indem der Fototransistorstrom und die Verschiebung bezogen auf die Trennungslinie einen nahezu linearen Zusammenhang haben. Dieser Bereich ist etwa 6 mm breit, wenn man den Sensor in einem Abstand von 5 mm zur Bahnoberfläche betreibt [8]. Dies ist in Abbildung 3 vereinfacht dargestellt.

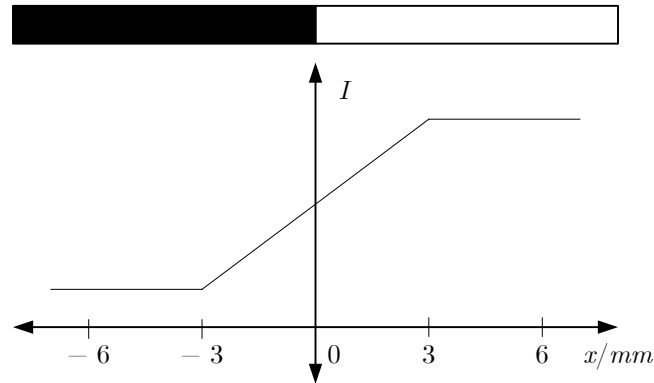


Abbildung 3: Der Sensorstrom I in Abhängigkeit von der Verschiebung x

Den Sensorstrom wandelt man am besten mit einem Operationsverstärker (OPV) in eine Spannung um [4, 9]. Dazu beschaltet man ihn wie in Abbildung 4 als Strom-Spannungs-Wandler. Aus dem Eingangsstrom I_e wird dann eine Spannung $U_a = -R \cdot I_e$. Mit dem Widerstand R kann man die Verstärkung einstellen. Ein großer Widerstand ergibt hohe Ausgangsspannungen und damit eine hohe Verstärkung.

Am nichtinvertierenden Eingang (+) des OPVs muss eine Referenzspannung anliegen. Üblicherweise verwendet man die halbe Versorgungsspannung. So kann man Ströme messen, die sowohl in den Wandler rein- aber auch rausfließen. Fließt kein Strom, erscheint am Ausgang die Referenzspannung. Fließt Strom in den Wandler rein, wie in Abbildung 4 dargestellt, sinkt die Ausgangsspannung um den Betrag $R \cdot I_e$. Daher auch das negative Vorzeichen in der Formel. Kehrt sich der Strom um, fließt er also aus dem Wandler raus, steigt die Versorgungsspannung um den Betrag $R \cdot I_e$ an.

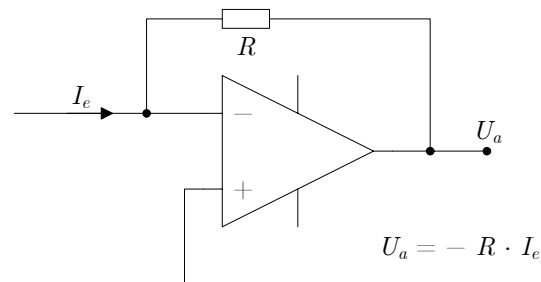


Abbildung 4: Strom-Spannungs-Wandler

Mit dem Strom-Spannungs-Wandler kann man aber auch Ströme addieren. Man muss sie nur am invertierenden (-) Eingang zusammenführen. In Abbildung 5 werden die Ströme I_1 , I_2 und I_3 aufaddiert.

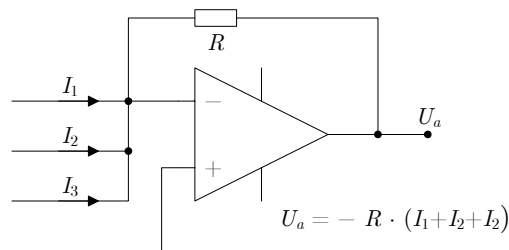


Abbildung 5: Ströme addieren mit dem dem Strom-Spannungs-Wandler

Diese Schaltung besitzt aber noch eine weitere Besonderheit. Solange der Ausgang nicht voll angesteuert ist, also irgendwo zwischen der minimalen und maximalen Ausgangsspannung liegt, erscheint am invertierenden Eingang auch die Referenzspannung vom nichtinvertierenden Eingang. Das hängt mit der hohen Verstärkung eines Operationsverstärkers zusammen. Er „versucht“ immer mit Hilfe des Gegenkopplungswiderstands R , die Differenz zwischen den beiden Eingängen auf Null zu treiben.

3.1 Mittenabgleich und Verstärkung

Setzen wir den Strom-Spannungs-Wandler in die Praxis um, können wir zur Erzeugung der Referenzspannung einen einfachen Spannungsteiler verwenden. In Abbildung 6 wird dieser durch die beiden gleichen Widerstände $R3$ und $R4$ gebildet. Sie sollten etwa 10–100 k Ω groß sein. Bei einer Versorgungsspannung von 9 V erhält man dann am nichtinvertierenden Eingang 4,5 V. Diese Spannung erscheint dann auch am invertierenden Eingang.

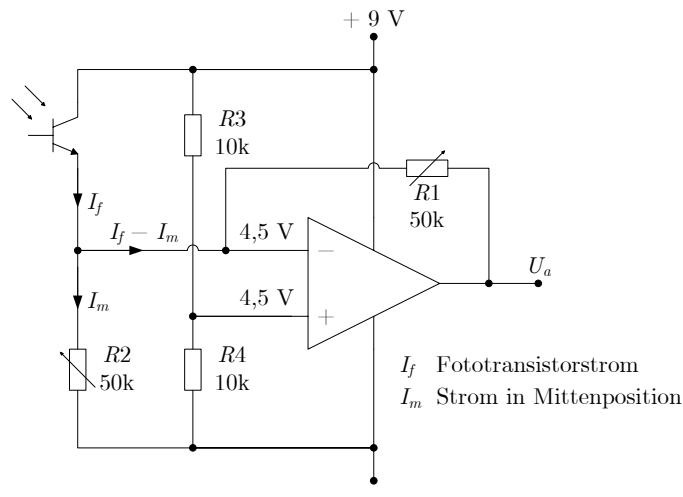


Abbildung 6: Wandlung des Fototransistorstroms in eine Spannung

Wenn sich der Sensor genau mittig über der Trennungslinie befindet, soll am Ausgang auch die Mittenspannung von 4,5 V erscheinen. Nur so können wir eine Verschiebung in beide Richtungen messen. Der Fototransistor liefert dann einen Strom, der genau der mittleren Helligkeit entspricht. Da die Mittenspannung aber nur ausgegeben wird, wenn kein Strom in den Spannungswandler fließt, müssen wir diesen „Mittenstrom“ I_m am Strom-Spannungs-Wandler vorbeischleusen. Das erreichen wir mit dem einstellbaren Widerstand $R2$. Der Strom durch diesen Widerstand wird vom Fototransistorstrom I_f abgezogen. Da über dem Widerstand immer 4,5 V abfallen, bleibt der eingestellte Mittenstrom I_m immer konstant und ist

$$I_m = \frac{4,5 \text{ V}}{R2}$$

Mit dem einstellbaren Widerstand $R1$ können wir die Verstärkung einstellen. Berücksichtigt man den Mittenstrom erhält man für die Ausgangsspannung

$$U_a = 4,5 \text{ V} - R1 \cdot (I_f - I_m)$$

3.2 Den Sensor verbreitern

Beim Experimentieren mit dem CNY70 hat sich gezeigt, dass der Graubereich von nur 6 mm zu klein für eine kontinuierliche Regelung ist. Enge Kurven und kleine Unebenheiten auf der Bahn führen zu einem Überschwingen und anschließendem Pendeln des Modells. Der Sensor ist zu empfindlich. Wir müssen also den Bereich, den der Sensor „sehen“ kann, irgendwie vergrößern. Das können wir erreichen, indem wir noch einen zweiten Sensor verwenden. Diesen setzen wir einfach neben den ersten und addieren beide Sensorströme. Wie Abbildung 7 zeigt, verdoppeln wir dadurch den Graubereich auf etwa 12 mm.

