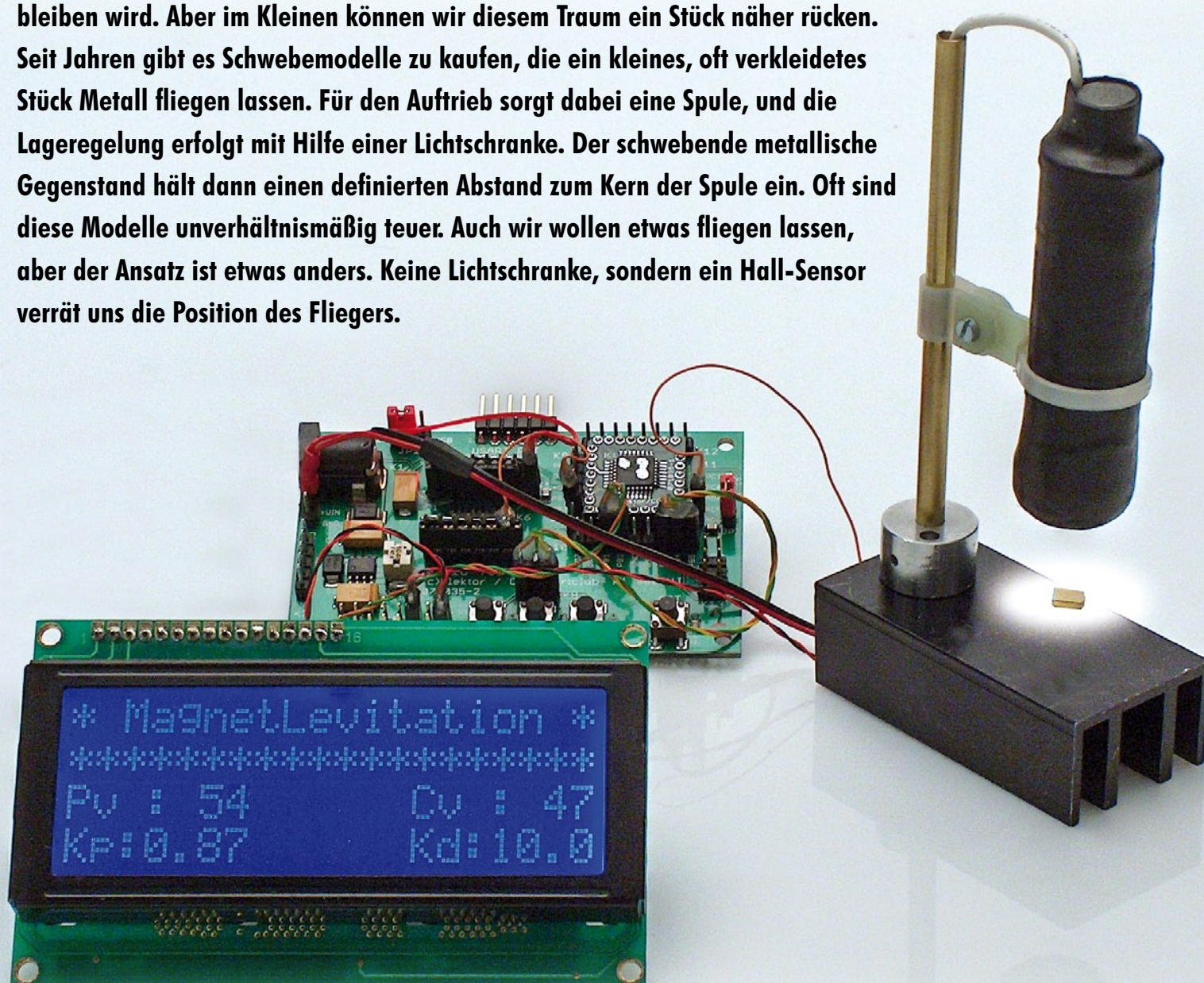


Völlig schwerelos!

Magnet-Schweberegler mit dem ATM18

Von Udo Jürß und Wolfgang Rudolph

Die Schwerkraft zu überwinden ist ein alter Traum der Menschheit – der noch lange unrealisiert bleiben wird. Aber im Kleinen können wir diesem Traum ein Stück näher rücken. Seit Jahren gibt es Schwebemodelle zu kaufen, die ein kleines, oft verkleidetes Stück Metall fliegen lassen. Für den Auftrieb sorgt dabei eine Spule, und die Lageregelung erfolgt mit Hilfe einer Lichtschranke. Der schwebende metallische Gegenstand hält dann einen definierten Abstand zum Kern der Spule ein. Oft sind diese Modelle unverhältnismäßig teuer. Auch wir wollen etwas fliegen lassen, aber der Ansatz ist etwas anders. Keine Lichtschranke, sondern ein Hall-Sensor verrät uns die Position des Fliegers.



