

# Der schwebende W

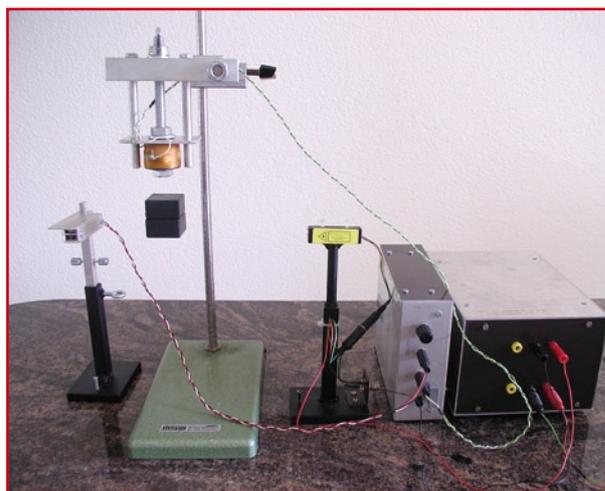
## Verblüffende Wirkung mit kleinem

Von Franz Raemy

**Zum ersten Mal kommt unser Workshop ganz ohne Mikrocontroller aus. Statt dessen präsentieren wir ein Experiment, das die Zuschauer schon vor Jahrzehnten in seinen Bann gezogen hat. Modern ist allerdings die verwendete Laserdiode und das geradezu minimalistische Design der Regelungselektronik!**

Eines vorweg: Das hier vorgestellte Experiment darf man mit Fug und Recht als klassisch bezeichnen. Wer eine naturwissenschaftliche Ausbildung genossen hat, mag etwas Ähnliches auch schon gesehen, aufgebaut oder gar konzipiert haben. Und Elektor-Leser, die uns schon

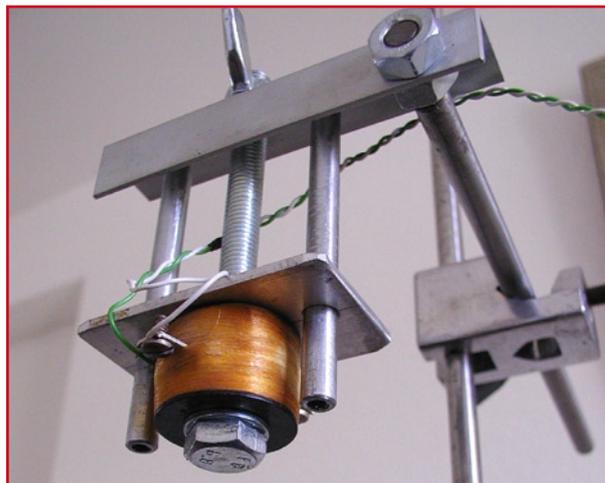
seit den Siebzigern des letzten Jahrhunderts die Treue halten (und davon gibt es viele, wie wir aus Leserbriefen und -Mails wissen) können sich vielleicht noch dunkel an einen gewissen „Schwerkraft Absorber“ erinnern. Anno 1977 hatte der Elektor-Entwickler und spätere Redakteur Loys Nachtmann nämlich eine Schaltung veröffentlicht, die eine Metallkugel beziehungsweise -scheibe durch die präzise geregelte Anziehungskraft eines darüber angebrachten Elektromagneten genau in der Schwebe halten konnte. Freilich treten wir unserem ehemaligen Kollegen nicht zu nahe, wenn wir behaupten, dass er zumindest die Grundzüge der Schaltung nicht selbst erfinden musste. Denn diese finden sich wohl in jedem Regelungstechnik-Lehrbuch.



**Bild 1.**  
Der Aufbau im Überblick: Links befindet sich der Fotosensor, am Stativ ist der E-Magnet angebracht und direkt unterhalb schwebt die „Kugel“, hier in Gestalt von quaderförmigen Permanentmagneten. In der Bildmitte ist das Laserdiodenmodul als Lichtquelle erkennbar. In den Kästen rechts ist die Regelungselektronik beziehungsweise das Netzteil untergebracht.

