

**Facharbeit
im Leistungskurs Physik**



Die Magnetschwebbahn Transrapid - Bau eines Modells

Verfasser: Manuel Sutter

Kursleiter: G. Winter

Bearbeitungszeit: 12 Monate

Abgabetermin: 28.01.2005

Gliederung

Seite

1. Referenzstrecke in Shanghai	3
2. Der Transrapid	3
2.1. Geschichte und Entwicklung	3
2.2. Technik	5
2.2.1. Elektromagnetisches Trag- und Führsystem	5
2.2.2. Antrieb	7
2.2.3. Fahrweg	9
2.3. Wirtschaftlichkeit und Umwelt	10
3. Die Modelle	12
3.1. Magnetschwebebahn	12
3.1.1. Aufbau und Fahrweg	12
3.1.2. Schwebeprinzip und Elektronik	13
3.2. Schwebende Kugel	18
3.2.1. Aufbau	18
3.2.2. Schweben und elektronische Regelung	19
3.3. Probleme und Verbesserungsvorschläge	20
4. Zukunftsperspektiven	22
5. Quellenverzeichnis	23
6. Anhang	24

1. Referenzstrecke in Shanghai

Nachdem der Transrapid auf der Teststrecke im Emsland über ein Jahrzehnt im anwendungsnahen Dauerbetrieb getestet wurde, stellte sich immer mehr die Frage, wann er nun zum ersten Mal auf einer kommerziellen und öffentlichen Strecke fahren wird. Da in Deutschland bis jetzt die Voraussetzungen für den Bau einer Referenzstrecke wirtschaftlich und politisch nicht gegeben waren, war man auf das Interesse ausländischer Kunden angewiesen.

Im Jahr 2000 suchte die chinesische Regierung eine Möglichkeit das Finanzzentrum der Stadt Shanghai und deren Flughafen Pudong International zu verbinden. Die Transrapidverbindung sollte die Fahrzeit auf 8 Minuten verkürzen. Mit der deutschen Technik setzte man sich unter anderen Bahnsystemen durch, nicht zuletzt wegen des hohen Prestigecharakters für die aufstrebende Industrienation China. Der Bau der Strecke begann im März 2001 und wurde nach 1 1/2 Jahren Bauzeit vollendet. Es fielen dabei Kosten von umgerechnet etwa 1 Mrd. Euro an. Nach der Testzeit, die wenige Monate dauerte, wurde auf der Strecke bereits ein neuer Geschwindigkeitsrekord aufgestellt. Der Transrapid raste dabei mit 501 km/h über die 30 km lange Strecke hinweg. Heute verkehren die drei Züge, welche jeweils aus fünf Sektionen bestehen, seit Dezember 2003 täglich im Zehn-Minuten-Takt.

Anfängliche Probleme, wie z.B. das Absinken der Fahrwegsstützpfeiler, wurden überwunden und die Technik arbeitet nun fehlerfrei. Dies hat die chinesische Regierung so überzeugt, dass erst vor wenigen Monaten Gespräche über eine weitere Strecke begonnen wurden. Bis spätestens 2010 soll die 170 km entfernte Stadt Hangzhou mit Hochgeschwindigkeit erreichbar sein¹. In diesem Jahr findet nämlich die Weltausstellung Expo in Shanghai und auf einem Außengelände in Hangzhou statt.

2. Der Transrapid

2.1. Geschichte und Entwicklung

Dem Elektrotechniker Hermann Kemper (1892-1977), kam die Idee magnetische Kräfte zur Überwindung der Schwerkraft zu nutzen, um damit den Eisenbahnverkehr zu revolutionieren. Die Schwierigkeit, an der mehrere vor ihm gescheitert waren, wird deutlich, wenn man z.B. versucht ein Stück Eisen unter einem Magneten schweben zu lassen. Ohne technischen Aufwand ist es nicht möglich das instabile System zu regeln und erst Kemper gelang es ein über 200 kg schweres Stück Eisen mithilfe eines Elektromagneten in der Schwebelage zu halten. Er meldete mehrere Patente an, wobei die Grundidee einer Magnetschwebebahn von ihm 1934 patentiert wurde. Es handelte sich

¹ vgl. Transrapid aktuell Oktober 2004; Hrsg. Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, 17.10.2004

dabei um eine „Schwebebahn mit räderlosen Fahrzeugen, die an eisernen Fahrschienen mittels magnetischer Felder schwebend entlang geführt werden“². Seine Forschungsarbeiten konnte er jedoch während des 2. Weltkriegs nicht fortführen.