Bei den bekannten Schwebemodellen, für die es in Elektor auch schon Bauanleitungen gab, wird der Strahl einer Lichtschranke durch den Flugkörper mehr oder weniger abgedeckt. Die Lichtmenge am Empfänger der Lichtschranke wird dann als Maß genommen, um den Strom durch die Spule zu regeln. Die Mechanik und die Elektronik sind so ausgelegt, dass der schwebende, metallische Gegenstand in der vorgegebenen Position schwebt. Ein ganz anderes Prinzip liegt der Abstandsregelung mit einem Hallsensor zugrunde.

Magnetfeldsensor

Ein Hall-Sensor ist ein Halbleiterbaustein, der eine Spannung in Abhängigkeit von der Stärke eines vorhandenen Magnetfeldes ändert. Der eigentliche Sensor gibt nur eine sehr kleine Spannung im Millivoltbereich ab, so dass man noch einen aufwendigen Brückenverstärker braucht. Für unseren Schweberegler kommt jedoch der integrierte Magnetsensor HAL815 im abgeflachten TO-92UT-Gehäuse von Mikronas zum Einsatz. Verstärker, Temperaturkompensation und Filter sind bereits auf dem Chip (Bild 1). Alle Parameter lassen sich programmieren. Die Programmierung erfolgt über digitale Signale auf der Betriebsspannung, die dazu in Impulsen von 5 V auf 8 V angehoben wird. So kann zum Beispiel der Messbereich von ± 30 mT bis ± 150 mT eingestellt werden. Die Programmierung ist hier nicht erforderlich, denn im Auslieferungszustand ist der Bereich ± 30 mT eingestellt, was für die Anwendung gerade passt. Bei einer Betriebsspannung von 5 V liegt ohne ein Magnetfeld am Ausgang eine Spannung von 2,5 V an. Je nach Richtung und Stärke eines Feldes ändert sich die Spannung um $\pm 2,5$ Volt, also von etwa 0 Volt bis ca. 5 Volt. In unserer Anwendung wird nur eine Richtung benötigt, so dass nur der Bereich 2,5 V bis 5 V ausgewertet wird.

Regler

Wenn wir uns mit einem Magneten dem Hall-Sensor nähern, so dass die magnetischen Feldlinien senkrecht zur Sensorfläche stehen, ändert sich die Ausgangsspannung des Sensors proportional zur magnetischen Feldstärke. Damit ist es möglich, den Abstand eines Magneten mit bekannter Feldstärke zum Sensor zu bestimmen. Mit dieser Information kann ein Regler

Das ATM18-Projekt im Computer:club2

ATM18 ist ein gemeinsames Projekt von Elektor und dem Computer:club2 (www.cczwei.de) in Zusammenarbeit mit Udo Jürß, dem Chefentwickler von www.microdrones.de. Die neuesten Entwicklungen und Anwendungen des ATM18-Systems stellt Wolfgang Rudolph vom Computer:club2 jeden Monat in der Sendung CC2-tv bei NRW-TV vor. Der hier beschriebene Schweberegler mit dem ATM18-AVR-Board ist in der Sendung 12 von CC2-tv zu sehen, die am 26. Juni erstmals gesendet wird.

CC2-tv wird von NRW-TV als Kabelprogramm in NRW und als Livestream im Internet gesendet (www.nrw.tv/home/cc2). Als Podcast gibt es CC2-tv bei www.cczwei.de und – ein paar Tage später – auch bei sevenload.de.

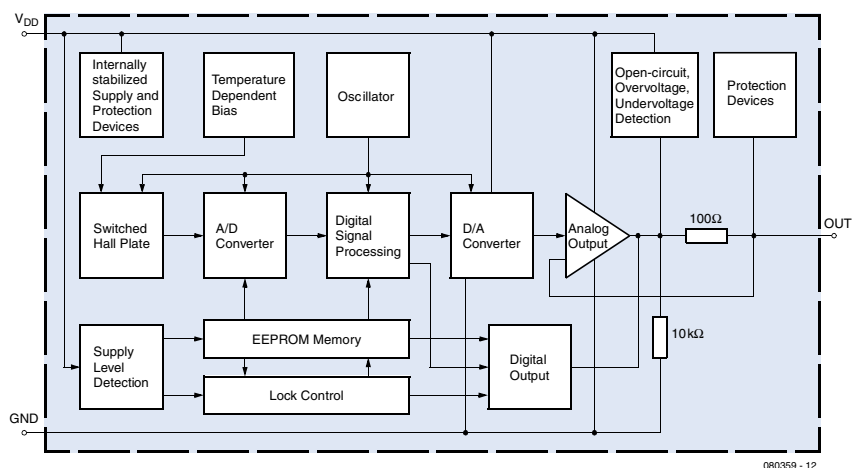


Bild 1. Blockschaltbild des Sensors.