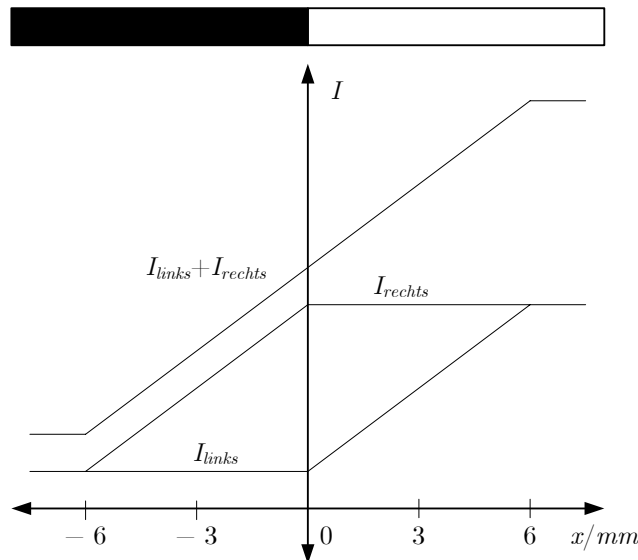


Abbildung 7: Der Sensorstrom bei zwei gekoppelten Sensoren

Da der Strom-Spannungs-Wandler mehrere Ströme addieren kann, müssen wir die Fototransistoren nur parallel schalten. Die Kollektoren kommen an den Plus-Pol der Spannungsquelle. Die Emittoren bilden den Ausgang. Die Leuchtdioden können einfach in Reihe geschaltet werden. Der Strom durch beide ist dann gleich und kann mit einem Vorwiderstand eingestellt werden. Über einer Leuchtdiode fällt etwa $U_D = 1,1 \text{ V}$ ab. Bei einer Betriebsspannung von $U_B = 9 \text{ V}$ müssen dann über dem Widerstand $6,8 \text{ V}$ abfallen. Soll ein Strom von $I_D = 20 \text{ mA}$ fließen, erhalten wir

$$\begin{aligned} R_V &= \frac{U_B - 2U_D}{I_D} \\ &= \frac{9 \text{ V} - 2 \cdot 1,1 \text{ V}}{20 \text{ mA}} \\ &= 340 \Omega \end{aligned}$$

Wir können hier also einen Widerstand von 330Ω wählen. 270Ω tun es aber auch. Kleinere Werte sollte man aber auf keinen Fall nehmen, da der Strom sonst zu groß wird und die Dioden kaputt gehen können. Abbildung 8 und 9 zeigen die Verdrahtung der beiden Sensoren. Beide kommen später vorn an den Eisstiel.

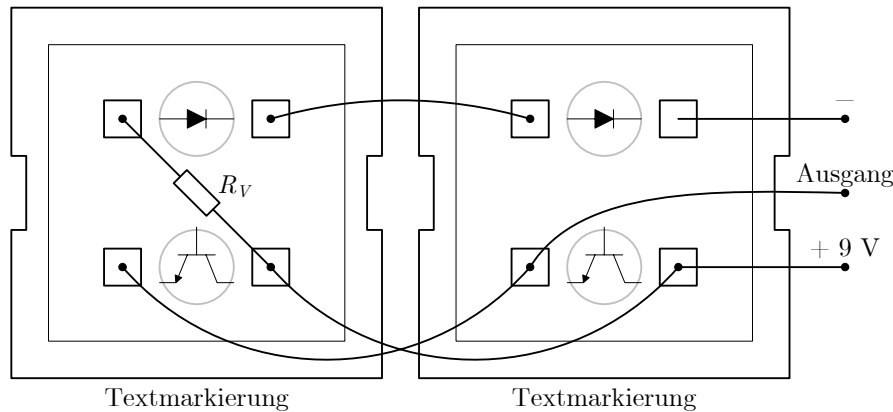


Abbildung 8: Verdrahtung der Sensoren

Auf diese Weise kann man sogar noch mehr Sensoren zusammenschalten – alle Transistoren parallel und die Leuchtdioden in Reihe. Das Gesamte verhält sich dann wie ein einzelner Sensor. Deshalb sprechen wir von nun an nur noch von *einem* Sensor, wenn wir die Kombination aus mehreren meinen.

3.3 Erste Experimente

Genug der Theorie. Probieren wir die Sensorschaltung doch einfach mal aus. Abbildung 9 zeigt, dass man als Operationsverstärker den Schaltkreis LM324 verwenden kann [2]. Er integriert gleich vier Operationsverstärker auf einem Chip. Wir verwenden aber hier nur einen davon. Man kann nun die Kennlinie der Sensorkombination aufnehmen. Abbildung 10 zeigt das Ergebnis mit weißem Papier, dass mit schwarzer Farbe bedruckt

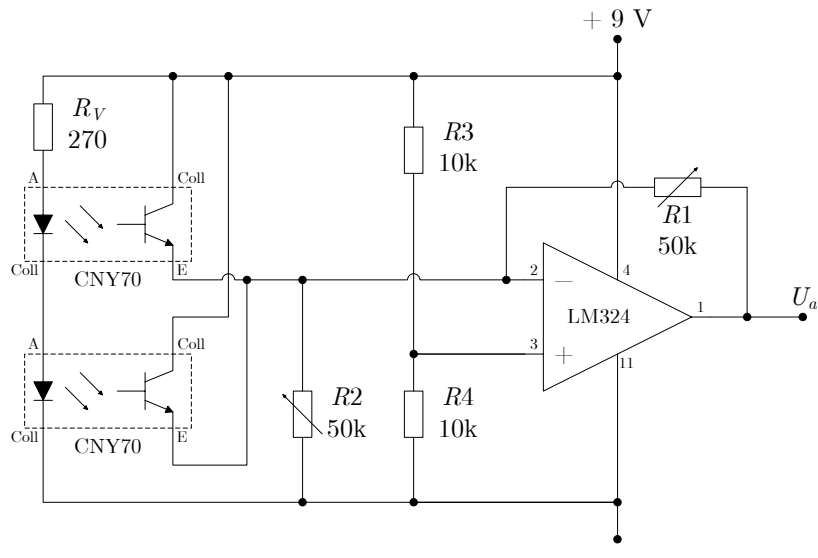


Abbildung 9: Gesamte Sensorschaltung

ist. Der Sensor befand sich dabei in einem Abstand von etwa 5,5 mm zur Oberfläche. Der Widerstand $R1$ war auf $4,6 \text{ k}\Omega$ und $R2$ auf $8 \text{ k}\Omega$ eingestellt.

Wenn man genau hinschaut, erkennt man einen kleinen Knick in der Mitte. Diese Nichtlinearität entsteht durch die Kombination der beiden Sensoren. Sie ist ein Zeichen dafür, dass der Abstand der Sensoren zur Oberfläche vielleicht etwas zu klein ist. Die Schaltung wird aber später trotzdem funktionieren.

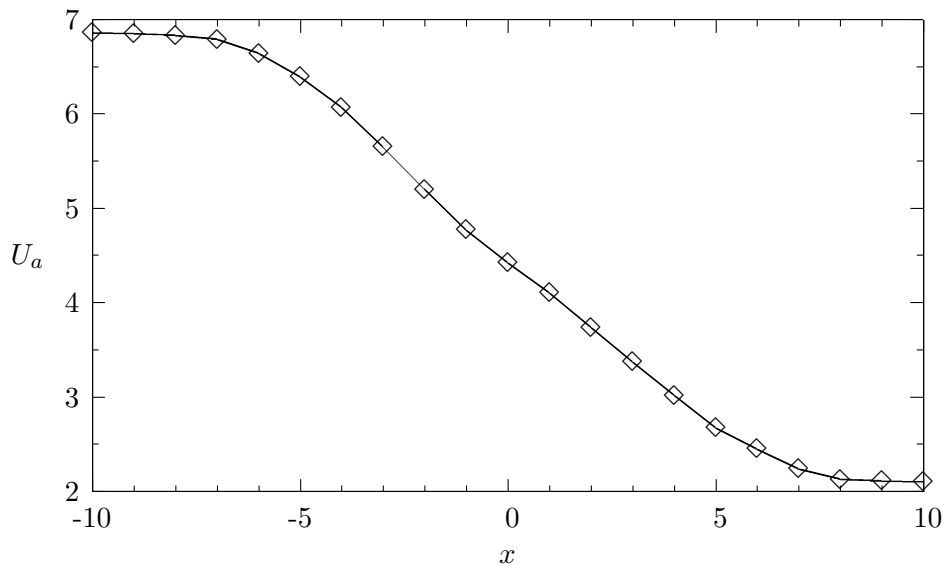


Abbildung 10: Ausgangsspannung U_a in Abhängigkeit von der Verschiebung x

4 Leistungsverstärkung

Die Motoren mit einem normalen Operationsverstärkerschaltkreis, wie dem LM324, direkt anzusteuern ist keine gute Idee. Er liefert mit 20 mA nicht genügend Ausgangsstrom. Deshalb haben wir ihn in [1] mit externen Leistungstransistoren versehen. Der NPN-Transistor ist, wie in Abbildung 11 zu sehen, für das Beschleunigen und der PNP-Transistor für das Bremsen des Motors verantwortlich.

