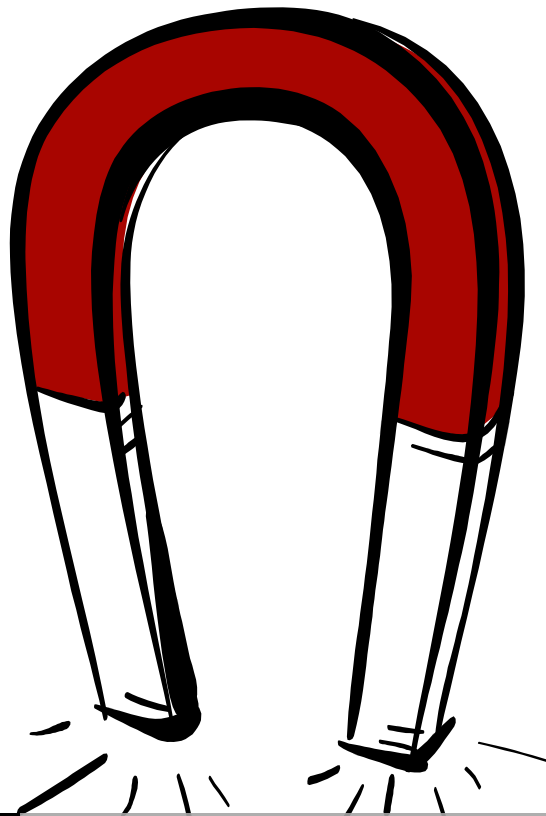


2011/2012



KANTONSSCHULE
SARGANS

SCHWEBENDE KÖRPER IM GEREGLTEN
MAGNETFELD



Simon Hobi | Lehrperson: Christoph Pfammatter

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	2
2. Einführung	2
2.1 Magnetismus.....	2
2.2 Sensortechnik.....	3
2.3 Regelungstechnik	3
2.3.1 Regelung Allgemein	3
2.3.2 Der P-Regler	4
2.3.3 Der PD-Regler	5
3. Beschreibung der Anlage.....	6
3.1 Die Kugel	6
3.2 Der Magnet	6
3.3 Der Sensor.....	7
3.4 Die Schaltung	7
3.4.1 Der Eingang	7
3.4.2 Die Regelung	8
3.4.3 Der Ausgang	8
3.4.4 Die Bauelemente	10
4. Aufbau der Anlage	10
4.1 Gerüst	10
4.2 Schaltung	12
5. Verfahren und Feineinstellungen	13
5.1 Grundgerüst.....	13
5.2 Regelung und Verkabelung.....	13
6. Funktionsfähigkeit.....	13
7. Schlusswort und Fazit.....	14
8. Quellen	15
8.1 Quellen	15
8.2 Bildernachweis.....	15

1. Einleitung

Ich war immer schon Interessiert an technischen Dingen und hab schon als kleines Kind zum Beispiel alte Radios auseinandergenommen. Und dieses kindliche Neugierde habe ich bis heute behalten. Auch Magnete haben mich schon seit sehr langer Zeit fasziniert. Da habe ich die Chance beim Schopf gepackt und beschlossen eine Maturaarbeit über einen schwebenden Körper im Magnetfeld zu machen.

Anfangs gab es zwei Varianten dies zu tun. In Variante A kann man unten einen Magneten aufstellen und einen Kreisel darüber in der Luft drehen, ein sogenanntes Levitron. Oder Variante B: Eine Kugel unter dem Magneten schweben lassen. Da bei Variante B noch ein wenig mehr Technik ins Spiel kommt, habe ich mich für diese entschieden. Angesichts der Tatsache, dass ich Elektrotechnik studieren will, ist diese Arbeit bestens geeignet, da sie mir einen kleinen Einblick in die Elektronik bietet.

Die praktische Arbeit soll deshalb zum Ziel führen, eine Blechkugel in einem geregelten Magnetfeld schweben zu lassen. Da auch schon Maturaarbeiten über dieses Thema geschrieben wurden, wusste ich auch, dass diese Arbeit zum Erfolg führen kann. Nichts desto trotz, musste ich mich in ein, für mich völlig neues Thema, einarbeiten.

2. Einführung

2.1 Magnetismus

Magnetismus ist ein Phänomen, das die Kräftewirkung zwischen Magneten, magnetisierbaren Materialien und bewegter elektrischer Ladung angibt.

Ein Magnet hat immer einen Plus- und einen Minuspol. Es gibt daher auch keine Monopole. Die Anziehungskraft ist abhängig von der Distanz zum Magneten. Die entsprechenden Kräfte werden in Feldern dargestellt (vergleiche Abbildung 1).

Im Volksmund wird meistens nur der Dauermagnet als Magnet bezeichnet. Magnetische Kraft kann jedoch auch anders entstehen. Zum Beispiel Elektromagnete, auf die ich mich jetzt konzentriere, da meine Arbeit mit einem solchen aufgebaut ist. Fließt durch ein Draht Strom (bewegte Elektronen), so erzeugt dies ein magnetisches

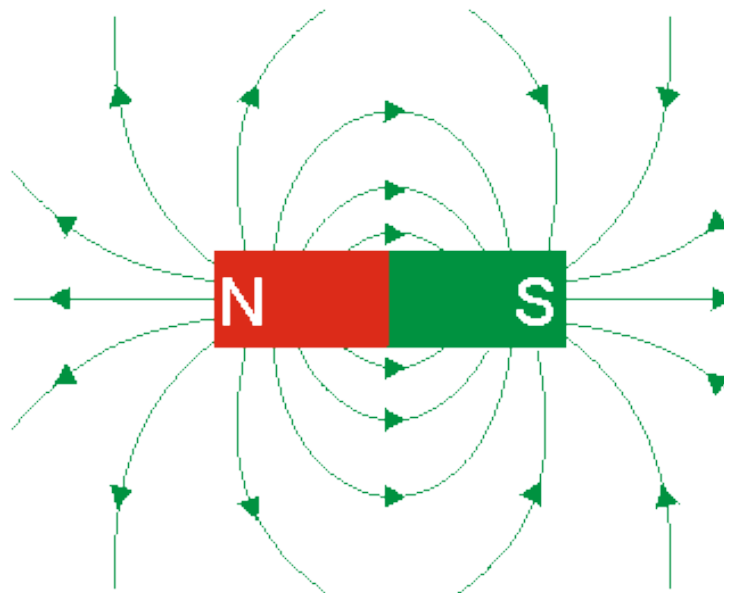


Abbildung 1 (Feld eines einfachen Stabmagneten)