Halleffekt

Der amerikanische Physiker Edwin Herbert Hall entdeckte bereits 1879 den später nach ihm benannten Effekt im Zuge seiner Doktorarbeit. Der Hall-Effekt beruht auf der Lorentzkraft. Bewegte Ladungen erfahren im Magnetfeld eine Ablenkung, die zu einer Spannungsdifferenz quer zum Stromweg führt.

Hall-Sensoren bestehen aus dünnen Halbleiterplättchen, damit die Geschwindigkeit der Elektronen - bedingt durch die geringe Ladungsträgerdichte - hoch ist. Damit erreicht man eine relativ hohe Ausgangsspannung. Wird dieser Sensor nun von einem Strom durchflossen und in ein Magnetfeld gebracht, so dass die Feldlinien senkrecht zur Halbleiterfläche stehen, so ändert sich die Spannung am Sensor. Das Produkt des Stroms und der magnetischen Feldstärke ist proportional zur Ausgangsspannung des Sensors. Da der Strom bekannt ist, kann die Stärke des Magnetfeldes mittels der gemessenen Spannung bestimmt werden. In der Regel sind diese Sensoren in einem Gehäuse mit einem Signalverstärker integriert. Dabei werden auch thermisch bedingte Veränderungen der Messgröße kompensiert.

den Spulenstrom so einstellen, dass der Magnet in der Schwebelage gehalten wird. Der Strom wird ca. 1000 Mal pro Sekunde angepasst. Dieses kontinuierliche Nachregeln braucht bestimmte Regeln. In der Elektronik kennt man für solche Fälle einen PID-Regler (Proportional, Integral, Differenzial, siehe Kasten). In unserem Fall brauchen wir den I-Anteil nicht und können mit einem PD-Regler arbeiten. Der wird allerdings nicht als analoge Schaltung mit Opamps aufgebaut, sondern per Soft-

ware mit einem Regelprogramm für unser ATM18-Projekt realisiert. Jede kleinste Abweichung des fliegenden Magneten von der Sollposition, jede Luftbewegung, jede Temperaturänderung, jede Erschütterung und noch viel mehr haben einen unmittelbaren Einfluss auf das Flugverhalten. Wenn der Magnet etwas näher an die Magnetspule herankommt, so muss sofort der Spulenstrom verringert werden. Entfernt sich der Magnet auch nur ein klein wenig von der Spule, dann muss



Bild 2. Die Schaltung des Versuchs.

der Strom sofort erhöht werden. Da die Spule über den ULN2003 am PWM-Ausgang (pulsbreiten-moduliertes Signal) des Prozessors hängt, wird hier das Tastverhältnis geändert. Die Integration zu einem mittleren Strom findet im System Ferritstab und Spule statt.

Bild 2 zeigt den Aufbau des Versuchs. Der Hall-Sensor liegt an ADC6. PD6 steuert als PWM-Ausgang einen oder mehrere Eingänge des Leistungstreibers ULN2003. An den offenen Kollektorausgängen liegt die Spule gegen +12 V. Wichtig ist, dass auch Pin 8 an K6 angeschlossen wird, weil damit die internen Schutzdioden im ULN2003 die induktiven Impulse der Spule begrenzen. Für die Einstellung der Regelparameter werden die Tasten S1 bis S3 angeschlossen. So lässt sich der schwebende Magnet um bis zu 10 mm anheben und absenken. Alternativ kann der Regler auch über den angeschlossenen IR-Empfänger und eine RC5-Fernbedienung gesteuert werden. Das LC-Display dient zur laufenden Anzeige der Parameter.