### Prinzip

Die Kraft, mit welcher der E-Magnet den Metallkörper anzieht, muss gleich der Erdanziehungskraft sein. Diese Kraft ist proportional zum Strom durch den Magneten, sinkt aber mit wachsendem Abstand zwischen Magnet und Schwebe-Objekt. Und so gilt es, bei wachsendem Abstand den Strom höher zu regeln und umgekehrt. Der Abstand wiederum wird mit einer Art Lichtschranke detektiert, in deren Strahlengang sich der schwebende Körper auf und abbewegt. Ein Fotosensor misst hierzu schlicht und einfach die Lichtmenge, die das Objekt noch durchlässt. Zwischen dem Fotostrom als Eingangsgröße und dem Strom durch den Magneten als Ausgangsgröße sitzt dann die Regelungselektronik, die üblicherweise durch die Buchstaben PID subsummiert wird, was für Proportional-, Integral- und Differentialregler steht. Vor etwas mehr als dreißig Jahren riskierte Loys Nachtmann hier wenig: Sein „Schwerkraft-Absorber“ hält sich genau an das PID-Prinzip, was auf drei OpAmps und nicht weniger als sechs Potentiometer herausläuft, wenn man alle Möglichkeiten zum Abgleich ausnutzen will. (Mit zwei weiteren Opamps wurde ein nachgeschalteter Spannungs-Strom-Konverter realisiert. Wer sich für die Schaltung interessiert, kann den Originalartikel unter [1] herunterladen). So verblüffend der Effekt der „schwebenden Kugel“ (man kann problemlos auch anders geformte Gegenstände wie Würfel oder gar Schrauben schweben lassen) schon



**Bild 2.**  
Wenn sich der Magnet durch Drehen einer Schraube in der Höhe genau positionieren lässt, ist der Abgleich besonders einfach.

# ürfel

## Bauteil Aufwand



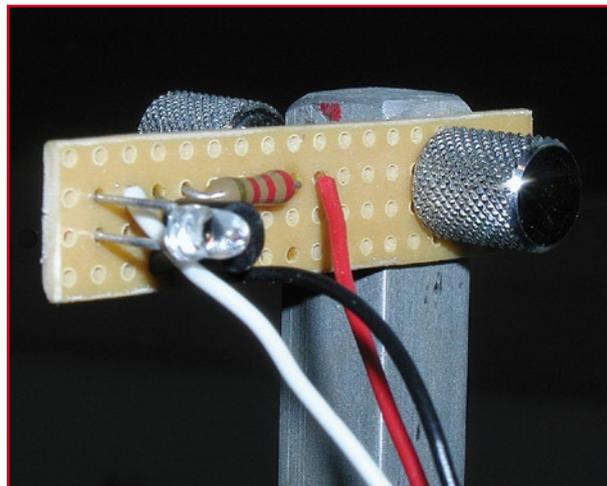
ist: Genauso erstaunlich mag so manchem Elektroniker erscheinen, dass das Experiment auch mit nur zwei Opamps und einem Leistungstransistor gelingt. Der Autor - promovierter Physiker, leidenschaftlicher Elektronik-Hobbyist und seit 25 Jahren als Physik- und Mathematiklehrer tätig - hat eine Regelschaltung entwickelt, die tatsächlich mit der berühmten Handvoll Bauteile auskommt. Das Ganze wurde für den Physikunterricht aufgebaut und auch schon erfolgreich an einem „Tag der offenen Tür“ vorgeführt. Es funktioniert also - doch wie immer ist die Elektor-Workshop-Community dazu aufgerufen, sich durch Nachbasteln selbst davon zu überzeugen!

### Mechanik

**Bild 1** zeigt alle Komponenten des Versuchs. Links befindet sich der Fotosensor, am Stativ ist der E-Magnet angebracht und direkt unterhalb schwebt die „Kugel“, hier in Gestalt von quaderförmigen Permanentmagneten (2 cm x 2 cm x 1 cm). In der Bildmitte ist die Lichtquelle erkennbar. Während die Elektor-Bastler vor dreißig Jahren noch eine Sammellinse vor der Lampe anbringen mussten, um einen halbwegs parallelen Strahlengang hinzubekommen, hat man es heute einfacher, wenn man wie der Autor ein Laserdiodenmodul einsetzt (zum Beispiel bei Reichelt erhältlich). In den Kästen rechts ist die Regelelektronik beziehungsweise das Netzteil untergebracht, welches die Laserdiode (5 V) und die Regelung (12 – 18 V) versorgt. Der Elektromagnet, der Fotosensor und das Laserdiodenmodul sind an Stativen befestigt, welche man bei Laborversendern, Lehrmittel-Distributoren, aber auch über eBay beziehen kann [2][3]. Die übrigen mechanischen Komponenten stammen aus dem Baumarkt.