Feld [B] um den Draht. Dieses Feld kann mit Hilfe einer höheren Windungszahl [n] proportional verstärkt werden. Ausserdem ist die Stärke des Elektromagneten vom Strom [i], der durch den Draht fliesst, abhängig. Der Strom wird dabei in Ampère angegeben. Die Feldstärke nimmt jedoch mit zunehmender Länge [l] des Magneten proportional ab. Ausserdem muss noch die magnetische Feldkonstante [μ_0] multipliziert werden. Es ist $\mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$. Daraus ergibt sich die Formel für die Flussdichte eines Magneten. Diese gibt an, wie stark ein Magnetfeld ist.

$$B = \mu_0 \cdot i \cdot \frac{n}{l}$$

Zusätzlich kann das Feld noch mit einem sogenannten Kern verstärkt werden. Jeder mögliche Kern hat dabei eine eigene Konstante [μ_1]. Sie heisst Permeabilitätszahl des Materials und ist von Stoff zu Stoff unterschiedlich. Für das Vakuum ist diese zum Beispiel 1 und bei Eisen liegt sie zwischen 300 und 10'000, je nach Beschaffenheit. [1]

Die entsprechende Formel dazu lautet:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_1 \cdot i \cdot \frac{n}{l}$$

2.2 Sensortechnik

Sensortechnik beschreibt die Anwendung von Sensoren für Technische Geräte, meist für Regler. Ein Sensor überprüft eine Gegebenheit und sendet entsprechende Signale aus, die vom angeschlossenen Gerät verwendet werden können. Auch die menschlichen Sinne sind im Prinzip Sensoren, welche die Signale zum Gehirn senden, welches diese dann auswertet. Da Sensoren ein sehr breites Anwendungsgebiet anspricht kann man annehmen, dass es sehr viele verschiedene Sensoren auf dem Markt gibt. Von Akustik- bis hin zu Temperatursensoren ist alles dabei. [3]

2.3 Regelungstechnik

2.3.1 Regelung Allgemein

Regelungen kommen nicht nur in der Technik, sondern auch in der Natur des Menschen sehr häufig vor. Schon der aufrechte Gang zum Beispiel ist eine Regelung von Lagesensor und anschliessender Steuerung beziehungsweise Regelung des Gehirns. Das Grundprinzip des Reglers ist einfach und mit folgendem Schema selbsterklärend:

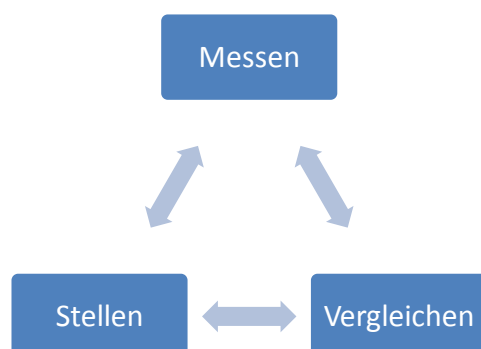


Abbildung 2 (Vereinfachte Funktionsweise von Reglern)

Der Regler hat die Aufgabe, den Soll-Wert mit dem Ist-Wert zu vergleichen, und den Ist-Wert so zu verändern, dass die Differenz von Ist- und Soll-Wert gleich Null ist. Diese Funktionsweise bleibt eigentlich bei allen Reglern erhalten und sieht graphisch wie folgt aus:

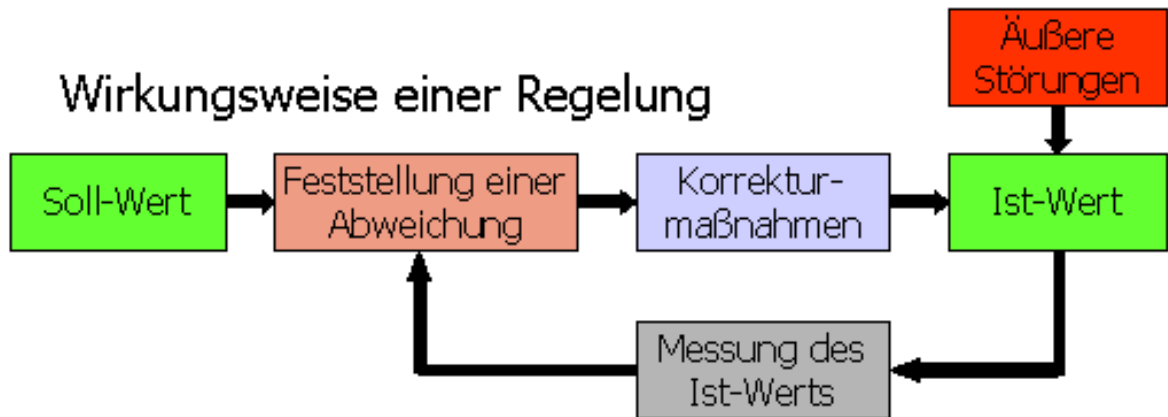


Abbildung 3 (Genauere Wirkungsweise einer Regelung)

Durch die enorm vielen Anwendungen der Regler ist auch die Anzahl der verschiedenen Regler enorm. Hier werden nun eine vereinfachte Version, dessen ich verwende (P-Regler) und selbstverständlich der, den ich verwende (PD-Regler), kurz erklärt:

2.3.2 Der P-Regler

Der proportionale Regler verstärkt einfach nur die Differenz des Ist- und Soll-Wert mit dem Faktor K_p . Dieser wird wie folgt berechnet: $K_p = \frac{R_2}{R_1}$