Randbedingungen

Einen Magneten schweben zu lassen, ist keine triviale Aufgabe. Sobald er einen kritischen Abstand zur Magnetspule unterschreitet, zieht er sich selbst zu ihr hoch, wogegen der Regler nichts mehr tun kann. Wichtig ist es also, die Spule in einer ausreichenden Höhe zu montieren. Andererseits muss das Magnetfeld der voll ein-

geschalteten Spule stark genug sein, um den Magneten aus der untersten Position anzuheben. Es ist also wichtig, die richtige Spule auf den richtigen Kern zu wickeln und einen möglichst kleinen und leichten, aber auch starken Magneten zu verwenden. Und es muss der passende Abstand eingestellt werden.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass der Abstand des Magneten nicht proportional zur Ausgangsspannung des Sensors ist. Eine nicht lineare Regelstrecke kann zu Stabilitätsproblemen führen. Dazu kommt noch, dass auch das Magnetfeld der Hebespule bis zum Sensor reicht. Die schwierigen Randbedingungen der Regelstrecke erschweren die Arbeit des Reglers. Da kann ein wenig Hilfe in Form einer Dämpfung nicht schaden. Sie entsteht hier eher unscheinbar durch den Alu-Kühlkörper, unter dem der Sensor montiert ist. Jede Bewegung des Magneten führt zu Wirbelströmen im Aluminium und zu einem Gegen-Magnetfeld. Schwingungen des Magneten werden dabei durch Wirbelstromverluste gedämpft.

Magnet und Spule

Der Magnet selbst muss sehr leicht und sehr stark sein. Ein Neodym-Magnet mit einer Masse von unter 0,3 g ist gut geeignet. Für unsere verschiedenen Musteraufbauten wurde der Typ Q-CDM50-G von www.supermagnete.de mit einer Masse von 0,23 g ver-

wendet. Kleine starke Magnete findet man oft auch in ausgeschlachteten CD-Laufwerken. Ob ein bestimmter Magnet geeignet ist, kann ein Vorversuch zusammen mit der Magnetspule klären. Bei einer angelegten Spannung von 12 V sollte die Spule den Magneten aus einer Höhe von mindestens 3 cm anheben können, besser sind 4 cm oder mehr.

Für die Spule wird ein Ferritstab verwendet, wie er in Mittelwellen-Radios üblich ist. Er sollte einen Durchmesser von 10 mm aufweisen und eine Länge von 80 mm bis 100 mm haben. Beim Aufbau der Spule sollte man sich etwas Zeit lassen. Wie Bild 3 zeigt, wird der Ferritstab in einen Schrumpfschlauch (a) gepackt und geschrumpft (b). Alternativ kann auch Isolierband verwendet werden. Danach beginnen wir mit dem Wickeln der Spule (c). Sie besteht aus vier Lagen zu je 400 Windungen 0,2-mm-Kupferlackdraht. Die Windungen können per Hand aufgebracht werden oder eventuell mit einem Bohrschrauber ganz langsam gewickelt werden (d). Danach sollten zuerst die Enden mit Schrumpfschlauch überzogen werden (e), dabei nicht vergessen, vorher die Anschlussdrähte herauszuführen (f), Abschließend kann die gesamte Spule noch einmal mit Schrumpfschlauch geschützt werden (g).

Wer das Zählen der Windungen umgehen will und lieber wild und frei wickelt, der kann den Ferritstab auf einer Länge von 50 mm mit Cul 0,2 bewickeln.

bis die Wicklung einen Durchmesser von 18 mm erreicht. Die Spule hat dann einen ohmschen Widerstand von 40...50 Ω , so dass an 12 V ein Strom von nicht mehr als 300 mA fließt (das gilt allerdings nur für reinen Gleichstrom. Bei Ansteuerung der Spule durch den PWM-Ausgang des Prozessors und verstärkt durch den ULN 2003 haben wir es mit einem pulsierenden Gleichstrom zu tun. Der Mittelwert des Stroms ist dadurch geringer, und das Spulenverhalten ist ähnlich wie bei einem Betrieb mit Wechselstrom, so dass ein wesentlich geringerer Strom durch die Spule fließt).

Damit ist die Spule fertig. Wenn man die Drahtzuführung und die Enden sorgfältig mit Isolierband schützt, kann die Spule für einen ersten Test einfach von der Krokoklemme einer Lötthilfe (dritte Hand) gehalten werden. Die richtige Höhe lässt sich dann leicht justieren (Bild 4).

Praxis

Unser Prototyp (siehe Foto am Artikelanfang) besteht aus einem Kühlkörper aus Aluminium, unter dem sich der Hall-Sensor befindet. Auf diesem Kühlkörper ist eine Messingstange be-

festigt, durch die geschickterweise die Stromzufuhr zur Spule verlegt wurde. An der Stange ist eine Kunststoffhalterung, an die die Spule geklemmt wurde. Details sind in den Bildern 5a bis 5d zu sehen.