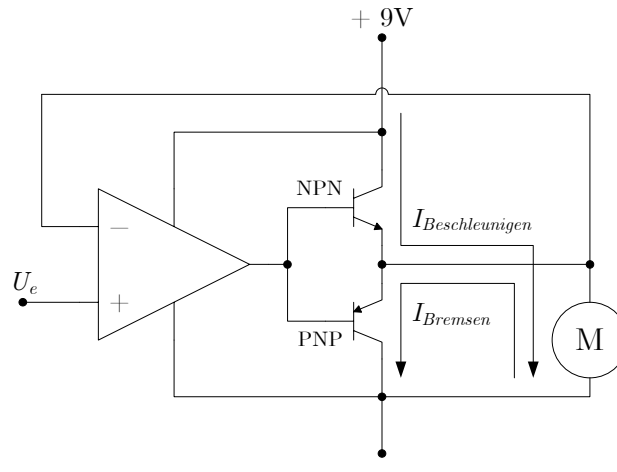


Abbildung 11: Ströme im Leistungsverstärker

Beim Beschleunigen fließt der Strom vom Plus-Pol der Spannungsquelle durch die Kollektor-Emitter-Strecke des NPN-Transistors durch den Motor. Hat der Motor die entsprechende Drehzahl erreicht, fließt durch diesen Transistor nur noch ein vergleichsweise kleiner Leerlaufstrom. Genauso wichtig wie das Beschleunigen ist aber auch das Bremsen. Nur so verhindert man das Überschwingen und Pendeln des Modells. Der Bremsstrom fließt im Motor in Gegenrichtung zum Beschleunigungsstrom und somit durch den PNP-Transistor. Er arbeitet hier als Kurzschlussbremse. Überschüssige Rotations- und Bewegungsenergie wird über diesen Transistor in Wärme umgewandelt.

Diese aus zwei komplementären Transistoren (NPN und PNP) aufgebaute Schaltung wird Gegentaktendstufe genannt. Sie wird häufig zur Audio-Leistungsverstärkung und damit zur Ansteuerung von Lautsprechern eingesetzt. Man hat irgendwann versucht, diese Art von Leistungsverstärkern auf einem einzigen Chip zu integrieren. Daraus sind die heute weit verbreiteten Leistungsoperationsverstärker hervorgegangen. Sie haben die gleichen Anschlüsse wie Operationsverstärker und werden auch genauso verwendet. Wesentlicher Unterschied sind die integrierten Leistungstransistoren am Ausgang (vgl. Abbildung 12). Sie vertragen bei kräftigen Verstärkern mehrere Ampere.

Wir benötigen für unsere Zwecke einen Leistungsverstärker, der mit wenigen Volt Versorgungsspannung auskommt. Unser Modell soll ja mit Batterien versorgt werden. Auch treten bei uns nicht so hohe Ströme auf, wie in „lauten“ HiFi-Anlagen. Deshalb sollten wir uns nach einem Leistungsverstärker umschauen, der in Kofferradios oder

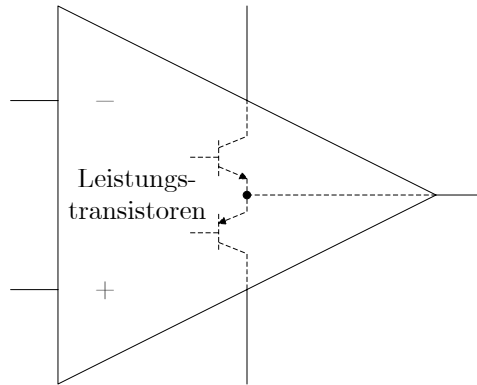


Abbildung 12: Prinzipschaltbild eines Leistungs-OPVs

Walkmans eingesetzt wird. Ein solcher Schaltkreis ist der TDA7231A [6]. Er liefert einen maximalen Ausgangsstrom von 1 A, kommt ohne Kühlkörper aus und arbeitet schon ab einer Versorgungsspannung von 1,8 V.

Abbildung 13 zeigt den inneren Aufbau und die Anschlüsse dieses Schaltkreises. An Pin 3 und 4 findet man die Eingänge des Verstärkers und an Pin 2 den Ausgang. Der Minuspol der Spannungsversorgung wird an den Pins 5–8 und der Pluspol an Pin 1 angeschlossen. Wer den Verstärker schon mal ausprobieren möchte, kann die Schaltung aus Abbildung 13 nachbauen. Mit dem Potentiometer R_1 kann man die Drehzahl des Motors stufenlos einstellen. Durch die Verbindung des Ausgangs mit dem invertierenden Eingang erreicht man eine Verstärkung von eins. Der Schaltkreis arbeitet dann als Spannungsfolger. Die Dioden zum Schutz vor Überspannungen muss man bei kleinen Motoren nicht einbauen. Sie „vernichten“ die von den Motorspulen verursachten Induktionsströme.

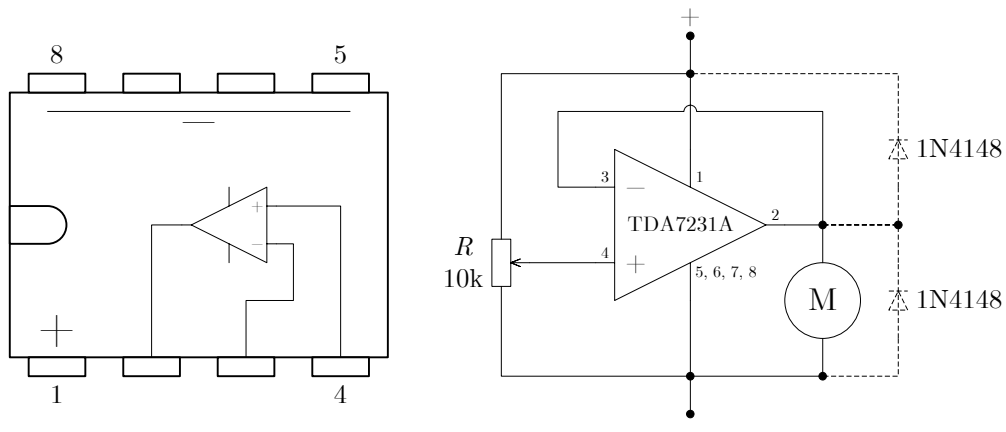


Abbildung 13: Der Leistungsverstärker TDA7231A zur Drehzahlsteuerung

5 Das Spurt-Modell

Man könnte meinen, dass man für jeden Motor einen eigenen Leistungsverstärker aufbauen muss. Mit einem einfachen Trick kommen wir aber auch mit nur einem aus. Man kann einen Motor am Ausgang des Leistungsverstärkers nicht nur mit dem Minuspol der Spannungsquelle verbinden, sondern auch mit dem Pluspol. Das liegt an dem symmetrischen Aufbau der Gegentaktendstufe. Die Ausgangstransistoren tauschen dann ihre Aufgaben (vgl. Abbildung 14). Der PNP-Transistor ist dann für das Beschleunigen zuständig und der NPN-Transistor für das Bremsen.

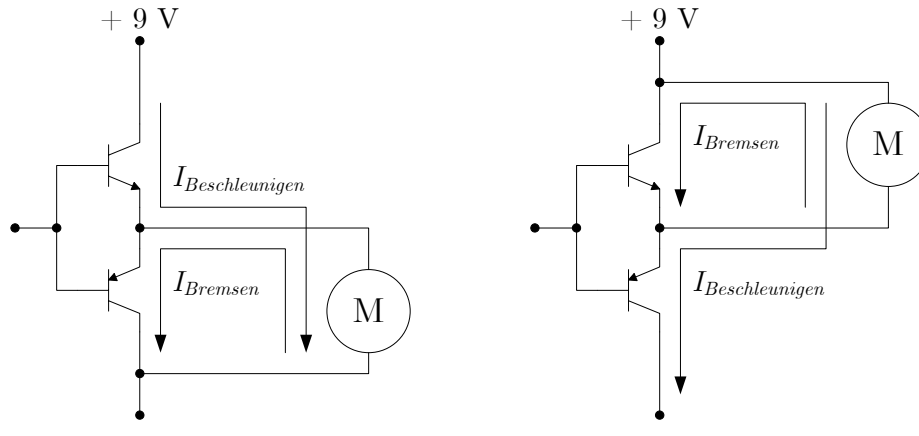


Abbildung 14: Den Motor an Plus oder Minus anschließen

Ist der Motor am Pluspol angeschlossen, kehrt sich aber auch der Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Drehzahl um. Haben wir eine hohe Ausgangsspannung, fällt über dem Motor weniger Spannung ab. Wir erhalten eine niedrige Drehzahl. Ist die Ausgangsspannung niedrig, fällt über dem Motor mehr Spannung ab. Die Drehzahl ist hoch. Diese Umkehrung erinnert uns an die differentielle Ansteuerung. Der eine Motor soll schneller laufen, wenn der andere langsamer läuft.

Man kann die beiden Motoren aus Abbildung 14 sogar an nur einen Leistungsverstärker anschließen. Dann ist unsere zuerst kompliziert erscheinende Motoransteuerung schon fertig. Wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, liegt über beiden Motoren zusammen immer die volle Betriebsspannung an. Das arithmetische Mittel der Motorspannungen ist immer gleich und damit auch die Geschwindigkeit des Modells. Dagegen wird die Differenz zwischen den Spannungen durch die Verschiebung der Verstärkerausgangsspannung nach Plus oder Minus gesteuert.