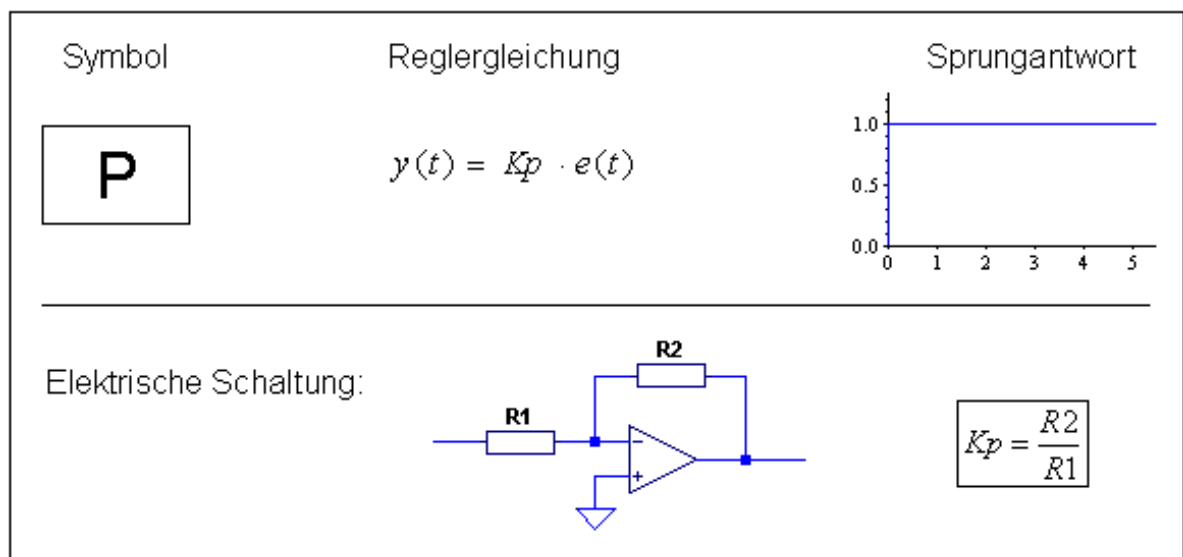


Abbildung 4

In diesem Beispiel (Abbildung 4) ist der Soll-Wert gleich Null, also wird hier die gesamte Eingangsspannung mit dem Faktor K_p verstärkt. Dieser P-Regler funktioniert somit wie ein einfacher Verstärker. Wenn aber ein Soll-Wert im plus-Eingang eingegeben wird, so wird, wie oben beschrieben, nur die Differenz von Ist- und Soll-Wert verstärkt.

Im Beispiel wird die Eingangsspannung mit $e(t)$ bezeichnet beziehungsweise die Ausgangsspannung mit $y(t)$. Somit kommt man auf die Formel für die Ausgangsspannung:

$$y(t) = K_p \cdot e(t)$$

$$U_{Ausgang} = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{Eingang}$$

2.3.3 Der PD-Regler

Der Proportional-Differenzial Regler erweitert den in Punkt 2.3.2 beschriebenen P-Regler mit einem D-Anteil. Der D-Anteil schaut bei der Regelung die Änderungsgeschwindigkeit an. Diese Änderungsgeschwindigkeit wird dem normalen proportionalen Anteil hinzuaddiert. Er kann somit eigentlich vorausschauen und frühzeitig regeln.

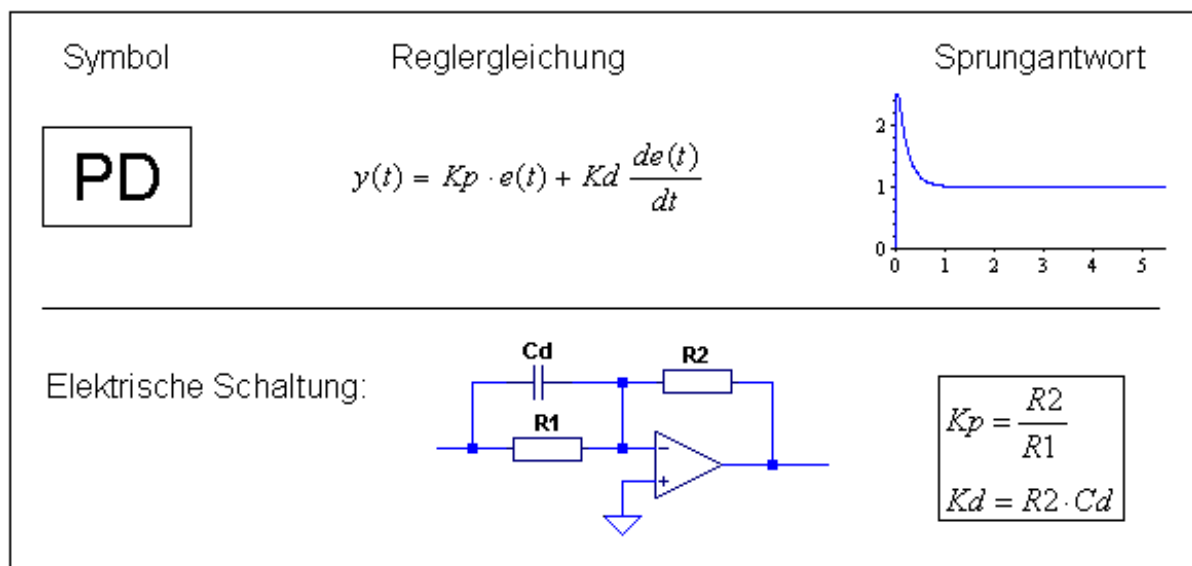


Abbildung 5

Auch in diesem Beispiel ist der Soll-Wert gleich Null, also wird auch hier die gesamte Eingangsspannung $e(t)$ verstärkt. Bei dem PD-Regler wird aber nicht nur mit K_p multipliziert, sondern es wird noch ein weiterer Teil hinzuaddiert, der den wesentlichen Unterschied zum einfachen proportionalen Regler ausmacht. Dieser Teil ist zum einen $K_d = R_2 \cdot C_d$ und dieses K_d wird noch mit der Ableitung der Eingangsspannung, also der Änderung der Spannung pro Zeit, multipliziert. C_d ist dabei die elektrische Kapazität des Kondensators, diese wird in Farad [F] angegeben. Dies bewirkt eine stärkere Regelung, wenn sich der Eingangswert schnell ändert- und eine Schwächere, wenn er sich langsam ändert. Man rechnet dabei: [3]

$$y(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

$$U_{Ausgang} = \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{Eingang} + R_2 \cdot C_d \cdot \frac{d U_{Eingang}}{dt}$$

3. Beschreibung der Anlage

3.1 Die Kugel

Als Kugel wollte ich zuerst einen Pingpongball so bearbeiten, dass er magnetisiert werden kann und somit vom Magneten in der Luft gehalten wird. Dafür habe ich im Innern der Kugel einen kleinen Stabmagneten eingebaut. Dieser sollte den Abstand zwischen Magnet und Kugel deutlich vergrössern. Der Abstand konnte von 1 cm bis etwa 3 cm vergrössert werden. Da der Pingpongball aber schlussendlich zu lichtdurchlässig war, habe ich mich kurzfristig für eine andere Kugel entschieden.



