

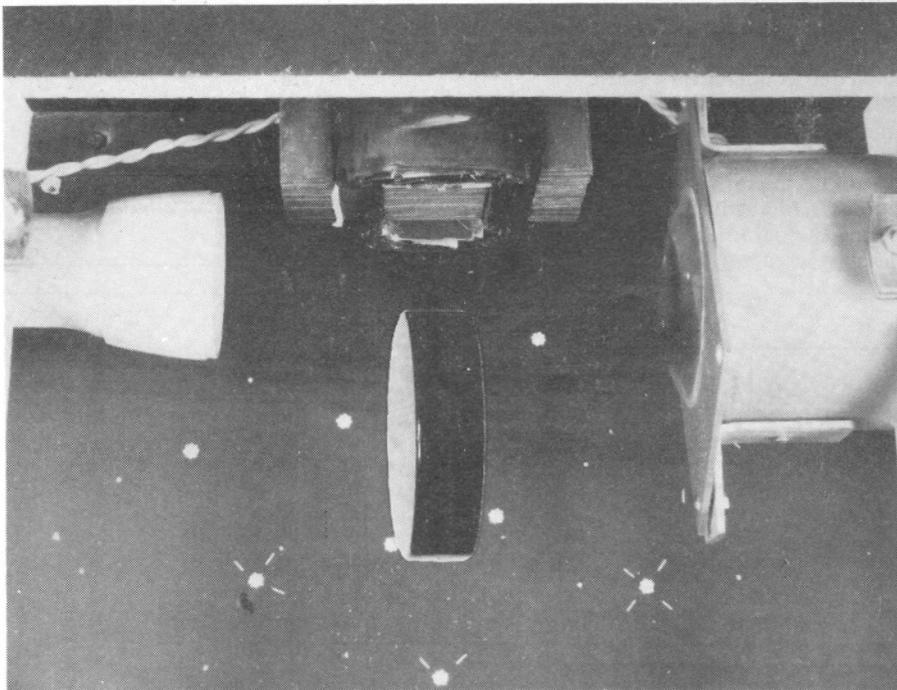
# SCHWERKRAFT ABSORBER

Die scheinbare Aufhebung der Schwerkraft gehörte früher zu dem Betätigungsfeld von Gauklern und Illusionisten. Mit der hier beschriebenen Schaltung erreicht man den gleichen Effekt auf elektronischem Wege mit Hilfe eines regelungstechnischen Modells. Der Bastler hat meist wenig Möglichkeiten, sich mit diesem interessanten Gebiet der Elektronik zu befassen. Aus diesem Grunde wurde ein Schwerkraftabsorber entwickelt, der den interessierten Leser auf einfache und leicht verständliche Weise mit der Regelungstechnik konfrontiert.

Die Regelungstechnik ist seit langem ein wichtiger Zweig der Elektrotechnik. Aber erst der integrierte Operationsverstärker ermöglicht es auch dem Bastler, preiswerte und kompakte Regler

zu realisieren.

Um die Aufhebung der Schwerkraft mit Hilfe der Elektronik durchzuführen, mußte zunächst die Regelungstechnik die theoretischen und praktischen Vor-



aussetzungen schaffen. Man benötigt unter anderem einen kräftigen Elektromagneten, eine Lichtschranke, einen metallischen Gegenstand — der als Schwebekörper Verwendung findet — und einige Quadratzentimeter Elektronik.

Damit ein Körper im Raum schwebt, muß die Anziehungskraft der Erde durch eine gleichgroße, jedoch entgegengesetzt gerichtete Kraft kompensiert werden.

Diese der Erdanziehungskraft entgegengerichtete Kraft wird bei dem hier beschriebenen Schwerkraft-Absorber durch ein Magnetfeld erzeugt, dessen Feldstärke man elektronisch regelt. Das den Elektromagneten steuernde Regelungssystem wurde so dimensioniert, daß sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Erdanziehungskraft und der vom Elektromagneten erzeugten Gegenkraft einstellen kann. Da diese kompensierende Kraft magnetischen Ursprungs ist, muß der Schwebekörper zu einem hohen Prozentsatz aus ferromagnetischem Material bestehen. Dies bedeutet, daß er viel Eisen, Nickel oder Kobalt enthält. Aluminium ist für diesen Zweck nicht geeignet.

## Das Funktionsprinzip

Bild 1 zeigt das Blockschaltbild des Schwerkraft-Absorbers. Der optische Teil besteht aus einer Metallkugel, die sich im Strahlengang einer Lichtschranke befindet. Über der Kugel ist ein Elektromagnet montiert, der die kompensierende Kraft erzeugt und so die Kugel im Schwebestand hält.