Da der Leistungsverstärker TDA7231A genau wie ein Operationsverstärker arbeitet, können wir ihn auch gleich als Strom-Spannungs-Wandler verwenden. Die Widerstände $R3$ und $R4$ erzeugen die Referenzspannung von 4,5 V. Mit $R2$ stellen wir die Mittenposition ein und mit $R1$ die Verstärkung. Am nichtinvertierenden Eingang schließen wir den Ausgang des Sensors an. Dabei ist es egal, ob er nur aus einem CNY70 oder mehreren besteht. Die Fototransistorströme werden ja aufsummiert. Die Dioden am Ausgang des

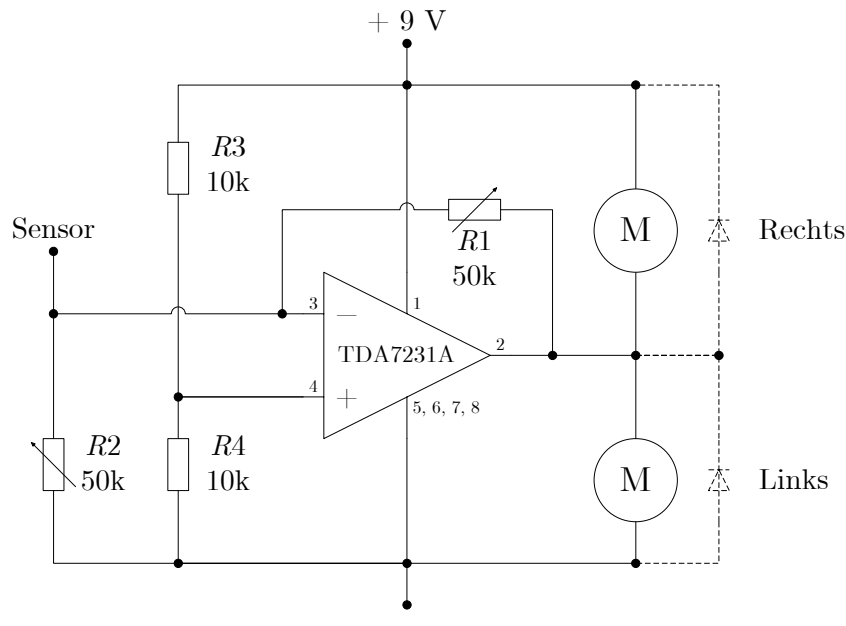


Abbildung 15: Spurt-Schaltung mit dem Leistungsverstärker TDA7231A

Verstärkers müssen bei kleinen Motoren wie den Mabuchi FF-180PH nicht unbedingt sein.

5.1 Funktion der Schaltung

Haben wir mit $R2$ die Schaltung so justiert, dass bei Mittenposition des Sensors die halbe Versorgungsspannung am Ausgang erscheint, laufen beide Motoren gleich schnell. Das Modell fährt geradeaus. Bekommt der Sensor in einer Linkskurve mehr Licht, sinkt die Ausgangsspannung. Über dem linken Motor fällt weniger Spannung ab. Er läuft langsamer. Dagegen fällt über dem rechten mehr Spannung ab, was ihn schneller laufen lässt. In einer Rechtskurve bekommt der Sensor weniger Licht. Die Ausgangsspannung steigt an. Der linke Motor läuft schneller und der rechte langsamer.

5.2 Zusammenbau und Endmontage

Wir haben nun alles, was wir für ein Spurt-Modell benötigen: die Mechanik, den Sensor aus zwei CNY70 und die Verstärkerschaltung. Die beiden Reflexkoppler bringen wir nun vorn an den Magnum-Eisstiel an (vgl. Abbildung 16). Dazu bohren wir acht Löcher. Dabei hilft uns eine Lochrasterplatine als Schablone. Bevor wir die Drähte, wie in Abbildung 8 auf Seite 8 gezeigt, anlöten, sollte man die Reflexkoppler unbedingt ankleben. Sie dürfen später nicht wackeln.

Die Verstärkerschaltung bauen wir auf einer Lochrasterplatine auf. Daran schließen wir die Motoren und den Anschlussclip für die Batterie an. Dafür kann man auch Steckverbinder verwenden. So lässt sich das Modell leichter zusammen- und wieder

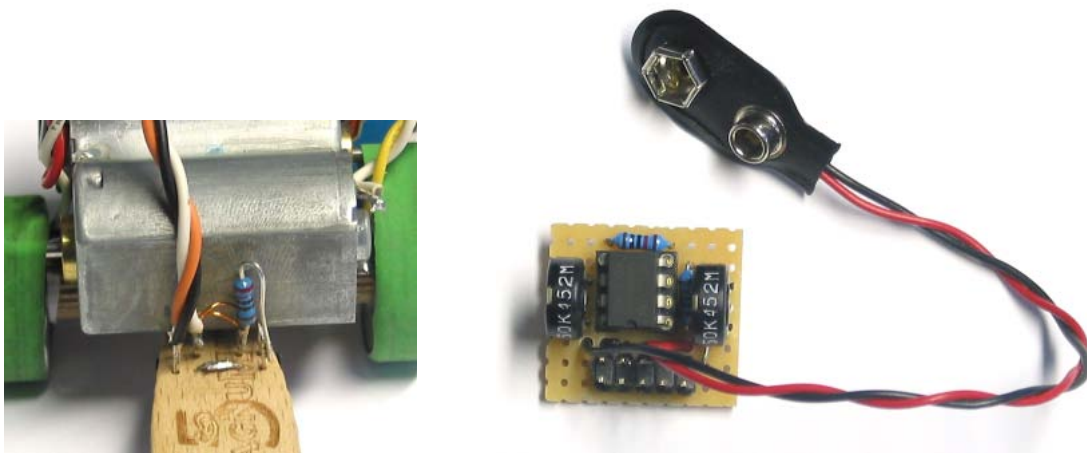


Abbildung 16: Die Sensoren und die Verstärkerplatine

auseinanderbauen. Die Platine können wir nun einfach mit zweiseitigem Klebeband auf dem Modell befestigen. Wenn alles fertig ist, setzen wir noch die Batterie auf das Modell. Nun müssen noch die beiden Potentiometer $R1$ und $R2$ eingestellt werden. Dabei sollte man so vorgehen:

- $R1$ auf etwa $10\text{ k}\Omega$ einstellen
- Die Sensoren so platzieren, dass der eine Sensor über dem hellen und der andere über dem dunklen Bereich liegt (Mittenposition)
- $R2$ so einstellen, dass am Ausgang die halbe Versorgungsspannung anliegt
- $R1$ so weit vergrößern, dass das Modell auch um die engen Kurven herumkommt. Schwingt das Modell hin und her, muss man $R1$ etwas verringern.

Bei der Einstellung der Mittenposition mit $R2$ ist etwas Fingerspitzengefühl gefragt. Hier kommt es nicht auf den genauen Spannungswert an, sondern dass die Auslenkung des Modells bei einer Linkskurve genauso groß ist, wie bei einer Rechtskurve. Dazu kann man sich beispielsweise an der Position der hinteren Stütze des Modells (LED) orientieren. Die Abweichung von der Trennungslinie sollte bei der Links- und Rechtskurve gleich groß sein.

Stück	Beschreibung	Typ
2	Motoren	Mabuchi FF-180PH
2	Kugellager	608
1	Magnum-Eisstiel	
1	Dübelholz	8 mm Durchmesser
1	Luftballon	
1	LED als Stütze	5 mm
1	Audio-Leistungsverstärker	TDA7231A
1	IC-Fassung	DIL8
2	Reflexkoppler	CNY70
2	50 k Ω Potentiometer	10 mm, Stehend
2	10 k Ω Widerstände	
1	270 Ω Widerstand	
1	9 V Batterie oder Akku	
1	Batterieanschlussclip	
	Kabel, Lochrasterplatine	

Tabelle 1: Stückliste

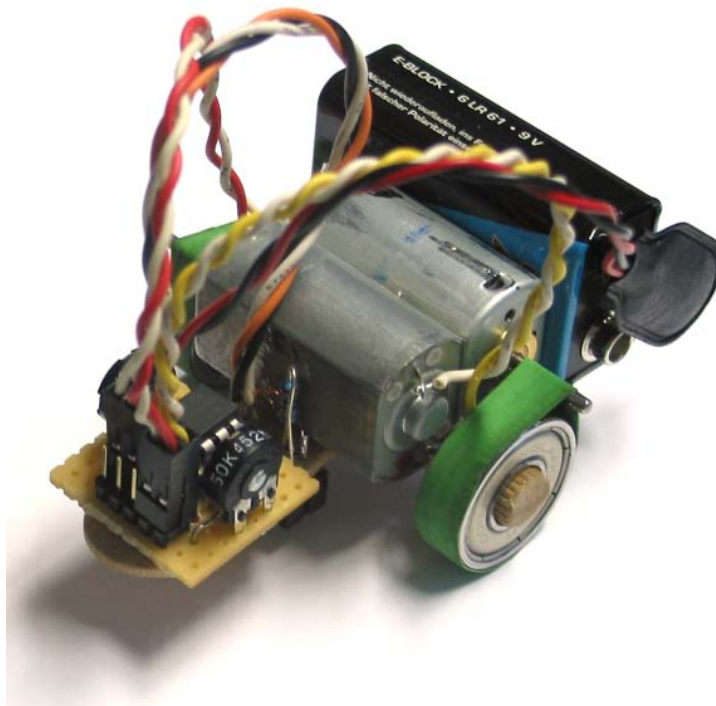


Abbildung 17: Das fertige Modell

6 Eine andere Aufbauvariante

Man kann nun versuchen, das hier vorgestellte Modell schneller zu machen, zum Beispiel mit stärkeren Motoren oder durch Vergrößern des Motorwellendurchmessers. Jedoch wird man feststellen, dass auch dieses Modell schnell an seine Grenzen kommt und anfängt hin und her zu schwingen. Das liegt einerseits an dem immer noch recht kleinen Sichtbereich der Sensoren. Die eigentliche Ursache liegt jedoch in einer ganz anderen Baugruppe unseres Modells – dem Getriebe.