Nachdem die Spule befestigt wurde, kann alles an das Testboard angeschlossen werden und die Flugversuche können beginnen. Auf der Elektor-Homepage stehen zwei fertige Beispielprogramme zum Download bereit. Eines ist in Code Vision geschrieben, das andere in BASCOM.

Beginnen Sie am besten mit dem C-Programm, da es alle Parameter auf dem

PID-Regler

Ein Permanent-Magnet soll mittels eines Elektromagneten genau so stark angezogen werden, dass er in der Schwebe verharrt. Weil das Schwebemagnet-System eine instabile, nichtlineare Regelstrecke ist, muss sie sowohl stabilisiert als auch geregelt werden. Dazu verwenden wir einen PD-Regler. Regler steuern stetig und selbständig physikalische Größen, um einen vorgegebenen Sollwert – in unserem Fall die Position - zu halten und Störeinflüsse auszuschalten. Dazu vergleicht der Regler laufend einen Istwert (Position des Magneten) mit dem Sollwert (gewünschte Position des Magneten). Die so ermittelte Regelabweichung führt zur Stellgröße, die, wenn das System eingeschwungen ist, zu einer minimalen Regelabweichung führt. Weil es aber immer eine gewisse Zeit dauert, bis ein solches System reagiert und die Stellgröße wirkt, muss am Anfang überproportional reagiert werden und danach sofort unterproportional, damit keine Überkompensation erfolgt, die zur Regelkatastrophe führen würde. Die Stellgröße soll hier je nach System gedämpft wirken. Das Verhalten des Reglers wird durch Differentialgleichungen beschrieben.

Der P-Anteil ändert seine Größe proportional zur Regelabweichung (Sollwert-Istwert). Dies wirkt nur auf die Verstärkung KP.

Das D-Glied eines Reglers ist ein Differenzierer, welcher immer mit dem P-Anteil (oder I-Anteil) gemeinsam auftreten muss. Der D-Anteil entsteht durch die Änderung der Regelabweichung über die Zeit und wird mit der Nachstellzeit multipliziert. Er ist nicht von der Regelabweichung abhängig, sondern nur von der Änderungsgeschwindigkeit. Große Nachstellzeiten KD bewirken große Änderungen der Stellgröße und bringen damit oft Unruhe in die Regelung.

Ein Integralanteil wird dann verwendet, wenn die Regelabweichung möglichst genau auf Null gebracht werden soll. Er wird hier nicht verwendet, weil immer mit einer Regelabweichung gearbeitet wird und nur die Regelverstärkung verändert wird. Bei einem größeren Abstand zum Sensor verringert sich die Steilheit der Regelkurve, was durch eine größere Verstärkung ausgeglichen wird. So wird der Einfluss der stark nichtlinearen Regelstrecke kompensiert.

Listing

BASCOM-Beispiel PD-Regler

```
, Atm18 PD regulator
, S1 At Pb3 = Up
, S2 At Pb4 = Down

$regfile = „m88def.dat“
$crystal = 16000000

Dim N As Byte
Dim X As Integer
Dim Y As Single
Dim Z As Single
Dim Xold As Single
Dim Xp As Single
Dim Xi As Single
Dim Xd As Single
Dim P As Single
Dim I As Single
Dim D As Single

Config Adc = Single , Prescaler = 32 , Reference = Off
' AD-Wandler starten
Start Adc
Config Timer0 = Pwm , Prescaler = 1 , Compare A Pwm =
```