Zur „Gewinnung“ des E-Magneten hat der Autor ein größeres Relais ausgeschlachtet. Wer so etwas nicht sowieso in seiner Bastelkiste hat, kann es preiswert kaufen. Im Gegensatz zur vor dreißig Jahren in Elektor veröffentlichten Lösung, nämlich einen alten Transformator zu zerlegen, bleibt der Umbauaufwand hier in Grenzen. Wer doch einen Blechpakettrafo verwenden will, muss die I-Bleche entfernen und die E-Bleche alle auf eine Seite drehen. Dann lässt sich die Sekundärwicklung nutzen (minimal 2 A). Den E-Magneten befestigt man höhenverstellbar an einem

Stativ und am besten so, dass er durch Lösen/Festziehen einer einzigen Schraube zu fixieren ist. Noch besser ist es, wenn sich der Magnet durch Drehen einer (Flügel-)Schraube in der Höhe fein positionieren lässt (**Bild 2**).

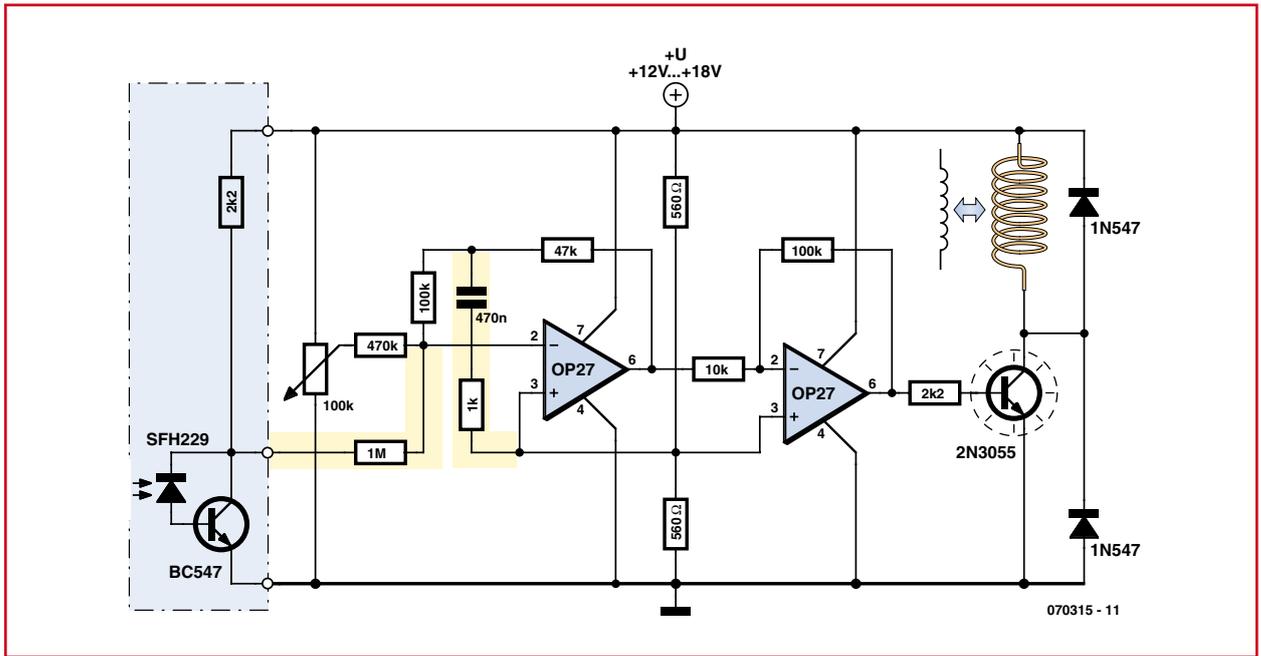


**Bild 3.**  
Hier ist die Fotodiode zu sehen. Der Transistor BCS47 ist verdeckt.



**Bild 4.**  
Der in ein Gehäuse eingebaute Lichtsensor.

**Bild 5.**  
Der Schaltplan mit der Mess-, Regel- und „Leistungs“-Elektronik. Ohne die farblich gekennzeichneten Bauteile handelt es sich schlicht um einen E-Magneten, dessen Spulenstrom manuell durch ein Poti einstellbar ist. Durch den Sensor und drei zusätzliche passive Bauteile wird daraus eine Regelung!