Wir haben bisher ein Riemengetriebe aus Motorwelle, Kugellager und Luftballongummi aufgebaut. Das funktioniert eigentlich ganz gut. Aber beim kräftigen Bremsen oder Beschleunigen in der Kurve dehnt sich der Gummi etwas. Das kann man leicht überprüfen, indem man das Modell vor sich auf den Tisch stellt und es dann ein wenig um seine Achse dreht. Je nach Gummiqualität können da schon einige Millimeter Dehnung zusammen kommen. Das führt am Ende dazu, dass das Modell nicht sofort auf eine Richtungsänderung reagieren kann. Da hilft dann auch die beste Elektronik nichts.

Wir sollten also versuchen, das Getriebe so starr wie möglich aufzubauen. Das geht am besten mit einem Reibradgetriebe. Dabei liegt die Motorwelle direkt auf dem Rad auf. Das ist allerdings nicht einfach aufzubauen. Man kann aber versuchen, entweder das Rad, die Motorwelle oder beide mit einem dicken Gummiüberzug zu vergrößern. Abbildung 18 zeigt die Mechanik einer Aufbauvariante mit den kleineren Motoren FF-050SK von Mabuchi. Wenn man sie zusammen mit dem Dübelholz auf einen Eisstiel klebt und die Kugellager mit Luftballongummischlauch überzieht, erhält man ein gut funktionierendes Reibradgetriebe.

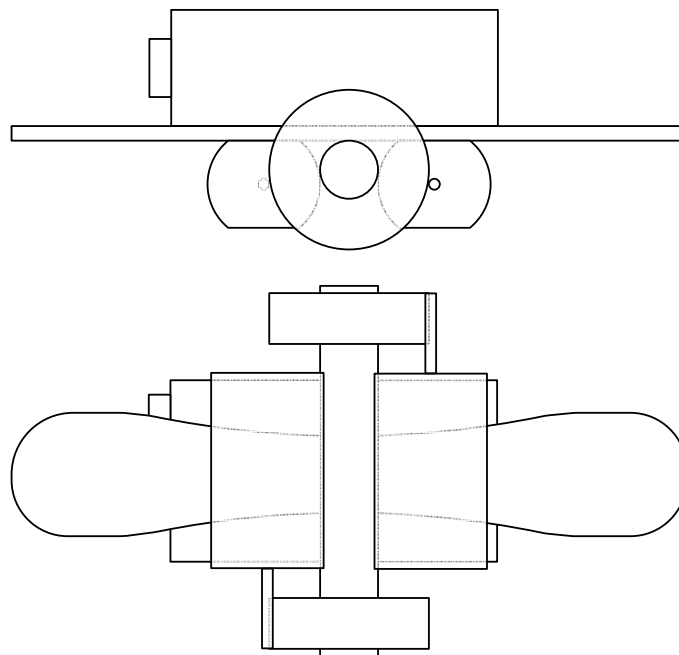


Abbildung 18: Ein Modell mit Reibradgetriebe

Da sich durch diese Konstruktion der Abstand des Eisstiels von der Bahnoberfläche vergrößert hat, paßt nun die gesamte Leiterplatte einschließlich der Reflexkoppler darunter. Abbildung 19 zeigt die Leiterplatte mit vier CNY70, welche alle parallel geschaltet sind. Man benötigt nun nicht einmal eine zusätzliche Stütze. Die stehenden Potentiometer sorgen für einen perfekten Abstand zwischen den Sensoren und der Bahnoberfläche. Man muss nur darauf achten, dass die 9 V-Batterie etwas weiter vorn auf dem Modell aufliegt, damit es nicht nach hinten über kippt.



Abbildung 19: Verstärker mit vier Reflexkopplern auf einer Platine

7 Tipps zur Weiterentwicklung

Wir haben eine einfache und leicht nachzubauende Schaltung für unser Spurtmodell aufgebaut. Dennoch weist sie einige Schwachstellen auf. Leistungsoperationsverstärker haben nicht so perfekte Eigenschaften wie normale Operationsverstärker. Der Strom-Spannungs-Wandler arbeitet nicht ganz so linear. Da beide Motoren nur von einem Verstärker angesteuert werden, beeinflussen sie sich auch gegenseitig. Das kommt besonders bei starken Motoren zum Tragen. Deshalb kann man versuchen, den Strom-Spannungs-Wandler mit einem Operationsverstärker aufzubauen und je einen Leistungsverstärker für den linken und rechten Motor einzusetzen. Als Operationsverstärker kann man wieder den LM324 [2] verwenden und für die Leistungsverstärker zwei TDA7231A [6] oder den Stereoverstärker TDA2822M [5].

Während der Geradeausfahrt fällt über jedem Motor nur die halbe Versorgungsspannung ab. Auch in den Kurven wird der mögliche Spannungshub von 9 V nie voll ausgeschöpft. Deshalb sollte man Motoren wählen, die bei einer Versorgungsspannung von 4,5 V optimal arbeiten. Der ohmsche Innenwiderstand des Motors, sollte aber nicht kleiner als 4 Ω sein. Diesen kann man mit einem normalen Multimeter bestimmen.

Noch ein weiterer Tipp: Baut man die Spannungsquelle mit mehreren Batterien auf, z. B. vier mal 1,5 V, kann man die Referenzspannung einfach in der Mitte abgreifen. So spart man sich die Widerstände $R3$ und $R4$.

Stück	Beschreibung	Typ
2	Motoren	Mabuchi FF-050SK-11170
2	Kugellager	608
1	Magnum-Eisstiel	
1	Dübelholz	8 mm Durchmesser
1	Luftballon	
1	Audio-Leistungsverstärker	TDA7231A
1	IC-Fassung	DIL8
4	Reflexkoppler	CNY70
2	50 k Ω Potentiometer	10 mm, Stehend
2	10 k Ω Widerstände	
1	220 Ω Widerstand	
1	9 V Batterie oder Akku	
1	Batterieanschlussclip	
	Kabel, Lochrasterplatine	

Tabelle 2: Stückliste für das Modell mit vier Sensoren

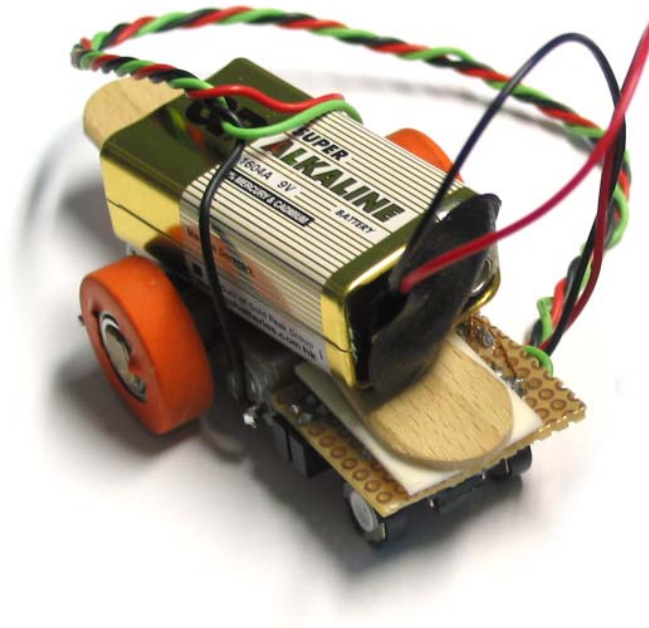


Abbildung 20: Das Modell mit vier Sensoren

8 Warum das Modell so gut funktioniert

Wer sich mit Elektrotechnik und Mechanik beschäftigt, kommt meist nicht um ein paar Rechnereien herum. Es ist wohl aber so, dass sich die Anzahl der Leser eines populärwissenschaftlichen Textes leider mit jeder Formel halbiert. Deshalb habe ich die Mathematik, die sich hinter dem Modell verbirgt, an das Ende dieser Anleitung gehängt. Somit schreckt hoffentlich niemand vor dem Nachbauen zurück, und es können auch die von Natur aus Skeptischen nachvollziehen, warum die Schaltung eigentlich so gut funktioniert.