Clear Down , Compare B Pwm = Clear Down

```
P = 0.1
D = 60

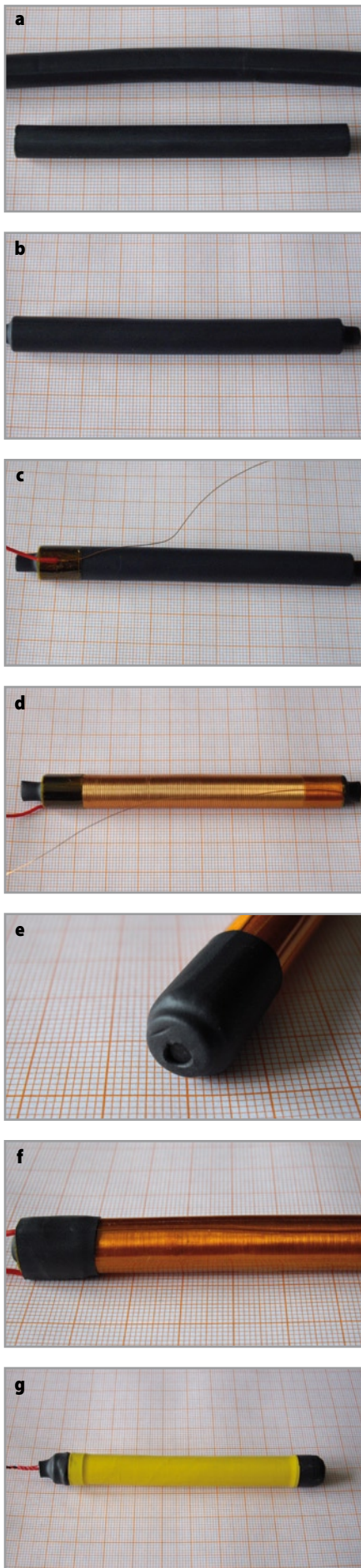
Do
  If Pinb.3 = 0 Then P = P + 0.0002
  If Pinb.4 = 0 Then P = P - 0.0002
  X = 0
  For N = 1 To 8
    X = X + Getadc(6)
  Next X
  X = X / 8

  If X < 512 Then X = 512
  Xp = X - 512
  Xp = Xp * P

  Xd = X - Xold
  Xold = X
  Xd = Xd * D

  Y = Xp + Xd
  Y = Y / 2
  If Y > 255 Then Y = 255
  If Y < 0 Then Y = 0

  Pwm0a = Int(Y)
Loop
```



Display anzeigt. Nach dem Anlegen der Betriebsspannung beziehungsweise nach einem Reset fließt zunächst kein Spulenstrom, weil der Proportionalfaktor des Reglers Null ist. Legen Sie den Magnet über den Sensor, richten ihn auf Maximalanzeige des Pv-Wertes auf dem Display aus und drücken Sie auf den Taster S1. Damit sollte der Strom ansteigen. Zugleich erkennt man dies an der ansteigenden Helligkeit der LEDs an den Ausgängen. Falls sich nichts tut, liegt wahrscheinlich der Magnet falsch herum. Drehen Sie ihn um und wiederholen Sie den Versuch.

Je länger Sie auf S1 drücken, desto stärker steigt der Spulenstrom an. Plötzlich beginnt sich der Magnet zu heben und steht dann stabil in der Luft. Mit S1 können Sie ihn noch höher steigen lassen. Drücken Sie S2 und S1 gleichzeitig, dann senkt er sich allmählich ab. Bestimmt werden Sie den Höhenflug auch einmal übertreiben. Dann knallt der Magnet plötzlich an den Ferritstab. Nun kennen Sie die maximale Flughöhe. Durch vorsichtiges Justieren der Magnetspule lässt sich die Flughöhe wahrscheinlich noch etwas vergrößern. Die Spule sollte gerade so hoch hängen, dass der Magnet noch aus dem Stand angehoben werden kann. S1 verstellt den Proportionalfaktor P des Reglers, also praktisch die Regelverstärkung. Mit S3 können Sie auch den Differentialanteil verändern, der für die Stabilität wichtig ist. In den meisten Fällen ist aber der voreingestellte Wert schon passend.

Falls sich bei Ihnen überhaupt nichts hebt, könnte die Richtung der Magnetfelder schuld sein. Polen Sie dann die Spule um. Weiterhin kann mit einem Voltmeter die Ausgangsspannung des Sensors überprüft werden. Sie sollte ohne Magnet bei 2,5 V liegen und bei aufliegendem Magneten über 4 V betragen. Ansonsten könnte noch der Magnet zu schwach oder zu schwer sein. Aber das sollte ja schon der Vorversuch ohne den Regler geklärt haben.

MLC in C

Das C-Programm für den MLC (Magnet Levitation Controller) ist sehr umfangreich und kann hier nur grob vorgestellt werden:

Bild 3. Schritte der Spulenherstellung: Ferritstab mit Schrumpfschlauch (a) überzogen (b), Wicklungsanfang (c), fertig bewickelt (d), Ende mit Schrumpfschlauch überzogen (e) und mit herausgeführten Anschlüssen (f) und am Ende komplett mit Schrumpfschlauch überzogen (g).