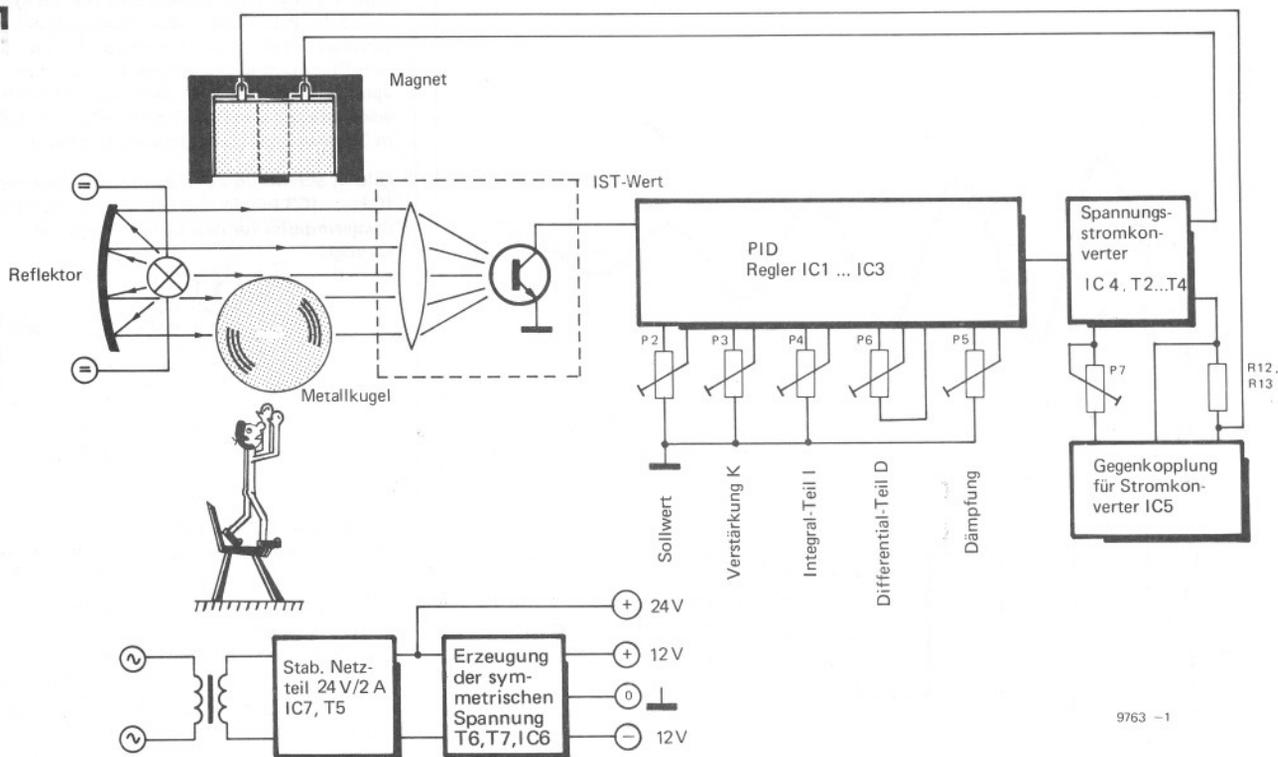
Die Kugel befindet sich in einem Lichtbündel, das von einer Birne erzeugt wird, die im Brennpunkt eines Hohlspiegels angeordnet ist. Dieses Lichtbündel bestrahlt mehr oder minder, je nach Lage der Metallkugel, einen Fototransistor, der im Brennpunkt einer Sammellinse plaziert ist.

Die in Bild 1 gezeichnete Lage der Kugel stellt die Gleichgewichtsposition dar. Um diese Position zu ermöglichen, muß das schematisch gezeichnete Regelungssystem folgende Aufgaben erfüllen: Bewegt sich die Kugel durch irgendeine Ursache aus ihrer Gleichgewichtslage nach unten, muß regelungstechnisch

**Bild 1.** Blockschaltbild des Schwerkraft-Absorbers. Der Schwebekörper blendet durch seine Querschnittsfläche — je nach Lage — mehr oder weniger Licht aus dem Lichtbündel der Lichtschranke aus. Die Lichtintensität im Brennpunkt der Linse ist ein Maß für den Abstand zwischen Kugel und Magnet. Über einen Fototransistor werden die Lichtstärkeschwankungen in elektrische Impulse umgewandelt. Ein PID-Regler steuert den Strom eines Elektromagneten, der durch sein magnetisches Feld die Kugel in der Schwebelage hält.

**Bild 2.** Ansicht des zum Elektromagneten umgebauten Netztransformators.

1



9763 -1

eingegriffen werden. Um das Gleichgewicht, also die ursprüngliche Lage, wieder herzustellen, erhält der Elektromagnet einen größeren Strom, so daß die Kugel wieder nach oben gezogen wird.

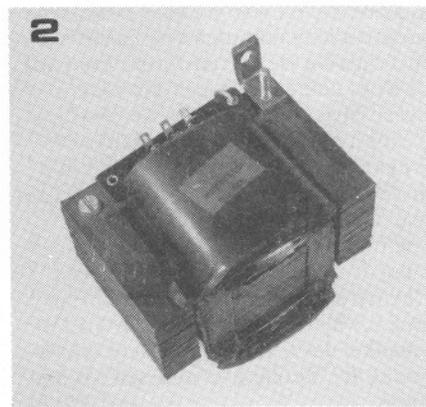
Diese Regelung funktioniert folgendermaßen: Die Querschnittsfläche der Kugel blendet mehr oder weniger Licht aus dem Strahlengang des Lichtbündels aus. Fällt nun die Kugel nach unten gelangt mehr Licht zum Fototransistor, wodurch sich sein Fotostrom vergrößert. Das Regelsystem sorgt nun dafür, daß der Strom durch den Elektromagneten ebenfalls zunimmt und die Kugel in ihre ursprüngliche Lage gezogen wird. Andererseits kann auch die Kugel durch irgendeine Ursache aus ihrer Ruhelage nach oben steigen. Dadurch wird eine größere Lichtmenge aus dem Strahlengang ausgeblendet und der Strom für den Elektromagneten nimmt entsprechend ab. Vermindert sich also der Strom durch den Fototransistor, so nimmt auch der Strom durch den Elektromagneten ab und die Erdanziehungskraft wirkt stärker auf die Kugel ein.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Die Lage der Kugel (Abstand zwischen Magnet und Kugel) wird in einen proportionalen Fotostrom umgewandelt, aus dem das Regelungssystem die Steuerinformation für den Elektromagneten gewinnt. Bei einem bestimmten Strom durch den Fototransistor stellt sich ein stationärer Zustand ein, d.h. die Kugel schwebt ruhig im Feld des Elektromagneten. Von einem guten Regelsystem muß erwartet werden, daß es schnell auf Störungen reagiert und unter allen Betriebsbedingungen stabil arbeitet. Beim Schwerkraftabsorber können bei falsch eingestelltem PID-Regler