Wir untersuchen dabei zuerst, wie sich die Motordrehzahl auf die Geschwindigkeit des Modells auswirkt. Dann versuchen wir herauszufinden, was eigentlich genau passiert, wenn die Räder des Modells mit unterschiedlichen Drehzahlen laufen. Es ist auf Anhieb klar, dass das Modell dann eine Kurve fährt. Wie groß diese Kurve genau ist und wie das Modell beschaffen sein muss, damit es den Parcours auf der Wettkampfbahn optimal bewältigt, werden wir als nächstes berechnen.

Wie kommt es eigentlich, dass der Sensor zusammen mit unserer Verstärkerschaltung immer genau die richtige Motordrehzahl einstellt? Wie muss der Sensor platziert sein, damit das möglichst gut funktioniert? All diesen Fragen werden wir in den nun folgenden Abschnitten auf den Grund gehen. Mit dem Mathe- und Physik-Schulwissen der 10. Klasse sollte dabei niemand Probleme haben. Wir werden nur die Geschwindigkeitsgleichung aus der Physik und Formeln der Geometrie des Kreises und Dreiecks verwenden.

8.1 Die Geschwindigkeit des Modells

Gehen wir der Einfachheit halber erst einmal davon aus, dass beide Motoren gleich schnell laufen. Dann fährt das Modell genau geradeaus. Um nun die Geschwindigkeit des Modells zu ermitteln, müssen wir nur die Geschwindigkeit eines Rades bestimmen. Es ist klar, dass die Geschwindigkeit hoch ist, wenn der Motor eine hohe Drehzahl liefert. Wenn der Motor steht, ist die Geschwindigkeit gleich null. Auch wenn das trivial erscheint, sollte man immer mit solchen Vorbetrachtungen beginnen, bevor man irgendwelche Formeln aufstellt. So kann man am Ende die Richtigkeit der Ergebnisse überprüfen.

Wie Abbildung 21 zeigt, besteht unser Antriebssystem aus der Motorwelle, dem Rad und einem Reibriemen – dem Luftballongummi. Der Reibriemen verläuft auf der Oberfläche der Motorwelle, des Rades und der Bahn. Wir gehen auch davon aus, dass nichts verrutscht, der Riemen also auf allen drei Oberflächen genügend Haftung hat. Wenn sich das Rad dreht, rollt es im Prinzip seinen Umfang auf der Bahnoberfläche ab. Bei einer Umdrehung legt das Modell dann genau die Länge des Radumfangs $u_R = \pi d_R$ zurück. Die Geschwindigkeit des Modells ergibt sich dann aus dem Produkt des Umfangs und der Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde, also der Drehzahl n_R .

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\pi d_R}{t} = \pi d_R n_R$$

Die Geschwindigkeit ist also proportional zum Durchmesser und zur Drehzahl des Rades. Da, wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, der Reibriemen sowohl auf der Oberfläche der

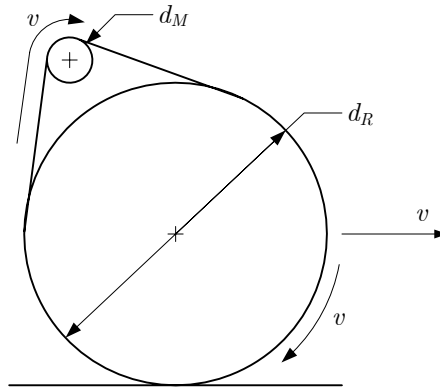


Abbildung 21: Das Riemengetriebe aus Motor und Rad

Bahn, der Oberfläche des Rades aber auch auf der Oberfläche der Motorwelle die gleiche Abrollgeschwindigkeit hat, ergibt sich

$$v = \pi d_R n_R = \pi d_M n_M \quad (1)$$

wobei d_M der Durchmesser und n_M die Drehzahl der Motorwelle ist. Wir haben nun den Zusammenhang zwischen der Drehzahl des Motors und der Geschwindigkeit des Modells hergestellt. Interessant ist, dass die Geschwindigkeit nicht vom Durchmesser des Rades, sondern nur vom Durchmesser der Motorwelle und dessen Drehzahl abhängt. Dies kann man sich damit erklären, dass im Prinzip auch der Umfang der Motorwelle mit Hilfe des Reibriemens auf der Bahnoberfläche abgerollt wird. Egal wie groß die Räder des Modells sind, es wird immer gleich schnell fahren. Das ist eine wichtige Erkenntnis. Die Gleichung bestätigt auch unsere Vermutung, dass bei einer hohen Motordrehzahl eine hohe Geschwindigkeit erzielt wird und das Modell stehen bleibt, wenn sich der Motor nicht mehr dreht.

Untersuchen wir jetzt einmal, wie hoch die Motordrehzahl sein muss, wenn wir einen neuen Bahnrekord von 5 s aufstellen wollen. Da der Parcours eine Länge von 4,6 m hat, ergibt sich eine Mindestgeschwindigkeit von

$$\begin{aligned} v &= \frac{s}{t} = \frac{4,6 \text{ m}}{5 \text{ s}} \\ &= 0,92 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Das ist fast ein Meter pro Sekunde – ganz schön schnell! Stellen wir jetzt die Gleichung (1) nach n_M um und setzen für den Wellendurchmesser 2 mm ein, erhalten wir für die Drehzahl

$$\begin{aligned} n_M &= \frac{v}{\pi d_M} = \frac{s}{t \pi d_M} = \frac{4,6 \text{ m}}{5 \text{ s} \cdot \pi \cdot 0,002 \text{ m}} \\ &= 146,4 \text{ s}^{-1} = 8785 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

Die Motoren müssen also etwa 8800 Umdrehungen pro Minute liefern, damit wir bei einem Wellendurchmesser von 2 mm einen neuen Bahnrekord mit 5 s aufstellen. Leider wird uns das nicht mit den bisher verwendeten Motoren FF-180PH von Mabuchi gelingen. Diese liefern sogar bei 12 V nur 5600 Umdrehungen.

8.2 Der Wendekreis

Nachdem wir ermittelt haben, wie schnell das Modell geradeaus fährt, wollen wir uns nun den Kurven zuwenden. Beginnen wir auch hier erst einmal mit einigen Gedankenexperimenten. Das wird uns wieder helfen, die Formeln besser zu verstehen.

Was passiert, wenn beide Räder gleich schnell laufen, haben wir gerade ausgerechnet. Dann fährt das Modell geradeaus. Läuft aber das linke Rad langsamer als das rechte, fährt das Modell eine Kurve nach links. Ist das rechte Rad langsamer, fährt das Modell eine Rechtskurve. Man könnte annehmen, dass das Modell die engste mögliche Kurve fährt, wenn ein Rad still steht. Das stimmt aber nicht. Läuft ein Rad vorwärts und eins rückwärts und zwar mit gleicher Drehzahl, dreht sich das Modell um die eigene Achse. Das ist die engste Kurve! Tabelle 3 zeigt einige Möglichkeiten für die Kurvenfahrt des Modells.

Linkes Rad	Rechtes Rad	Fahrtrichtung
vorwärts	vorwärts	geradeaus
langsam vorwärts	vorwärts	links
vorwärts	langsam vorwärts	rechts
steht	vorwärts	scharf links
vorwärts	steht	scharf rechts
rückwärts	vorwärts	links um eigene Achse
vorwärts	rückwärts	rechts um eigene Achse

Tabelle 3: Fahrtrichtungen des Modells

Wie können wir nun die Kurve, die das Modell fährt, mit einer Formel beschreiben? Dazu lassen wir es in Gedanken kontinuierlich eine Kurve fahren. Das Modell bewegt sich dann auf einer Kreisbahn. Diesen Kreis nennen wir Wendekreis. Die Größe ist durch seinen Radius bestimmt. In Abbildung 22 fährt das Modell eine Linkskurve mit dem Radius r . Es ist zu erkennen, dass der Wenderadius des linken Rades r_l kleiner ist, als r_r , der Wenderadius des rechten Rades. Dieser ist aber wiederum größer, als der Wenderadius r .