Abbildung 6 (Kugel)

Ich habe dann von einem, aus Blech bestehenden kugelförmigen Bleistiftspitzer, den Spitzmechanismus entfernt und habe so eine 4cm grosse Blechkugel mit Erdmotiv erhalten.

Das Umstellen der Anlage auf die neue Kugel war dann einfacher als ich dachte. Ich musste nur den Sensor einige Zentimeter höher stellen und es funktionierte beinahe ohne Probleme. Da dies so gut klappte habe ich auch die 2 cm weniger Abstand zum Magneten in Kauf genommen.

3.2 Der Magnet

Der Magnet besteht aus einer 9 cm langen und 1 cm breiten Schraube, die mit 50 Meter 0.2 mm starkem Kupferdraht umwickelt worden ist. Der Magnet hat in diesem Fall ca. 500 Umwicklungen. Um viel Zeit zu sparen habe ich die Schraube in eine Bohrmaschine eingespannt um so den Draht mit einer enormen Geschwindigkeit aufzuwickeln.

Wenn man die beiden Enden des Kupferdrahtes an einer Stromquelle anschliesst entsteht ein Magnetfeld in Längsrichtung. Das Magnetfeld wird durch das Eisen der Schraube verstärkt. Wie im Theorieteil über den Magneten 2.1 beschrieben, ist die Magnetfeldstärke auch empirisch proportional zur Stromstärke.



Abbildung 7 (Magnet)

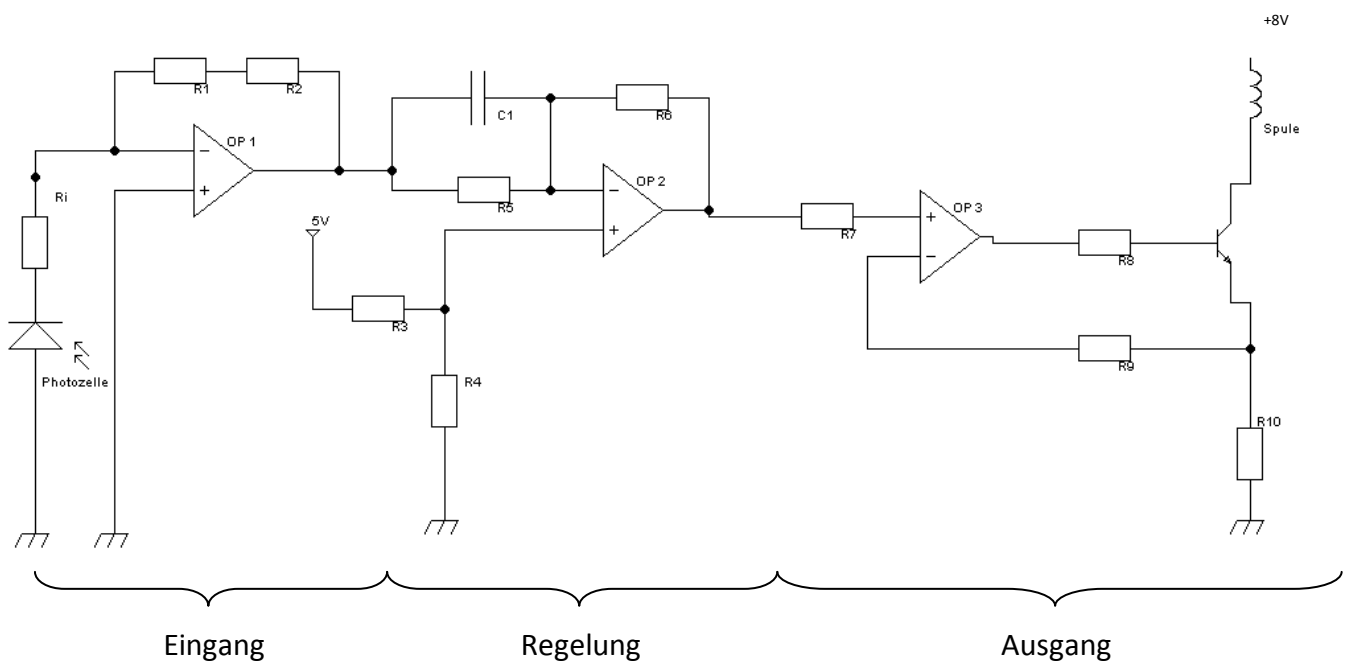
3.3 Der Sensor

Mein Sensor besteht aus einer Lampe und einer Photozelle. Die Lampe wird direkt von 5 V gespeist und leuchtet auf den Sensor, wobei die Kugel die Hälfte der Photozelle mit ihrem Schatten verdeckt. Fällt die Kugel wird die Photozelle von mehr Licht gespeist und sendet eine dementsprechend höhere Spannung. Das gilt natürlich auch umgekehrt wenn die Kugel steigt.

Da die Kugel während der Regelung minimale Schwankungen aufweist, ändert sich Die Ausgabespannung der Photozelle ständig. Sie gibt also eine wellenförmige Spannung aus.