**Elektronik**

Zwei andere Stative halten das Laserdiodenmodul und die Fotodiode (**Bild 3**). Die Fotodiode SFH229 sollte in ein kleines Gehäuse eingebaut werden, um Fehlsignale durch Streulicht zu vermeiden. **Bild 4** zeigt, wie zwei kleine aneinandergeschraubte Metallwinkel und ein kleines Loch als Fenster dabei gute Dienste leisten. Im Gehäuse ist nicht nur der Fotosensor, sondern auch ein Transistor BC547 und ein Widerstand als Verstärker untergebracht, drei Leitungen (+U, 0 V und Signalleitung) führen dann zur Platine, auf der die eigentliche Regelelektronik untergebracht ist. Diese Lösung macht die Steuerung unempfindlicher gegen eingestreute Störungen.

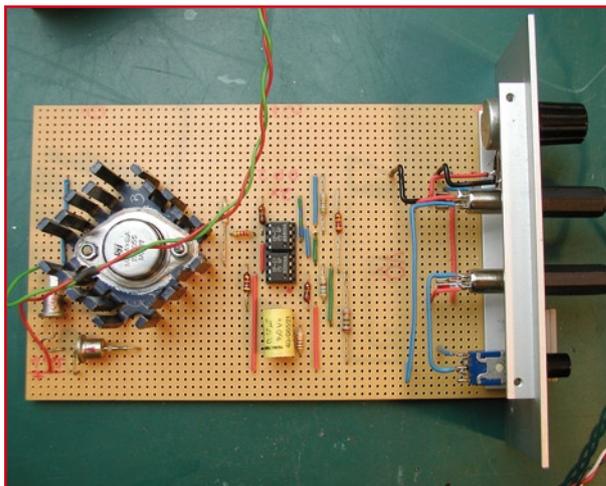
Der Schaltplan in **Bild 5** zeigt die Mess-, Regel- und „Leistungs“-Elektronik im Überblick, die aufgebaute Platine sieht man in **Bild 6**. Die Magnetfeldspule wird über den Leistungstransistor 2N3055 angesteuert. Die beiden Dioden rechts dienen zum Schutz der Schaltung, weil es sich um ein durchaus starkes Magnetfeld handelt und beim Abschalten durch Induktionseffekte beträchtliche Ströme von mehreren Ampere auftreten können. Diese werden dann über die beiden Dioden 1N547 abgeleitet. Die

zwei Bauteile lassen sich auch durch andere Dioden ersetzen, die natürlich entsprechend belastbar sein müssen (wie zum Beispiel eine 1N4007). Der rechte Opamp ist als (invertierender) Verstärker mit festem Faktor beschaltet und kann formal noch zur Leistungsstufe hinzugerechnet werden. Mit dem linken Opamp und einem Poti ist ein Verstärker realisiert, mit dem sich ein *konstant* bleibender Strom durch die Spule einstellen lässt (man denke sich die Schaltung an den drei Leitungen zum Lichtsensor und am Kondensator aufgetrennt). Dieser konstante Strom ist beim Abgleich so einzustellen, dass die Anziehungskraft des Magneten bei der gegebenen Entfernung gerade der Erdanziehungskraft auf den schwebenden Körper entspricht (siehe unten). Gleichwohl ließe sich damit nur ein instabiles Gleichgewicht einstellen, da ja noch keine Regelung greift. Bei der geringsten Störung fiele die Kugel dann entweder zu Boden oder flöge nach oben, um am Magneten aufzutreffen. Mit dem Sensor und nicht mehr als drei passiven Bauteilen kommt nun die Regelung ins Spiel. Der 1-k-Widerstand reduziert die Gegenkopplung, erhöht also den Verstärkungsfaktor; der Kondensator lässt diesen erhöhten Verstärkungsfaktor aber nur für die veränderlichen Anteile des Fotostroms wirksam werden, mit denen das System auf kleine Auslenkungen aus dem Gleichgewicht reagiert (der Regelungszeit führt damit zu einem differenzierenden Verhalten der Schaltung).

Bei der Dimensionierung hat man nach Erfahrung des Autors etwas Spiel, das Ganze funktioniert auch, wenn die Bauteilwerte nur näherungsweise eingehalten werden. Die Werte der Leistungsstufe muss man selbstverständlich so wieso soweit anpassen, dass sich ein praktikabler Strom durch den jeweils verwendeten Magneten ergibt (rund 1 bis 1,5 A sind typisch).