Wir wollen nun r in Abhängigkeit von den Drehzahlen der beiden Motoren n_l und n_r berechnen. Dazu überlegen wir uns zuerst, wie lange das Modell braucht, den Wendekreis mit dem Radius r einmal vollständig zu umfahren. Das linke Rad muss dazu einen Kreis mit dem Radius r_l abfahren. Der Weg ist also gleich dem Umfang u_l dieses Kreises. Die Geschwindigkeit des Rades v_l können wir mit Hilfe der Gleichung (1) unter Verwendung der Motordrehzahl n_l berechnen.

$$t = \frac{u_l}{v_l} = \frac{2\pi r_l}{\pi n_l d_M} = \frac{2r_l}{n_l d_M} \quad (2)$$

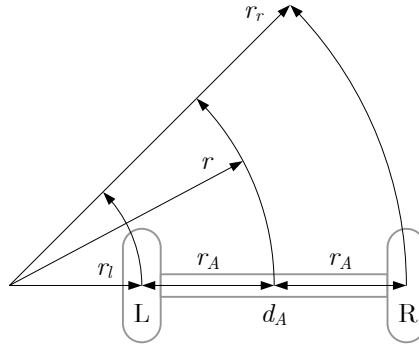


Abbildung 22: Der Wenderadius des Modells

Da beide Räder gleichzeitig ankommen, ist die Umrundungszeit t für beide Räder gleich groß. Somit ergibt sich auch für das rechte Rad.

$$t = \frac{u_r}{v_r} = \frac{2\pi r_r}{\pi n_r d_M} = \frac{2r_r}{n_r d_M} \quad (3)$$

Die beiden Radien r_l und r_r können wir nun durch Umstellen der Gleichung (2) und (3) berechnen. Sie sind jeweils proportional zur Motordrehzahl.

$$r_l = \frac{n_l d_M t}{2}$$

$$r_r = \frac{n_r d_M t}{2}$$

Da wir aber irgendwie auf den Radius r kommen müssen, schauen wir uns die Geometrie in Abbildung 22 noch einmal an. Die Länge des Radius r liegt genau in der Mitte zwischen r_l und r_r . Somit ergibt er sich aus dem arithmetischen Mittel der beiden.

$$r = \frac{r_r + r_l}{2}$$

Den Radabstand d_A können wir auch noch durch die Radien r_l und r_r ausdrücken. Er entspricht genau der Differenz der beiden. Es ergibt sich dann eine ganz ähnliche Formel.

$$d_A = 2r_A = r_r - r_l$$

$$r_A = \frac{r_r - r_l}{2}$$

Setzen wir nun r_r und r_l in beide Gleichungen ein, erhalten wir

$$r = \frac{n_r d_M t / 2 + n_l d_M t / 2}{2}$$

$$r_A = \frac{n_r d_M t / 2 - n_l d_M t / 2}{2}$$

Das sieht noch recht kompliziert aus. Da ist immer noch die Zeit t drin und der Durchmesser der Motorwelle d_M . Wir können das aber mit einem mathematischen Trick vereinfachen, indem wir die Gleichungen dividieren. Dann kürzt sich $d_M t/2$ raus. Die Zweien unter den Bruchstrichen lassen wir erstmal wo sie sind. Die brauchen wir noch, um das Ergebnis besser zu verstehen.

$$\frac{r}{r_A} = \frac{2(n_r + n_l)}{2(n_r - n_l)}$$

Wenn wir jetzt noch mit r_A multiplizieren, haben wir die Größe des Wendekreises durch die beiden Drehzahlen ausgedrückt. Wir können damit also ausrechnen, wie die Kurve aussieht, die das Modell fährt.

$$r = r_A \cdot \frac{2(n_r + n_l)}{2(n_r - n_l)} \quad (4)$$

Ersteinmal sehen wir, dass der Radius direkt proportional zum Radabstand ist. Bei großem Radabstand erhalten wir große Radien, bei kleinem Abstand kleine Radien. Das bedeutet, dass ein Modell mit kleinerem Radabstand wendiger ist, also besser um enge Kurven herumkommt.

Betrachten wir nun wieder einige Spezialfälle. Sind die beiden Drehzahlen gleich, erhalten wir im Nenner eine Null. Der Radius und damit der Wendekreis wird unendlich groß. Das Modell fährt also geradeaus. Ist die Drehzahl des linken Motors gleich null, erhalten wir für den Radius $r = r_A$. Das Modell dreht sich also um das linke Rad im Kreis. Wenn die Drehzahl des rechten Motors null ist, ergibt sich $r = -r_A$. Ein negativer Radius? Das ist tatsächlich etwas schwer vorzustellen. Es bedeutet aber nichts anderes, als dass sich das Modell in die entgegengesetzte Richtung dreht, also um das rechte Rad. Laufen beide Motoren mit gleicher Drehzahl, aber entgegengesetzt, ist $n_r = -n_l$. Dann erhalten wir für den Radius $r = 0$. Das Modell dreht sich um seine eigene Achse. Diese Fälle sind in Tabelle 4 noch einmal zusammengefasst.

Drehzahlen	Wenderadius r	Fahrtrichtung
$n_r = n_l$	∞	geradeaus
$n_r \neq 0, n_l = 0$	r_A	links
$n_r = 0, n_l \neq 0$	$-r_A$	rechts
$n_r = -n_l, n_r > 0$	$(+)0$	links um die eigene Achse
$n_r = -n_l, n_l > 0$	$(-)0$	rechts um die eigene Achse

Tabelle 4: Der Wenderadius in Abhängigkeit von den Motordrehzahlen

Versuchen wir nun, noch ein wenig mehr aus der Gleichung (4) herauszuholen. Was steht da eigentlich im Nenner, wenn wir noch die 2 aus dem Zähler mit berücksichtigen? Die Summe der beiden Drehzahlen geteilt durch 2. Das ist genau das arithmetische Mittel. Es drückt im Prinzip aus, wie schnell das Modell fährt. Deshalb nennen wir es n_v . Wir können damit sogar die Geschwindigkeit des Modells in der Kurve berechnen, wenn wir

die Gleichung (1) auf Seite 19 verwenden.

$$\begin{aligned} n_v &= \frac{n_r + n_l}{2} \\ v &= \pi d_M n_v \\ &= \pi d_M \frac{n_r + n_l}{2} \end{aligned}$$

Mit dem Term im Nenner und der 2 im Zähler können wir so ähnlich verfahren. Dort steht aber die Differenz zwischen den beiden Drehzahlen. Was bedeutet das nun? Ist diese Differenz gleich null, fährt das Modell geradeaus. Sind die beiden Drehzahlen aber unterschiedlich, fährt das Modell eine Kurve. Je größer der Unterschied ist, desto schärfer ist die Kurve. Somit ist also die Differenz ein Maß für die Lenkung des Modells.

$$n_{lenk} = \frac{n_r - n_l}{2}$$

Setzen wir n_v und n_{lenk} wieder in die Gleichung für den Wenderadius ein, erhalten wir

$$r = r_A \cdot \frac{n_v}{n_{lenk}} \quad (5)$$

Der Wenderadius ist also proportional zu n_v und damit zur Geschwindigkeit des Modells und umgekehrt proportional zu n_{lenk} . Wir werden später in unserem Spurtmodell versuchen, diese beiden Parameter unabhängig voneinander einstellbar zu machen.

Setzen wir doch nach so vielen allgemeinen Formeln mal wieder ein paar Zahlen ein. Gehen wir wieder davon aus, dass wir einen Bahnrekord mit 5 s aufstellen wollen, erhalten wir für das arithmetische Mittel der beiden Drehzahlen

$$\begin{aligned} n_v &= \frac{v}{\pi d_M} = \frac{s}{t \pi d_M} = \frac{4,6 \text{ m}}{5 \text{ s} \cdot \pi \cdot 0,002 \text{ m}} \\ &= 146,4 \text{ s}^{-1} = 8785 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

Dies gilt sowohl wenn das Modell geradeaus, aber auch wenn es eine Kurve fährt. Mit etwa 8800 Umdrehungen pro Minute erhalten wir auch das gleiche Ergebnis wie in Abschnitt 8.1.

Wenden wir uns jetzt der Kurvenfahrt zu. Die engen Kurven der Bahn haben einen Radius von 10 cm. Für den Radabstand nehmen wir $d_A = 2r_A = 5 \text{ cm}$ an. So groß war etwa der Abstand beim Modell mit Analogrechner. Setzen wir dies nun in die Gleichung für den Wenderadius ein und stellen nach n_{lenk} um, ergibt sich

$$\begin{aligned} n_{lenk} &= n_v \cdot \frac{r_A}{r} \\ &= 8785 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{2,5 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} \\ &= 2196 \text{ min}^{-1} \end{aligned}$$

Das bedeutet, dass wir die Drehzahl des einen Motors um etwa 2200 Umdrehungen pro Minute anheben und die des anderen um 2200 verringern müssen. Damit das Modell einen Kreis mit 10 cm Radius fährt, muss also der eine Motor mit etwa 11000 und der andere mit 6600 Umdrehungen pro Minute laufen.

8.3 Die Sensorik

Wie die Drehzahl der Motoren eingestellt werden muss, damit das Modell eine bestimmte Kurve fährt, wissen wir jetzt. Nun soll das aber automatisch durch Erkennen der schwarz-weißen Trennungslinie funktionieren. Dazu verwenden wir diesmal nur einen Sensor, den wir genau mittig vor der Radachse platzieren. In Abbildung 23 ist er etwas breiter als tatsächlich vorhanden eingezeichnet, um das Prinzip besser zu verdeutlichen.

Wir gehen ersteinmal davon aus, dass die Radachsenmitte immer über der Trennungslinie bleibt, auch in der Kurve. Dann „sieht“ der Sensor je nach Kurvenradius eine leicht um x verschobene Trennungslinie. Bei einer Linkskurve, wie in Abbildung 23 dargestellt, verschiebt sie sich nach links. Der Sensor empfängt mehr Licht. Bei einer Rechtskurve verschiebt sich die Trennungslinie nach rechts, so dass der Sensor weniger Licht empfängt. Wir wissen aus dem Datenblatt des CNY70, dass die Verschiebung x in etwa proportional zum Sensorstrom ist [7]. Der Sensor liefert uns also die Information, in welche Richtung die Kurve verläuft und wie scharf sie ist. Wir legen fest, dass es sich bei $x > 0$ um eine Linkskurve, und bei $x < 0$ um eine Rechtskurve handelt. Ist $x = 0$, geht es geradeaus.