Instabilitäten auftreten. Dabei schwingt die Kugel um ihre Gleichgewichtslage. Diese Schwingung kann sogar so groß werden, daß der Fangbereich des Elektromagneten überschritten wird und die Kugel nach unten fällt. Die eigentliche Regelung erfolgt mit Hilfe eines PID-Reglers, der mit den fünf Potentiometern P2 . . . P6 parametrisiert werden kann. Seine Funktionsweise, sowie die des Spannungs-Stromkonverters, wird später noch ausführlich erläutert. Das Netzteil versorgt die Elektronik und den Elektromagneten mit Spannung. Es liefert eine stabilisierte Spannung von 24 Volt und einen Strom von maximal 3 Ampere. Dieser relativ große Strom ist für den Elektromagneten nötig, um ein großes Magnetfeld aufbauen zu können. Mit einem Kunstgriff wird aus diesen 24 Volt eine symmetrische Spannung von  $\pm 12$  Volt erzeugt, die für die Speisung der Operationsverstärker benötigt wird.

### Praktische Schaltung

Der Schwebekörper muß, wie schon anfangs erwähnt, aus Metall bestehen. Da man keine beliebig starken Magnetfelder ohne entsprechenden Aufwand



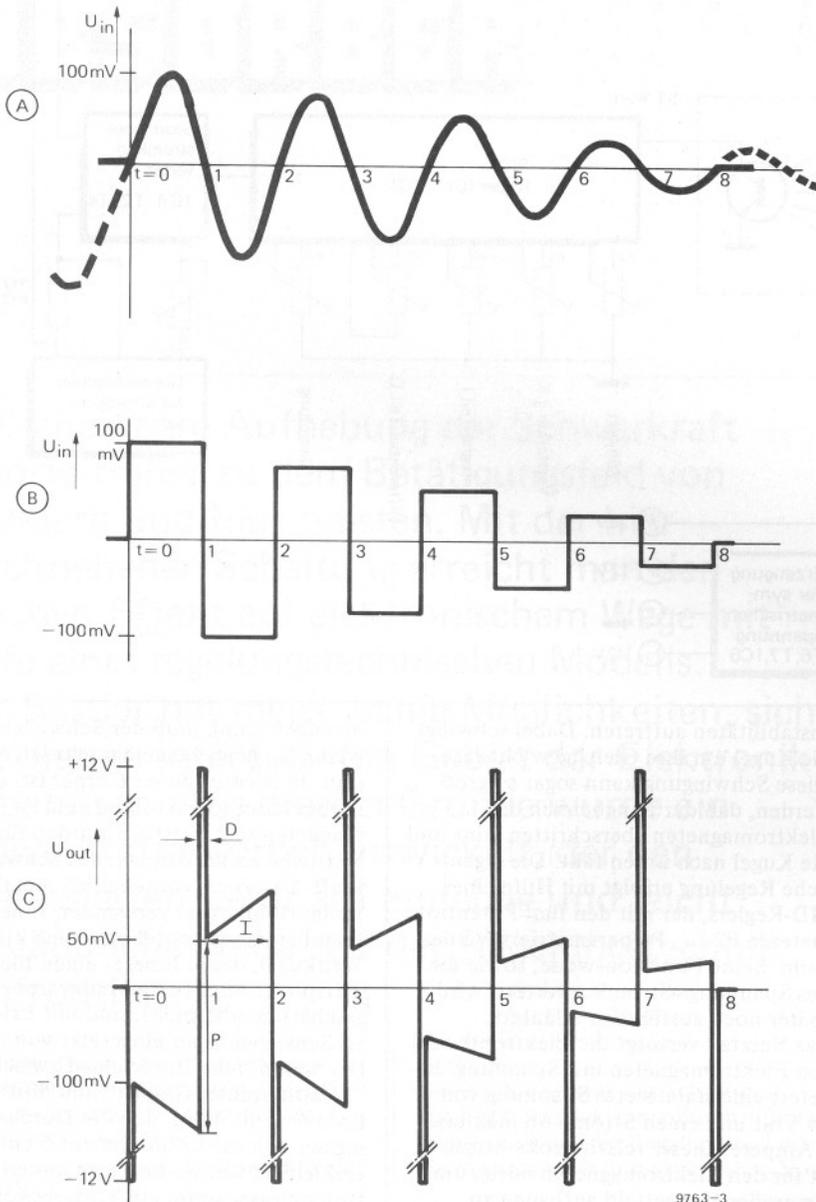
erzeugen kann, muß der Schwebekörper weiterhin gewichtsmäßig sehr leicht sein. Je leichter dieser Körper ist, desto größer kann sein Abstand vom Magneten sein. Deshalb wurden für die Versuche an Prototypen des Schwerkraft-Absorbers vornehmlich metallische Hohlkörper verwendet. Eine leere Schuhcremeschachtel oder eine kleine Weltkugel, deren Inneres einen Bleistiftspitzer birgt (in Schreibwarengeschäften erhältlich), sind mit Erfolg als Schwebekörper eingesetzt worden. Der wesentliche Unterschied zwischen "Bleistiftspitzer-Globus" und Mutter Erde besteht darin, daß der Durchmesser von ca. 12700 km auf 5 cm verkleinert wurde. Letztgenannten Durchmesser sollte ein Schwebekörper mindestens besitzen, damit seine Querschnittsfläche immer größer ist als die des Lichtbündels.