3.4 Die Schaltung

Abbildung 8:



3.4.1 Der Eingang

Als Eingang kommt in diesen Regler ein Signal von der Photozelle, das noch zusätzlich verstärkt wurde, weil es sonst zu schwach wäre (maximal etwa 0.3 V). Wenn die Kugel zu hoch ist, das heisst die Photozelle mit wenig Licht gespeist wird, kommt ein kleines Signal und natürlich auch umgekehrt. Der OpAmp 1 (OP 1) wird von -5 V gespiesst und verstärkt das Signal mit $\frac{R_1+R_2}{R_i}$. Dies ergibt eine Spannung, die sich zwischen 0.25 V und 4 V befindet. Daraus kann jetzt der Eigenwiderstand der Photozelle $[R_i]$ ausgerechnet werden: [4]

$$U_{Ausgang} = \frac{R_1 + R_2}{R_i} \cdot U_{Eingang}$$

$$R_i = \frac{(R_1 + R_2) \cdot U_{Eingang}}{U_{Ausgang}}$$

$$R_i = \frac{(10 \text{ k}\Omega + 47 \text{ k}\Omega) \cdot 0.3 \text{ V}}{5 \text{ V}}$$

$$R_i = 3.42 \text{ k}\Omega$$

Dies bewirkt eine Verstärkung von $\frac{R_1+R_2}{R_i}$, also 16.67.

Ausserdem invertiert er den Eingang der Photozelle, das heisst er kehrt die Ladung um, so dass die Ladung jetzt nicht nur negativ, sondern auch höher ist, wenn die Kugel oben ist und umgekehrt. Das ist jedoch so gewollt, denn der OpAmp 2 (OP 2) beim Regler dreht es wieder in die andere Richtung sodass es wieder stimmt.

3.4.2 Die Regelung

Als Regler habe ich einen simplen PD-Regler verwendet. Seine Funktionsweise ist ähnlich wie beim allgemeinen PD-Regler, beschrieben im Abschnitt 2.3.2. Der grosse Unterschied aber ist, dass ich bei diesem Regler noch einen Soll-Wert eingegeben habe. Dieser wird vom Verhältnis der beiden Widerständen R3 und R4 bestimmt. Die Spannung, die dann auf das Plus vom OpAmp geht ist etwa 3.7 V, und das ist der Soll-Wert. Da vom Eingang eine etwa gleichgrosse Spannung hineinkommt, kann also gut mit diesem Wert gearbeitet werden. Der OpAmp bildet somit die Differenz aus dem Soll-Wert und dem Eingang und versucht diese zu minimieren. Dabei wird die Differenz PD-verstärkt weitergegeben. Der Kondensator, der noch durch die Änderungsgeschwindigkeit der Kugel beeinflusst wird, verringert die Schwingung stark. Ohne ihn würde die Kugel sofort ins Schwingen geraten und hinunterfallen.

3.4.3 Der Ausgang

Beim Ausgang kommt das vom Regler verstärkte Signal hinein und geht zuerst durch R_7 , und dann in den plus-Eingang vom OpAmp 3 (OP 3). Die zwei Widerstände R_7 , R_8 sind nur eingesetzt um zu grosse Ströme zu verhindern, also einen Kurzschluss. Der OP 3 ist nichtinvertierend geschaltet. Danach kommt die Spannung auf den Transistor. Dieser funktioniert wie ein Wasserhahn, wobei man bei einer höheren Spannung den Hahn auf- und bei kleinerer Spannung wieder zudreht. Er lässt aber nicht Wasser sondern Strom durch sich und vor allem durch die Spule, die direkt an 8 V angeschlossen ist. Von diesen 8 V nimmt auch der Transistor seine Leistung. Da der Transistor viel Arbeit leistet wird er schnell heiss und ist deshalb auf einer Kühlvorrichtung angebracht (vergleiche Abbildung 11, S.12). Auch der Widerstand R_{10} und die Spule werden sehr heiss, da durch sie ein sehr grosser Strom fliesst. [5]

Und so funktioniert es: Der OP 3 versucht wieder die Differenz der beiden Eingangsspannungen auf null zu bringen. Dabei wird die Spannung über R_{10} so stark erhöht, dass eben die Differenz minimiert wird. Da die Spule direkt mit dem R_{10} zusammenhängt wird auch die Spannung darüber vergrößert. Wichtig bei der Spule ist aber eigentlich nur die Stromstärke. Diese kann man aber relativ leicht berechnen:

$$I_{Spule} = \frac{U}{R_{10}}$$

$$I_{Spule} = \frac{3.7 V}{2.2 \Omega}$$

$$I_{Spule} = 1.6 A$$

Wenn man den Spannungsverlauf vor der Spule jetzt ansieht (Abbildung 9) kann man schön sehen, wie die Kugel zu hoch ist und der Magnet ausschaltet, also die Spannung sehr schnell auf null geht. Die Kugel wird aber schnell wieder aufgefangen durch die stark steigende Spannung. Das Ganze wiederholt sich im ca. 3 ms Takt über die ganze Zeit, in der die Kugel schwebt.

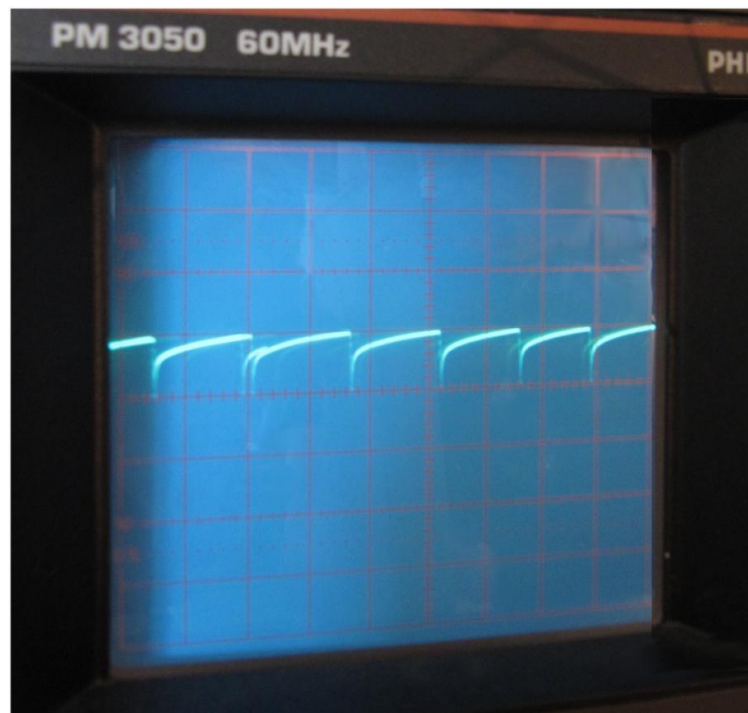


Abbildung 9 (Spannung über Magnet)