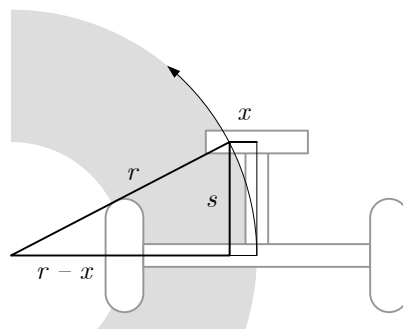


Abbildung 23: Verschiebung der Trennungslinie unter dem Sensor

Bisher haben wir den Wenderadius r zur Beschreibung der Kurve verwendet. Das können wir auch hier tun. Der Radius steht dabei in direkter Beziehung zur Verschiebung x . Die Fälle für links, rechts und geradeaus sind in Tabelle 5 zusammengefasst und sollen als Orientierung für weitere Betrachtung dienen.

Fahrtrichtung	Kurvenradius r	Verschiebung x
geradeaus	∞	0
links	> 0	> 0
rechts	< 0	< 0

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen Kurvenradius und Verschiebung

Versuchen wir nun, den Zusammenhang zwischen dem Radius r und der Verschiebung x mit einer Formel zu beschreiben. Abbildung 23 zeigt ein rechtwinkliges Dreieck mit den

Seitenlängen r , s und $r - x$. Wenden wir den Pythagoras an, erhalten wir

$$\begin{aligned} r^2 &= s^2 + (r - x)^2 \\ &= s^2 + r^2 - 2rx + x^2 \\ 2rx &= s^2 + x^2 \\ r &= \frac{s^2 + x^2}{2x} \end{aligned}$$

Wir haben jetzt den Wenderadius mit Hilfe der Verschiebung ausgedrückt. Wie wir gleich sehen werden, ist die Verschiebung aber viel kleiner als der Abstand des Sensors von der Radachse. Deshalb können wir die Gleichung vereinfachen, ohne einen großen Fehler zu begehen.

$$r = \frac{s^2 + x^2}{2x} \quad (6)$$

$$r \approx \frac{s^2}{2x} \quad \text{für } x \ll s \quad (7)$$

Wenn wir jetzt für den Abstand des Sensors von der Radachse 2,5 cm und für den Bahnradius 10 cm einsetzen, erhalten wir

$$\begin{aligned} x &\approx \frac{s^2}{2r} = \frac{(2,5 \text{ cm})^2}{2 \cdot 10 \text{ cm}} \\ &= 0,3125 \text{ cm} = 3,125 \text{ mm} \end{aligned}$$

Die Verschiebung x ist tatsächlich viel kleiner als s . Die Näherung reicht also völlig aus. Nach Gleichung (7) ist der Wenderadius umgekehrt proportional zur Verschiebung der Trennungslinie unter dem Sensor. Das passt auch zu den Fällen in Tabelle 5.

Wenn das Modell jetzt einen bestimmten Radius r fahren soll, müssen die Drehzahlen für diesen Radius eingestellt werden. Dafür haben wir die Gleichung (5) auf Seite 23 hergeleitet. Gleichzeitig ergibt sich jedoch auch eine entsprechende Verschiebung x , wie Gleichung (7) zeigt. Ersetzen wir nun den Radius r durch beide Gleichungen, erhalten wir

$$\begin{aligned} r &= \frac{s^2}{2x} = r_A \cdot \frac{n_v}{n_{lenk}} \\ n_{lenk} &= x \cdot \frac{2r_A n_v}{s^2} \\ n_{lenk} &\sim x \end{aligned}$$

Die Differenz der Drehzahlen ist also direkt proportional zur Verschiebung x . Das bedeutet, dass wir mit der durch den Sensor gemessenen Verschiebung die Differenz der Drehzahlen linear einstellen müssen.

8.4 Ergebnis

Fassen wir unsere Berechnungen noch einmal zusammen. Wir konnten mit Hilfe der beiden Motordrehzahlen die Geschwindigkeit des Modells berechnen. Sie ist proportional zum arithmetischen Mittel der beiden Motordrehzahlen $n_v = (n_r + n_l)/2$, wobei n_r die Drehzahl des rechten und n_l die Drehzahl des linken Motors ist. Wenn der Reibriemen auf der Oberfläche des Rades verläuft, hängt die Geschwindigkeit des Modells nur vom Durchmesser der Moterwelle und nicht von der Größe des Rades ab.

$$v = \pi d_M n_v = \pi d_M \cdot \frac{n_r + n_l}{2} \quad (8)$$

Der Kurvenradius r , den das Modell fährt, ist im Wesentlichen von der Differenz der Motordrehzahlen $n_{lenk} = (n_r - n_l)/2$ abhängig. Bei einer großen Differenz ergibt sich eine enge Kurve. Des Weiteren ist der Kurvenradius proportional zum **halben** Radabstand r_A . Bei einem kleinen Radabstand kann das Modell engere Kurven fahren.

$$r = r_A \cdot \frac{n_v}{n_{lenk}} = r_A \cdot \frac{(n_r + n_l)}{(n_r - n_l)} \quad (9)$$

Zudem haben wir herausgefunden, dass wir mit der vom Sensor gemessenen Lichtmenge die Differenz der beiden Motordrehzahlen regeln müssen, um das Modell exakt auf der Bahn zu halten. Befindet sich der Sensor genau über der schwarz-weißen Trennungslinie, müssen beide Motoren mit gleicher Drehzahl laufen. Empfängt der Sensor mehr Licht, handelt es sich um eine Linkskurve. Die Drehzahl des linken Motors muss verringert und die des rechten um den gleichen Betrag vergrößert werden. Empfängt der Sensor weniger Licht als in der Mittenstellung, muss die Drehzahl des linken Motors erhöht und gleichzeitig die Drehzahl des rechten verringert werden.

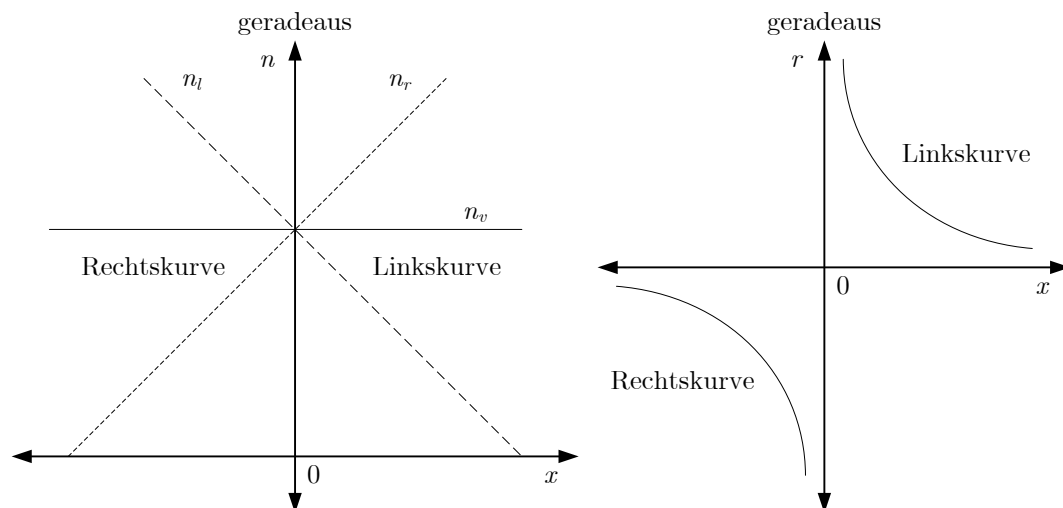


Abbildung 24: Drehzahl der Motoren und Wenderadius bei differentieller Ansteuerung

Die Diagramme in Abbildung 24 zeigen das Prinzip der differentiellen Ansteuerung noch einmal. Dabei ist x die Verschiebung der schwarz-weißen Trennungslinie bezogen

- [3] PFÜLLER, H.: *Einfaches Spurtmobil mit zwei Transistoren*.
<http://spurt.uni-rostock.de/>.
- [4] SEIFART, M.: *Analoge Schaltungen*. Verlag Technik Berlin, 5. Aufl., 1996.
- [5] STMICROELECTRONICS: *TDA2822M Dual Low-Voltage Power Amplifier*, September 2003.
- [6] STMICROELECTRONICS: *TDA7231A 1.6W Audio Amplifier*, September 2003.
- [7] VISHAY: *CNY70 Reflective Optical Sensor with Transistor Output*, April 2000.
- [8] VISHAY: *Application of Optical Reflex Sensors TCRT1000, TCRT5000, CNY70*, February 2002.
- [9] WIKIPEDIA: *Operationsverstärker*. <http://de.wikipedia.org/>.