### Die Lichtschranke

Der Lichtsender kann mit einer Taschenlampe aufgebaut werden. Der eingebaute Reflektor ermöglicht die Bündelung des Lichtstrahls. Als Lichtquelle wurde im Mustergerät eine 12 Volt/100 mA-Birne verwendet. Wichtig ist nur, daß die Lampenleistung mindestens ein Watt beträgt. Die Batterie entfällt, da die Birne über zwei Anschlußdrähte von der Platine versorgt wird.

Der Lichtempfänger besteht aus einer bikonvexen Linse, einem Papp- oder PVC-Rohr und dem Fototransistor. Die Brennweite der Linse betrug im Mustergerät ca. 10 cm und ihr Durchmesser 5 cm. Im Brennpunkt der Linse sitzt der Fototransistor. Als Linse kann eventuell eine Lupe Verwendung finden. Um den Einfluß von Fremdlicht zu verringern, ist es von

3



**Bild 3.** Dieses Bild verdeutlicht die Wirkungsweise des PID-Reglers. Eine abklingende Sinusschwingung (3 A) wird durch eine amplituden- und phasengleiche Rechteckspannung ersetzt (3 B). Steuert diese Rechteckspannung den PID-Regler, erhält man die in 3C gezeichnete Ausgangsspannung.

**Bild 4.** Schaltbild des Schwerkraft-Absorbers. IC1 ... IC3 bilden den PID-Regler, der die Steuerimpulse für den Elektromagneten erzeugt.

Die Stärke dieses Magneten und das Gewicht der Metallkugel bestimmen den maximal erzielbaren Abstand. Im Mustergerät betrug der Abstand zwischen Kugel und Magnet ca. 5 cm. Sollen größere Abstände erreicht werden, dann sollte ein großer Siliziumferritkern Verwendung finden. Dieser kann ebenfalls ein E-Profil besitzen. Werden auf den Wickelkörper 1500 Windungen mit 0,2 mm Kupferlackdraht aufgebracht, dann können Abstände bis zu 20 cm erreicht werden. Mit Si-Ferrit-Glockenkernen läßt sich der Abstand nochmals vergrößern.

### Die Elektronik

Wesentlichster Bestandteil der Elektronik ist der PID-Regler. (PID ist eine Abkürzung für Proportional-Integral-Differential-Regler). Mit den Potentiometern P2 ... P5 kann dieser Regler parametrisiert werden d.h., die Regelelektronik wird dem "Magnet-Kugelsystem" angepaßt. Um die Funktionsweise des PID-Reglers zu verstehen, soll ein kleines Gedankenexperiment unternommen werden, mit der Voraussetzung, daß es sich um einen idealen Regler handelt. Dadurch ergeben sich ähnlich wie beim idealen Operationsverstärker wesentliche Vereinfachungen. Für unser Gedankenexperiment wird die Kugel in Bild 1 in vertikaler Richtung angestoßen. Sie schwingt nun mit einer rasch abklingenden Sinusschwingung um ihre Ruhelage. Bild 3A zeigt einen Ausschnitt aus dem Zeitdiagramm dieser Schwingung, die der Fototransistor als Eingangsspannung an den PID-Regler liefert. Diese Sinusschwingung ersetzen wir nun gedanklich durch eine amplituden- und phasengleiche Rechteckspannung (Bild 3B). Schaltet man diese Spannung auf den Eingang des PID-Reglers, so entsteht an seinem Ausgang der in Bild 3C gezeichnete Spannungsverlauf. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  soll die Rechteckspannung einen Wert von 100 mV haben. Da der PID-Regler invertiert, erreicht die Ausgangsspannung die negative Aussteuergrenze. Weil für die Verstärkung der Wert  $k = 1$  gewählt wurde, fällt die Ausgangsspannung nach sehr kurzer Zeit auf den

Vorteil, die Innenseite mit mattschwarzem Papier auszulegen oder mit Wandtafflack zu bestreichen. Nur wenn die optischen Achsen von Lichtsender und -empfänger auf einer Linie liegen, ist eine sichere Funktionsweise möglich.