3.4.4 Die Bauelemente

R1 = 10k Ω R2 = 47k Ω R3 = 2.2k Ω R4 = 2.7k Ω R5 = 220k Ω R6 = 220k Ω

R7 = 1k Ω R8 = 100 Ω R9 = 1k Ω R10 = 2.2 Ω

C1 = 820pF

OP 1, OP 2 und OP 3: LM324AN / NOPB

Transistor: MJ 3001, Darlington-Transistor

Lampe: 6.5V, 3A

Photozelle: 1.6cm \times 3cm

4. Aufbau der Anlage

4.1 Gerüst

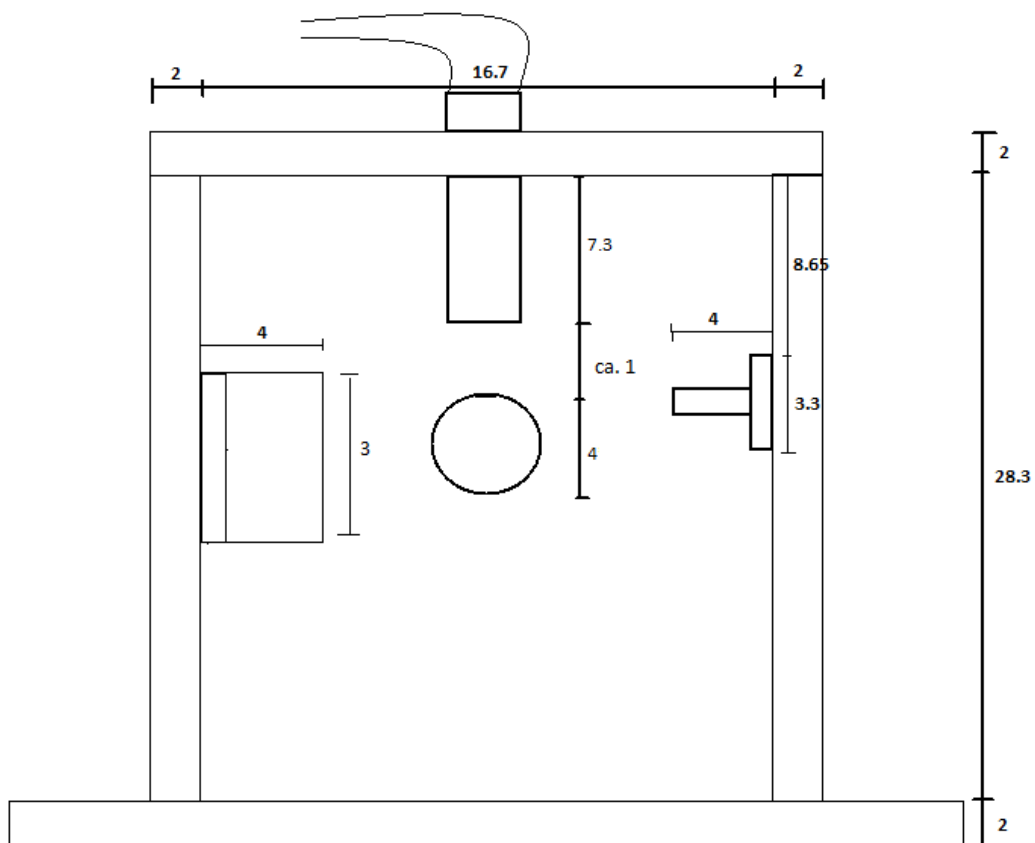


Abbildung 10 (Genauer Plan des Gerüsts)

Das gesamte Grundgerüst habe ich aus Holz gefertigt. Das Gerüst misst ca. 32 cm x 20 cm x 10 cm. Eine etwa doppelt so breite Bodenplatte sorgt für eine bessere Stabilität. Die einzelnen Holzstücke habe ich mit Schrauben stabil zusammengeschraubt. Auf Abbildung 10 ist der genaue Plan der Anlage aufgezeichnet. Wie sich das Ganze nach der Fertigstellung präsentiert, ist auf Abbildung 11 aufgezeigt. Wie man sehen kann habe ich die Solarzelle mit schwarzem Papier umfasst, um sie vor störendem Fremdlicht zu schützen.

Die Lampe und die Photozelle habe ich nur variabel befestigt, da ich auch bei kleinen Veränderungen flexibel bleiben kann und diese allenfalls nach oben oder unten schieben kann