Nach den Erfahrungen des Autors reguliert das System mit einer Frequenz von rund 300 bis 400 Hz nach. Man kann die Schwankungen des Magnetfeldstroms in Höhe von typischerweise 0,1 A - die wohl auch auf das einfache Design der Regelung zurückzuführen sind - mit dem Oszilloskop beobachten. Die entsprechende mecha-

**Bild 6.**  
Das Foto zeigt die Regelelektronik: Ganz links der gekühlte Leistungstransistor; die beiden Opamps sind im Zentrum zu finden. Rechts außen der Eingang für das Signal vom Lichtsensor und der Stromausgang für den Elektromagneten. Oben sieht man das Potentiometer zur Einstellung des konstanten Stromanteils und unten einen Drucktaster zum Ausschalten des Magnetfeldes.



nische Auslenkung des Gegenstandes beträgt im Normalfall aber nur Bruchteile eines Millimeters. In jedem Fall ist auf eine ausreichend stabile Aufhängung des E-Magneten zu achten (schweres Stativ, kurze Hebel), da sich die Schwingungen sonst zu sehr auf das Gestänge übertragen können. Im ungünstigsten Fall schaukeln sich die mechanischen Schwingungen so weit auf, dass das Gleichgewicht zerstört wird. In diesem Fall muss das Stativ stabilisiert und eventuell ein anderer magnetischer oder magnetisierbarer Gegenstand verwendet werden.

### Praxis

Zum Abgleich stellt man den Poti auf Mittelstellung, positioniert den zu schwebenden Gegenstand mit der Hand im Strahlengang der Lichtschranke und stellt die Höhe des Magneten (sprich die Entfernung zum Metallkörper) so ein, dass dieser gerade schwerelos zu sein scheint (mit der Hand kann man das gut fühlen). Bei den typischerweise verwendeten Magneten sind das wenige Zentimeter. Es versteht sich von selbst, dass die Masse des Gegenstandes nicht zu groß sein darf (maximal einige zig Gramm), weil dann der passende Abstand zu klein, die wirkenden Kräfte zu groß und das Ganze zu instabil werden würde.

Die Feineinstellung wird dann elektrisch mit dem Potentiometer durchgeführt. Optimal „sitzt“ der Gegenstand, wenn er gerade die Hälfte des maximal am Fotosensor ankommenden Lichtes auffängt. Beobachtet man ein zunehmendes Schwingen, muss man die Distanz (und den kons-

tanten Strom mithilfe des Potis) verändern. Wenn alles nichts hilft, sollte man einen anderen magnetischen oder magnetisierbaren Gegenstand ausprobieren.

Der Autor hat bereits ein 22-mm-Kugellager sowie verschiedene Schrauben schweben lassen. Eine Schraube, die mit dem Schlitz nach unten schwebt, dreht sich unter einem leichten Heben und Senken um die eigene Achse. So wird die Schraube gehoben, wenn der Schlitz nicht in Richtung des Laserstrahls „sieht“ und fällt dann um die Schlitztiefe nach unten, wenn der Laserstrahl parallel zur Nut verläuft. Einfach wird die Positionierung, wenn man sich einen Schwebekörper aus einem Permanentmagneten und einer unten angehängten Schraube zusammensetzt. Dies stabilisiert das Schweben, weil ein langer Gegenstand langsamer als ein kurzer Gegenstand umfällt. Die Masse darf nämlich keinesfalls ins Trudeln geraten!

Mit diesen Erfahrungen ist der Autor jedenfalls gut gerüstet für die nächste Herausforderung: den Bau einer Modell-Magnet-Schwebebahn. Erste Vorversuche verliefen jedenfalls vielversprechend!

### Weblinks

[1] [www.elektor.de/schwerkraftabsorber](http://www.elektor.de/schwerkraftabsorber)

[2] [www.phywe.de](http://www.phywe.de)

[3] [http://business.listings.ebay.de/Laborzubehoer\\_Gestelle-Stativ\\_W0QQsacatz70325QQsocmdZListingItemList](http://business.listings.ebay.de/Laborzubehoer_Gestelle-Stativ_W0QQsacatz70325QQsocmdZListingItemList)

(070315)

Anzeige