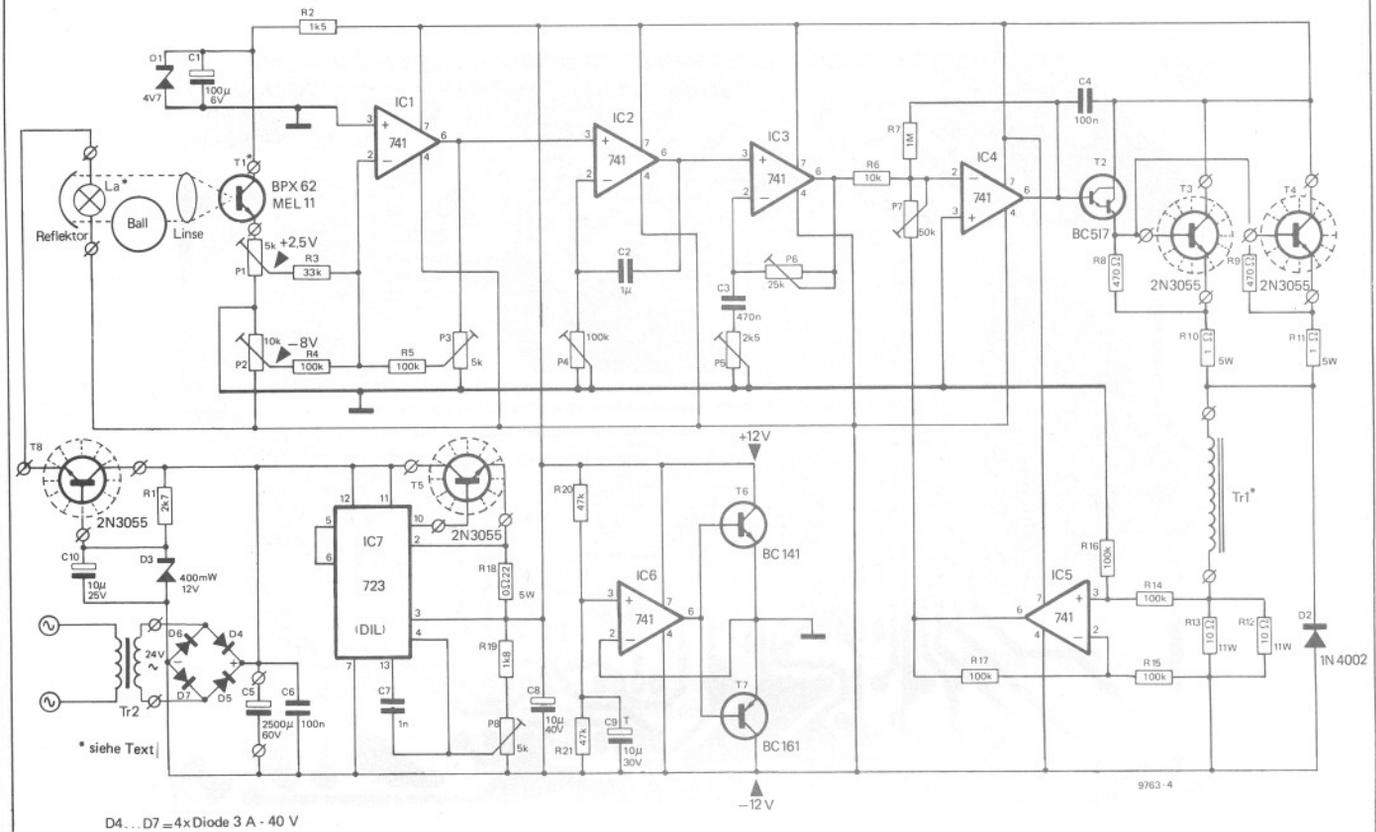
Leser, die von einem Selbstbau der Lichtschranke absehen möchten, können handelsübliche Geräte verwenden. Der bei solchen Lichtschranken im Empfänger plazierte Fotowiderstand muß dann durch den hier verwendeten Fototransistor ersetzt werden. Beim Kauf einer industriell gefertigten Lichtschranke ist ferner darauf zu achten, daß das vom Sender erzeugte Lichtbündel einen Mindestdurchmesser von 2,5 cm besitzt.

### Der Elektromagnet

Im Mustergerät wurde für den Elektromagneten ein umgebauter Netz-

transformator verwendet. Dieser Transformator muß unbedingt einen EI-Kern und eine Sekundärwicklung von ca. 60 Volt/2 Ampere besitzen, die man als Feldwicklung für den Elektromagneten umfunktioniert. Der Umbau des Transformators geschieht folgendermaßen: Zuerst werden die Trafobleche auseinandergenommen und das I-Paket entfernt. Da viele Transformatoren mit EI-Kern keinen Luftspalt besitzen (wechselweise Schichtung der Trafobleche), muß man die eine Hälfte des E-Paketes umdrehen. Bild 2 zeigt diesen umgebauten Transformator. Legt man an die Sekundärwicklung eine Spannung an, so entsteht in der Umgebung des Mittelschenkels ein starkes Magnetfeld. Befindet sich der Körper im Schwebezustand, bildet der Mittelschenkel des E-Kernes mit dem Mittelpunkt der Metallkugel eine senkrechte Linie.

4



Proportionalwert von 100 mV zurück. Der beschriebene Spannungssprung wird durch den Differentialteil des PID-Reglers ausgelöst. Die Zeitdauer, die verstreicht, bis die Ausgangsspannung auf den negativen Proportionalwert der Eingangsspannung absinkt, ist die Differentiationszeit des Reglers. Diese Zeit läßt sich mit dem Potentiometer P6 (Bild 1) beeinflussen. Nachdem die Ausgangsspannung auf den Proportionalwert abgesunken ist, kommt der Integrator des PID-Reglers zur Wirkung. Die Steilheit der von  $t = 0$  bis  $t = 1$  linearen Spannungsabfalls kann mit dem Potentiometer P4 eingestellt werden. Zur Zeit  $t = 1$  springt die Rechteckspannung auf  $-100$  mV. Da dieser Spannungssprung durch den PID-Regler invertiert wird, erreicht seine Ausgangsspannung die positive Aussteuergrenze. Nach Ablauf der Differentiationszeit stellt sich am Ausgang ein neuer Proportionalwert ein, dem wieder die Integration folgt (linearer Spannungsanstieg von  $t = 1$  bis  $t = 2$ ). Wie aus der Grafik ersichtlich ist, steuern auch kleine Eingangsspannungsänderungen den Ausgang des PID-Reglers an die jeweilige Aussteuergrenze. Mit der Größe der Eingangsspannung ändert sich jedoch die Steigung der Ausgangsspannung während der Integrationsphase, weil der Kondensator im Integrator des PID-Reglers mit einem

von der Eingangsspannung abhängigen Strom geladen wird. Nimmt beispielsweise die Amplitude der Eingangsspannung ab (siehe Bild 3B), verringert sich auch der Ladestrom des Kondensators, was eine geringere Steigung der Ausgangsspannung zur Folge hat.