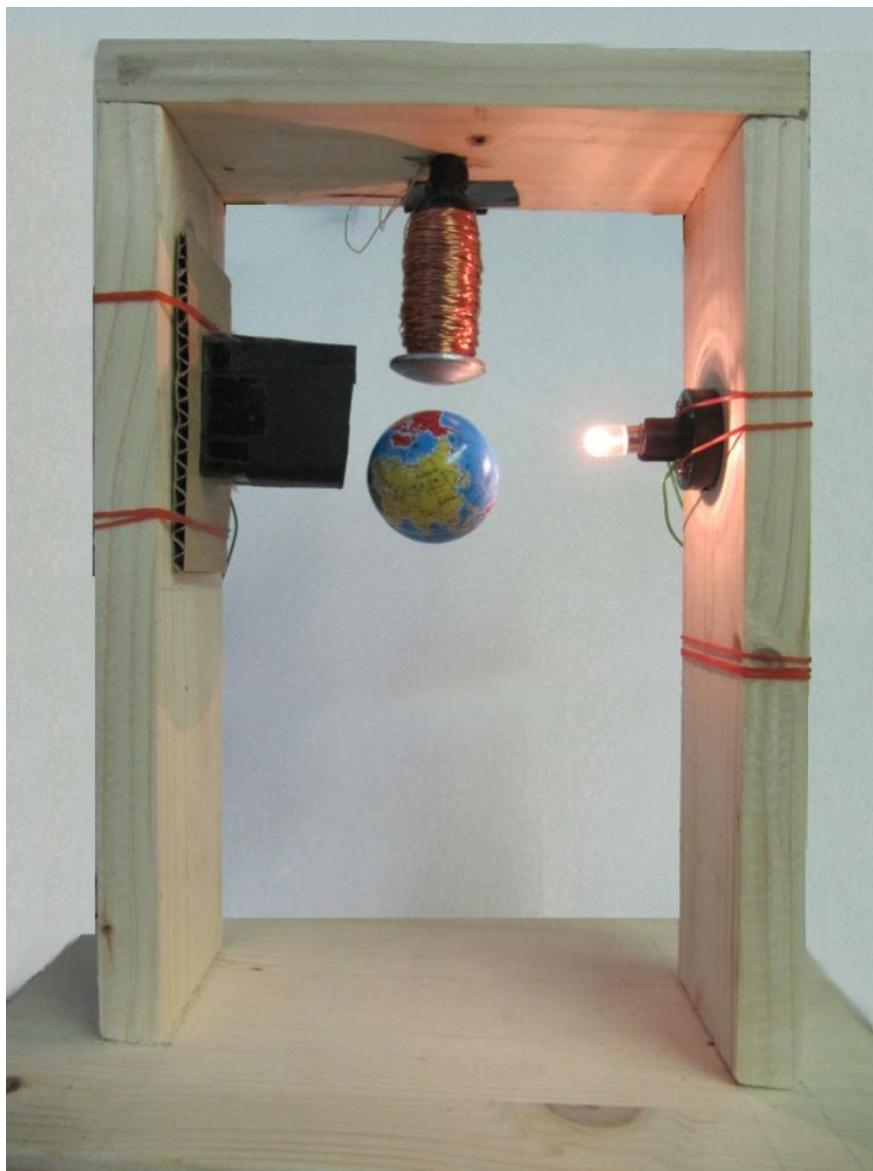


Abbildung 11 (Fertige Anlage)

4.2 Schaltung

Für die Schaltung habe ich ein Wishboard WB-104 von der Firma Wisner Enterprise benutzt. Dieses Brett hat drei Eingänge (A und B) von welchem ein Eingang mit 5 V (A) gespeist wird und einer als Erdung dient (B).

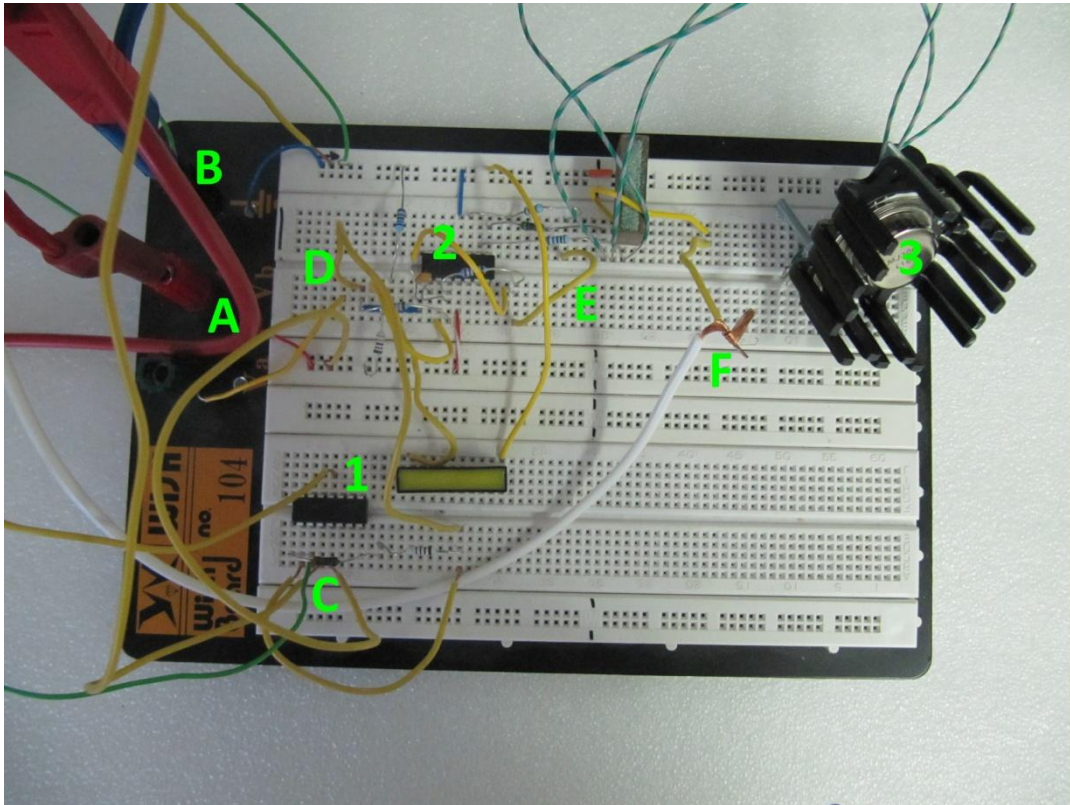


Abbildung 12 (Schaltung)

Das Brett funktioniert eigentlich ganz einfach. Es sind nämlich immer alle Steckplätze einer Reihe miteinander verbunden. Da die Schaltung aber recht gross ist sieht das Ganze etwas kompliziert aus. Ich versuche aber einen kleinen Einblick zu geben:

- A: Eingang 5 V
- B: Erdung
- C: Eingang der Photozelle (grünes Kabel)
- D: Eingang in Regler, nach Verstärkung
- E: Ausgang vom Regler
- F: Eingang zum Magneten
- 1: OP 1
- 2: OP2 und OP 3
- 3: Transistor

5. Verfahren und Feineinstellungen

Mit meiner praktischen Arbeit bin ich Schritt für Schritt vorgegangen. Erst habe ich das Gerüst gebaut, dann die Schaltung gesteckt. Wobei letzteres eindeutig mehr Zeitaufwand benötigte, da sehr viel berücksichtigt werden musste.