Mitte der 60´er wurde seine Idee von den Firmen MBB und Krauss Maffei aufgegriffen, die 1970 den Transrapid 01 bauten. Der Bau dieses Versuchsmodells, das heute im Deutschen Museum zu bewundern ist, wurde wesentlich durch die neue Halbleiterindustrie vereinfacht. Nachdem im selben Jahr die Hochleistungs-Schnellbahn-Studie vom Bund in Auftrag gegeben wurde, baute MBB 1971 das erste personentragende Magnetfahrzeug, welches sich heute ebenfalls im Museum in München befindet. In den darauffolgenden Jahren wurden verschiedene Technologien erprobt. So begann man 1972 auf einem Rundkurs in Erlangen ein System zu testen, das den Zug durch supraleitende Spulen vom Boden hob. Dieses Prinzip des EDS (Elektrodynamisches Schweben) wird heute noch beim japanischen Maglev Express eingesetzt. 1973 wurde der Transrapid 04 getestet. Wie seine Vorgänger, hob er sich durch geregelte Elektromagnete, die sich an eine über ihnen angebrachte Eisenschiene heranzogen, in die Höhe. Auch der neueste Transrapid 08 basiert auf dieser Technik, dem EMS (Elektromagnetisches Schweben).

Während der Internationalen Verkehrsausstellung 1979 in Hamburg, schwebten 50.000 Besucher mit dem Transrapid 05 zum Ausstellungsgelände. Angetrieben wurde die Bahn durch einen Langstator-Linearmotor, der im Gegensatz zum bisher verwendeten Kurzstator-Linearmotor, erst wenige Jahre zuvor entwickelt worden war. Da zu dieser Zeit nun zwei Schwebeprinzipien (EMS und EDS) und zwei Antriebsarten existierten, hatte man sich 1977 in einem Systementscheid auf die alleinige Weiterentwicklung des EMS auf Langstator-Linearmotor- Basis geeinigt.

1980 begann man dann mit dem Bau der Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE). Der 31,5 km lange Fahrweg mit zwei Wendeschleifen wurde in zwei Abschnitten gebaut und 1987 vollendet. Dort fanden mit dem neuen Transrapid 06 etliche Versuchsfahrten statt. Dieser Zug war als erster mit 192 Sitzplätzen sehr geräumig und war zudem für eine Geschwindigkeit von 400 km/h ausgelegt. 1988 wird auf der TVE mit dem anwendungsnahen Dauerbetrieb begonnen und noch im selben Jahr wird der Transrapid 07 vorgestellt.

Da die technische Einsatzreife nun gegeben war, begann man zwischen 1991 und 2000 mit der Suche nach geeigneten Strecken für eine kommerzielle Anwendung. Auch andere Länder wie die USA und die Niederlande zeigten Interesse an der deutschen Technik. In der Bundesrepublik plante man schließlich eine

² Dt. Museum München: Abteilung Transrapid, Infokasten Hermann Kemper, 12.08.2004

Städteverbindung Berlin-Hamburg. Nach vielen Untersuchungen und dem endgültigen Planfeststellungsverfahren im Jahr 2000, scheiterte das Projekt am Protest von Anwohnern und Umweltschützern und v.a. an der unklaren Finanzierung, die während der wirtschaftlich schwierigen Lage nicht gewährleistet war. Neue Hoffnung schöpfte man jedoch im selben Jahr beim Besuch des chinesischen Ministerpräsidenten auf der TVE. Nach einer Rundfahrt im Vorserienfahrzeug Transrapid 08 war die chinesische Delegation begeistert und kein halbes Jahr später wird die Umsetzung einer Verbindung zwischen Shanghai und dem Flughafen beschlossen. Schon 2003 nahm der Transrapid dann den planmäßigen Betrieb in Shanghai auf³.