Durch dieses Gedankenexperiment sollte gezeigt werden, wie die Potentiometer P3, P4 und P6 (Verstärkung  $k$ , Integralteil I, Differentialteil D) die Ausgangsspannung des PID-Reglers, bei rechteckförmiger Eingangsspannung, beeinflussen. Über die Wirkungsweise der Potentiometer P2 und P5 (Sollwert und Dämpfung) wird später noch berichtet.

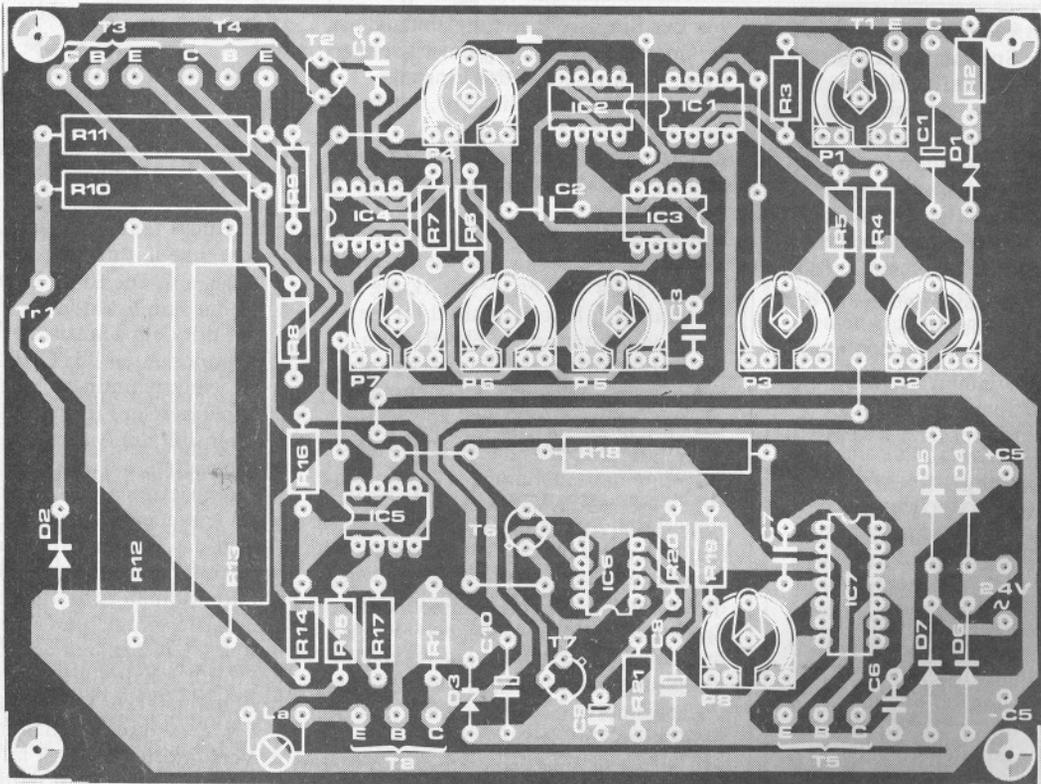
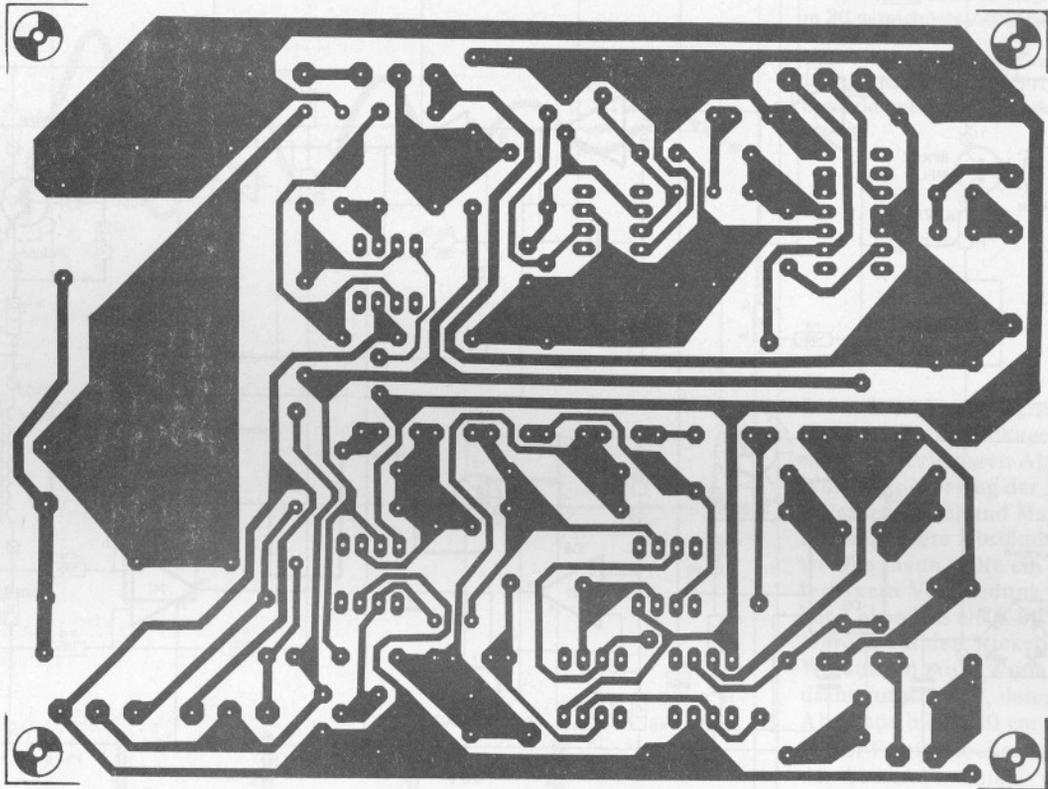
Die Ausgangsspannung des PID-Reglers steuert den Spannungs-Stromkonverter (Bild 1), der dem Elektromagneten den benötigten Steuerstrom liefert. Über die Widerstände R12, R13 wird der Spulenstrom des Elektromagneten meßtechnisch erfaßt und einer Gegenkopplungsschaltung zugeführt. Mit dem Potentiometer P7 läßt sich der Gegenkopplungsfaktor des Spannungs-Stromkonverters einstellen, was der Stabilität zugute kommt. Aus dem Blockschaltbild ist weiterhin ersichtlich, daß der Schwerkraft-Absorber zwei Rückkopplungsschleifen besitzt: Eine optische durch das System Lichtschranke, Kugel, Magnet und eine elektrische im Spannungs-Stromkonverter.