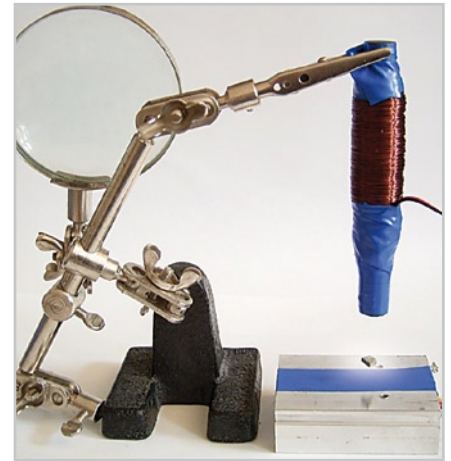


Bild 4. Ein einfacher Probeaufbau.

Erfassung der Hallsensor-Daten und Zeitgeber

Der A/D-Wandler dient sowohl zur Erfassung der Hallsensor-Daten als auch als Zeitgeber. Innerhalb einer Millisekunde werden acht Sensorwerte in einer Interrupt-Routine erfasst. Dann wird das Flag „adc_ready“ gesetzt. Dieses Flag wird in der Hauptprogrammschleife zur Synchronisierung verwendet. Mit der Funktion „adc_get_average()“ wird aus den acht Sensorwerten ein Mittelwert gebildet - der aktuelle Ist-Wert für den PD-Regler. Diese Mittelwertbildung unterdrückt Störungen auf dem Messsignal.

Der Regler

Eintausend Mal pro Sekunde wird der PD-Regler neu berechnet. Durch diese konstante Zeit braucht der Regelalgorithmus die Zeit nicht zu berechnen, das spart Rechenzeit. In der Funktion „mlc_update()“ wird zunächst der gemittelte Sensorwert berechnet. Aus diesem Ist-Wert wird der P-Anteil berechnet. Der D-Anteil wird aus der Differenz zwischen letztem und aktuellem Ist-Wert gebildet. Die Addition beider Anteile bildet den Stellwert - die Pulsbreite des PWM-Signals.

Das Stellglied (Aktor)

Das ist hier der Elektromagnet in Form einer Ferritkernspule, die als Stellglied innerhalb des Regelkreises dient. Ein mit 32 kHz pulsbreitenmoduliertes Signal (PWM) steuert die Leistungstreiber ULN2003. Die Spule wird nach Masse geschaltet. Durch die hohe PWM-Frequenz und die hohe Induktivität wird der Strom in der Spule stark integriert. Dadurch ergibt sich ein gleichförmiges Magnetfeld mit geringen Pulsanteilen.

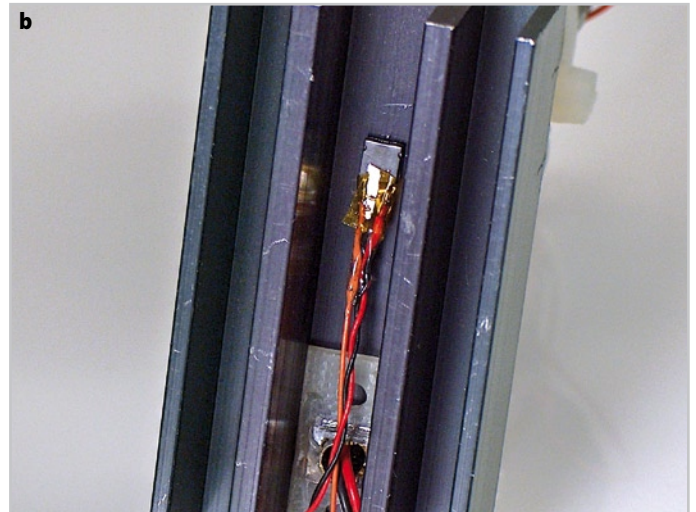
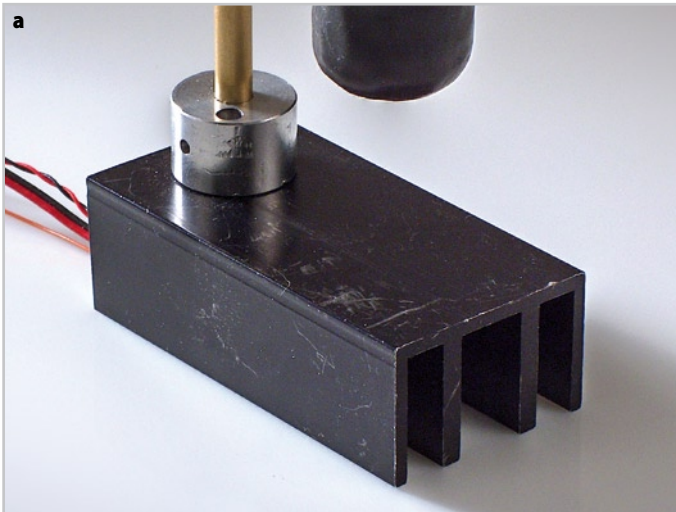
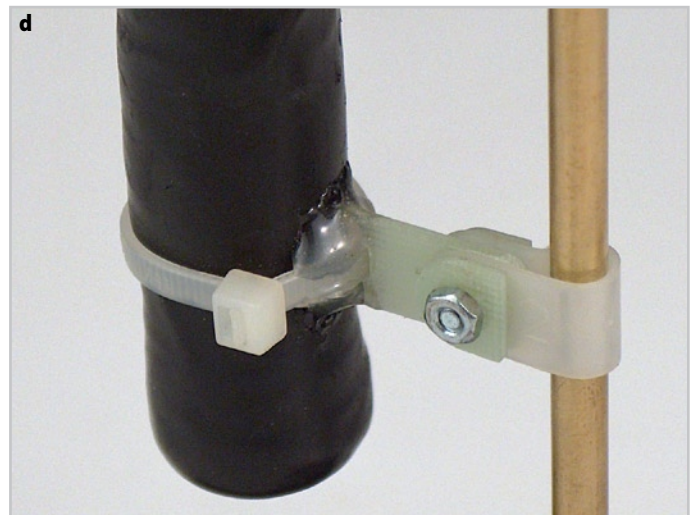