5.1 Grundgerüst

Zuerst musste ich alle Materialien sorgfältig auflisten und schliesslich aufreiben. Ich startete zuerst mit dem Magneten und der Kugel, um den Abstand ungefähr bestimmen zu können. Somit war ich in der Lage, einen genauen Plan für das Grundgerüst herzustellen. Wegen noch fälligen Feineinstellungen wollte ich vorerst alles nur variabel befestigen. Ich habe dies schlussendlich auch so belassen, um Fehler zu vermeiden.

5.2 Regelung und Verkabelung

Auch hier bin ich Schritt für Schritt vorgegangen. Ich baute zuerst Teil für Teil die Schaltung auf. Ständig testete ich das Verhalten innerhalb der Schaltung mit einem angeschlossenen Simulator, der eine Sinusspannung aussendete. Somit konnte ich stets kontrollieren, ob alles funktioniert und wie sich die Spannung im Verlauf der Regelung verhält.

Später als ich den Simulator mit der echten Photozelle austauschte, war nicht alles wie erwartet. Es gab viele Fehler. Unter anderem Signalschwäche vor, und Vorzeichenfehler nach der Regelung. Diese habe ich dann gleich beide mit einer einzigen Lösung behoben. Ich habe dann nämlich das Eingangssignal verstärkt und invertiert, wie in 3.4.1 beschrieben. Noch einmal musste ich Punkt für Punkt jeden kleinen Zwischenschritt der Regelung überarbeiten und verbessern. Eine sehr mühsame und zeitaufwändige Arbeit. Zuerst musste man suchen, wo die Fehler lagen. Dann war man gefordert, eine Lösung für das Problem zu finden. Natürlich gab es auch Fehler, wie nicht eingesteckte Kabel, die nicht nur Zeit gekostet haben, sondern auch an den Nerven zerrten. Nach dem Einbauen tauchten meistens auch wieder Probleme auf, da beim Regler alles zusammenhängt und bei kleinen Veränderungen die Regelung nicht mehr richtig funktioniert. Doch mit vielen weiteren Feineinstellungen kam dann schliesslich alles ins Lot.

6. Funktionsfähigkeit

Nach wochenlangem Zusammenbauen und unzähligen behobenen Fehlern hat es endlich geklappt. Die Kugel schwebt stabiler als gedacht für einige Zeit in der Luft. Bei ihren ersten Schwebversuchen war die Kugel in einer sehr instabilen Position, fing nach etwa 10 Sekunden an zu schwingen und fiel anschliessend schnell hinunter. Nachdem ich den 420 pF starken Kondensator, mit dem im Schaltplan eingezeichneten 820 pF starken Kondensator, ersetzt habe, hielt die Kugel schon um einiges länger. Schliesslich senkte ich noch die Spannung über der Spule, um die Stärke der Schwingung noch ein wenig zu schwächen. Nach diesen Endmassnahmen lässt sich die Kugel jetzt ohne äussere Einflüsse fast beliebig lang in der Luft halten (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13 (Schwebende Kugel)

Nicht wie angenommen schwebt die Kugel relativ stabil in der Luft. Ich habe gedacht, dass es viel mehr auf die äusseren Lichtwerte ankommt. Aber die Kugel schwebt sowohl bei Tageslicht, als auch bei Dunkelheit. Nur bei grossen Veränderungen fällt sie hinunter, wie zum Beispiel beim Einschalten des Lichtes. Wird sie aber erneut in Position gebracht hält sie sich wieder stabil in der Luft.

7. Schlusswort und Fazit

Zusammenfassend ist zu sagen, dass es eine sehr zeitaufwändige, aber überaus lohnenswerte Erfahrung ist. Man braucht viel Geduld. Aber die Kugel schweben zu sehen, lässt die ganzen Sorgen und Zweifel des Erfolgs, vergessen. Somit ist der Beweis erbracht, eine Kugel unter einem Magnetfeld in der Schwebe zu halten.

Ohne die Hilfe, der schon geschriebenen Arbeit von Michael Spreng von der Kantonsschule Zug und der Hilfe von meinem Physiklehrer und Betreuer der Maturaarbeit, Christoph Pfammatter, hätte sich der Erfolg dieser Arbeit wohl in Frage gestellt. Denn vor allem die Schaltung war um einiges komplizierter als ich anfangs gedacht habe.

8. Quellen

8.1 Quellen

- [1] Prof. Dr. Lothar Meyer, Dr. Gerd-Dietrich Schmidt:
Physik Gymnasiale Oberstufe, 1. Auflage, Berlin: Duden-Paetec, 2003
- [2] Maturaarbeit von Michael Spreng, Kantonsschule Zug, 2003/2004:
<http://ma.kanti-zug.ch/maturaprojects/Michael%20Spreng%20-%20Schwebender%20Koerper%20im%20geregelten%20Magnetfeld.pdf>
- [3] Roboter Netz:
<http://www.rn-wissen.de/index.php/Hauptseite>
- [4] Wikipedia, Operationsverstärker:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Opamp>
- [5] Wikipedia, Transistor
<http://de.wikipedia.org/wiki/Transistor>

8.2 Bildernachweis

- Titelbild Magnet: Microsoft Word ClipArt
- Titelbild Weltkugel: http://www5.inpi.gov.br/noticias/o-desafio-mundial-dos-direitos-autorais/image/image_view_fullscreen
- Abbildung 1: http://www.leifiphysik.de/web_ph10/grundwissen/08felder/felder.htm
- Abbildung 2: Microsoft Word, SmartArt
- Abbildung 3: RN-Wissen: <http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik>, Wirkungsweise einer Regelung
- Abbildung 4: RN-Wissen: <http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik>, P-Regler
- Abbildung 5: RN-Wissen: <http://www.rn-wissen.de/index.php/Regelungstechnik>, PD-Regler
- Abbildung 6: Digitalkamera
- Abbildung 7: Digitalkamera
- Abbildung 8: Tiny CAD
- Abbildung 9: Digitalkamera
- Abbildung 10: Microsoft Paint
- Abbildung 11: Digitalkamera
- Abbildung 12: Digitalkamera
- Abbildung 13: Digitalkamera