## Die Schaltung

Nach der Funktionsbeschreibung des Reglersystemes und der Untersuchung des zeitlichen Verhaltens des PID-Reglers soll nun das Schaltbild des Schwerkraft-Absorbers beschrieben werden.

In Bild 4 fällt zunächst die Lichtschranke mit der schwebenden Metallkugel auf. Die Birne La wird von einem stabilisierten Netzteil gespeist, das mit dem Transistor T8 und den Komponenten R1, C10, D3 aufgebaut ist. Netzspannungsschwankungen haben somit keinen Einfluß auf die Leuchtintensität der Birne. Der Fototransistor T1 wird ebenfalls von einer stabilisierten Spannungsquelle (R2, C1, D1) gespeist. In seinem Emitterzweig liegt das Trimpotentiometer P1. Der Spannungsabfall am Schleifer dieses Potentiometers bestimmt den Abstand zwischen Kugel und Magnet. IC1...IC3 bilden den PID-Regler. Der Proportionalteil besteht aus dem Operationsverstärker IC1, der als invertierender Verstärker geschaltet ist, und dessen Verstärkungsfaktor  $k$  mit dem Potentiometer P3 eingestellt wird (siehe auch Bild 1). Am invertierenden Eingang werden zwei Spannungen summiert. Zum einen die positive Spannung von Potentiometer P1 (Lageinformation der Kugel) und zum anderen die negative Gleichspannung von Potentiometer P2. Die Summe dieser beiden Spannungen

5



**Bauteile****Widerstände:**

R1 = 2k7  
 R2 = 1k5  
 R3 = 33 k  
 R4,R5,R14,R15,R16,R17 = 100 k  
 R6 = 10 k  
 R7 = 1 M  
 R8,R9 = 470  $\Omega$   
 R10,R11 = 1  $\Omega$ /5 Watt  
 R12,R13 = 10  $\Omega$ /11 Watt  
 R18 = 0 $\Omega$ 22/5 Watt  
 R19 = 1k8  
 R20,R21 = 47 k  
 P1,P3,P8 = 5 k (4k7) Trimmer  
 P2 = 10 k Trimmer  
 P4 = 100 k Trimmer  
 P5 = 2k5 (2k2) Trimmer  
 P6 = 25 k (22 k) Trimmer  
 P7 = 50 k (47 k) Trimmer

**Kondensatoren:**

C1 = 100  $\mu$ /6 V  
 C2 = 1  $\mu$   
 C3 = 470 n  
 C4,C6 = 100 n  
 C5 = 2500  $\mu$ /35-40 V  
 C7 = 1 n  
 C8 = 10  $\mu$ /40 V  
 C9 = 10  $\mu$ /30 V, Tantal  
 C10 = 10  $\mu$ /25 V

**Halbleiter:**

T1 = BPY 61, BPY 62, BPX 62, MEL 11  
 od. ähnl.  
 T2 = BC 517  
 T3,T4,T5,T8 = 2N3055  
 T6 = BC 141  
 T7 = BC 161  
 D1 = 4V7/400 mW, Zener  
 D2 = 1N4002  
 D3 = 12 V/400 mW, Zener  
 D4 . . . D7 = Si-Diode 3 A/40 V  
 IC1 . . . IC6 = 741  
 IC7 = 723

**Diverses:**

LA = Birne 12 V/ca. 100 mA  
 Reflektor aus einer Taschenlampe  
 Konvexe Linse mit ca. 10 Zentimeter  
 Brennweite (beim Optiker erhältlich)  
 Tr1 = umgebauter Netztransformator  
 (siehe Text)  
 Tr2 = Netztransformator 24 V/3 A

bildet die Eingangsspannung des PID-Reglers.