Bild 5. Details des Musteraufbaus: a. Grundplatte (Alu-Kühlkörper), b. Hallsensor, c. Messingstange mit Leitung zur Spule, d. Spulenhaltung mit Kabelbinder.



Die Display-Ausgabe

Um die hohe Regelfrequenz nicht durch zeitraubende Display-Ausgaben zu verringern, werden diese Ausgaben in viele einzelne Jobs unterteilt. In der Funktion „mlc_write_lcd()“ wird mittels einer so genannten „StateMachine“ in jedem Regelzyklus jeweils eine Display-Ausgabe ausgeführt.

Der Regelablauf

Nach der Initialisierung der einzelnen Module wird in einer Endlosschleife immer der gleiche Ablauf ausgeführt:

1. Regelkreis aktualisieren: `mlc_update();` // Update magnet levitation control

2. LC-Display Ausgabe: `mlc_write_lcd();` // Do a single LCD operation

3. Tastenabfrage für Regelparameter: `mlc_scan_buttons();` // Check push-buttons for Kp and Kd

4. Synchronisieren mit A/D-Wandler:

```
while (!adc_ready) // Synchronize the control loop
```

5. Nächsten Regelzyklus bei 1. starten

RC5-Bedienung

Mit angeschlossenem IR-Empfänger kann der Regler auch per Fernbedienung gesteuert werden. Taste 1 vergrößert den p-Wert, Taste 4 verkleinert ihn. Mit der Taste 3 vergrößert man den d-Wert, mit Taste 6 wird er verringert. Zusätzlich hat die Taste 0 eine Not-Aus-Funktion, durch die der p-Wert auf Null gebracht wird.

BASCOM-Beispiel

Das Basic-Programm (siehe Listing) wurde bewusst ganz einfach gehalten und kommt ohne LCD und ohne Fernbedienung daher. Über die Tasten S1 und S2 wird nur der P-Faktor und damit die effektive Flughöhe verändert. Beim Start erhält der Regler mit $P =$

0,1 schon eine gewisse Verstärkung, damit man den Magneten genau über den Sensor legen, ihn also auf maximalen Spulenstrom justieren kann.

Der Regler rechnet mit Realzahlen (Single). Der Istwert wird hier ebenfalls aus einer Mittelung aus acht Einzelmessungen gebildet. Nur der Bereich 512 bis 1023 ist für den Regler verwendbar. Je tiefer der Magnet steht, desto höher ist der Messwert. Multipliziert mit dem P-Faktor ergibt sich daraus der einzustellende PWM-Wert. Es würde auch ganz ohne den D-Anteil gehen, aber wenn man ihn hinzuaddiert, wird die Bewegung gedämpft. Wenn der Magnet sehr schnell ansteigt, erahnt der Regler ein bevorstehendes Überschwingen und nimmt entsprechend etwas Gas weg.

(080359e)

Bauteilhinweis:

Ein Teilesatz mit Ferritstab, HAL815 und Magnet ist erhältlich im Elektor-Shop unter Nr. 071035-71.