Das Zusammenspiel von Potentiometer P1 und P2 soll an Hand der nachfolgenden Überlegung verdeutlicht werden.

Nehmen wir an, die Kugel schwebt in der Lichtschranke und habe einen gewissen Abstand vom Magneten. Nun wird der Schleifer von Potentiometer P2 so verdreht, daß die Spannung negativer wird. Das Regelsystem hat das Bestreben, diese Spannungsänderung auszugleichen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Spannung am Schleifer von Potentiometer P1 positiver wird und damit die Differenzspannung an den Operationsverstärkereingängen 0 Volt beträgt. Die Kugel wird sich also bei zunehmend negativer Spannung am Schleifer des Potentiometers P2 solange in Richtung Erde bewegen, bis die Lichtintensität am Fototransistor so groß ist, daß der wachsende Strom durch den Fototransistor einen kompensierenden Spannungsabfall am Potentiometer P1 hervorruft. In diesem Gleichgewichtszustand schwebt die Kugel wieder ruhig im Magnetfeld. Mit dem Potentiometer P2 läßt sich also der gewünschte Abstand zwischen Kugel und Magnet einstellen.

Dem invertierenden Verstärker IC1 folgt der (nicht invertierende) Integrator. Die Stellung des Potentiometers P4 beeinflusst die Ladezeit des Kondensators C2. Dieser Integrator sorgt für die hohe Genauigkeit des Reglers.

Mit dem Operationsverstärker IC3 ist der Differentiator des PID-Reglers aufgebaut. Sieht man von dem Potentiometer P5 (Dämpfung) ab, dann unterscheidet sich die Beschaltung dieses Operationsverstärkers von der des Integrators (IC2) dadurch, daß Widerstand und Kondensator im Gegenkopplungszweig vertauscht wurden. Der Dämpfungsregler P5 ist nötig, um ein hochfrequentes Schwingen des Differentiators zu unterdrücken. Wie aus dem Schaltbild hervorgeht, sind der Proportional-, der Integral- und der Differential-Regler in Serie geschaltet. Dadurch multiplizieren sich ihre Frequenzgänge und bilden die Übertragungsfunktion eines PID-Reglers. Sicherlich wäre es wesentlich einfacher gewesen, den PID-Regler mit nur einem Operationsverstärker aufzubauen. Der Abgleich hätte sich dann sehr erschwert, da Verstärkung, Integrations- und Differentiationszeit nicht unabhängig voneinander einstellbar gewesen wären.

Die Ausgangsspannung des PID-Reglers gelangt über den Widerstand R6 zum Spannungs-Stromkonverter des Schwerkraft-Absorbers. Dieser ist mit den Transistoren T2 . . . T4 und dem Operationsverstärker IC4 aufgebaut. Bei der Schaltung handelt es sich um eine spannungsgesteuerte Stromquelle, deren Leistungstransistoren T3 und T4 den Strom durch den Elektromagneten Tr1 steuern.

Den schon erwähnten Rückkopplungszweig des Spannungs-Stromkonverters bilden der Operationsverstärker IC5 und die Widerstände R14 . . . R17 sowie das Trimpotiometer P7. Über die Widerstände R12, R13 wird der Strom des Elektromagneten gemessen. Dieser verursacht einen proportionalen Spannungsabfall. Da diese Spannung nicht massebezogen ist, mußte IC5 eingefügt werden.

Das Netzteil besteht aus einem Spannungsstabilisator IC7 und einem Längstransistor T5. Die stabilisierte Gleichspannung wird durch einen "Kunstgriff" in eine symmetrische Versorgungsspannung für die Operationsverstärker umgewandelt. Am nicht-invertierenden Eingang von IC6 liegt die halbe Ausgangsspannung des Stabilisators IC7. Durch die Gegenkopplung des Operationsverstärkers liegen auch die Emitter der Transistoren T6 und T7 auf halber Speisespannung. Die Emitter dieser Transistoren bilden den Massepunkt der Schaltung.

**Abgleich und Inbetriebnahme**

Es wird empfohlen, die ICs steckbar zu machen und zunächst nur die integrierten Schaltungen IC6 und IC7 einzubauen. Alle Potentiometer sind in Mittelstellung zu bringen. Nach anlegen der Trafospannung stellt man mit dem Potentiometer P8 und einem Multimeter (Innenwiderstand 20 K/Volt) am Kollektor von T6 eine Spannung von genau 12 Volt ein. Nun wird das Potentiometer P2 solange verstellt, bis an seinem Schleifer eine Spannung von -8 Volt zu messen ist. Jetzt kann man auch die übrigen Operationsverstärker in ihre Sockel stecken. Der Schwebekörper wird nun in den Strahlengang der Lichtschranke gebracht und das Potentiometer P1 solange verdreht, bis die Kugel vom Magneten angezogen wird. Meist beginnt sie nun heftig zu schwingen. Mit dem Dämpfungspotentiometer P5 und dem Potentiometer P3 kann auf minimales Schwingen des Schwebekörpers abgeglichen werden. Eine weitere Verbesserung ergibt sich durch richtiges Einstellen der Potentiometer P4 und P6 (Integral- und Differentialteil). Nach diesem Abgleich wird mit dem Potentiometer P7 schließlich optimale Stabilität erreicht d.h., bringt man die Kugel in den Strahlengang, treten keine Einschwingvorgänge auf. Zum Schluß sei noch darauf hingewiesen, daß die Leistungstransistoren T3, T4, T5 und T8 isoliert auf einem Kühlblech von ca. 3°C/Watt montiert werden müssen.