2.2. Technik

2.2.1. Elektromagnetisches Trag- und Führsystem

Magnetische Felder waren ursprünglich nur von natürlich vorkommenden Ferriten und Eisenmagneten bekannt. Dass zwischen ihnen mitunter recht hohe Kräfte wirken, wird bei einem Zusammenbringen von zwei Magneten deutlich. Solche ferromagnetischen Permanentmagnete aus Eisen, Kobalt oder Nickel besitzen eine hohe relative Permeabilität ($\mu_r > 1$), d.h. dass sie die Magnetfeldlinien in sich „hineinziehen“ und somit das Feld verstärken. Sinnvoll angewandt werden konnten magnetische Kräfte jedoch erst, als herausgefunden wurde, dass auch bewegte Ladung ein Magnetfeld erzeugt. Mithilfe von elektrischen Leitern, die bestenfalls etliche Male um einen ferromagnetischen Kern gewickelt waren, konnte man von da an sogar die Stärke des Magnetfeldes, durch Änderung des Spulenstroms, anpassen. Dort setzt nun die Technik des EMS an.

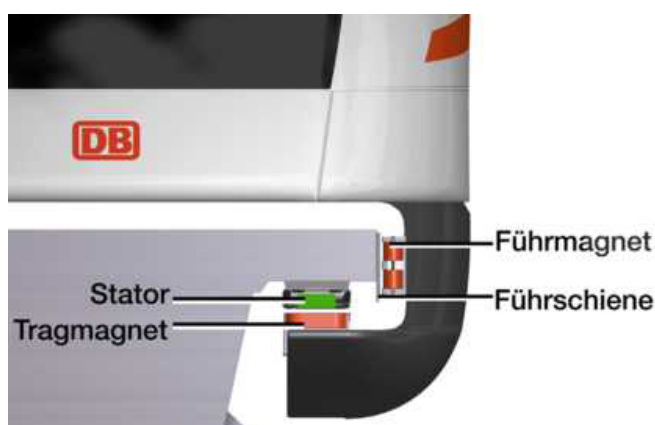


Abb. 1

Der Zug umgreift den Fahrweg und wird durch geregelte Tragmagnete, die unterhalb des Fahrzeugs angebracht sind, von unten an eine Eisenschiene, den Stator, herangezogen. Eine wichtige Rolle spielen dabei induktive Spaltsensoren, die ständig

³ vgl. Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, Chronologie, 05.12.2004

den Abstand zwischen dem Magnet und der Eisenschiene messen. Ist die Entfernung zu groß, so wird durch eine elektronische Regelung der Strom in der Spule erhöht und durch die sofort größer gewordene Anziehungskraft hebt sich der Zug wieder in die Höhe. Befindet sich der Magnet zu nahe an der Eisenschiene, wird der Strom abgeschaltet. Dieser Vorgang geschieht unmerklich mit einer Frequenz des Regelstromkreises von max. 100 kHz, die effektive Frequenz des Spulenstromes beträgt etwa 30 Hz⁴. Zwischen den Tragmagneten und dem Stator wird immer ein Luftspalt von 10 mm eingehalten und das Fahrzeug selber schwebt 15 cm über dem Fahrweg. Neben der Spaltregelung existiert noch eine Lageregelung, mit der z.B. Bautoleranzen des Fahrwegs ausgeglichen werden. Die Lage jedes Magnets wird damit einzeln geregelt und durch diese Bauweise wird gleichzeitig eine gegenseitige Beeinflussung der Magnete ausgeschlossen.

Die hohen Tragkräfte die das System entwickelt, machen es besonders effizient, was an dem Tragleistungsbedarf von etwa 0,8 kW/t deutlich wird. „Zum Schweben braucht der Transrapid [deshalb] nicht mehr Energie als seine Klimaanlage an Bord“⁵. Jeder Elektromagnet wird einzeln geregelt und im Falle eines Defektes übernehmen die funktionstüchtigen Magnete die Aufgabe des kaputten. Auch ein totaler Ausfall des Stromnetzes stellt keine Gefahr dar, denn der benötigte Strom stammt aus Akkumulatoren, welche die Energieversorgung an Bord sicherstellen. Der Transrapid kann in so einem Fall wegen seiner redundanten Stromversorgung, die er mit sich führt, eine Stunde schweben. Der Zug würde mit seiner Wirbelstrombremse auf etwa 10 km/h abgebremst werden und dann auf Kufen abgesetzt, bis zum Stillstand gleiten.

Um eine sichere Fahrt zu gewährleisten, muss der Zug auch seitlich geführt werden. Das Prinzip ist das gleiche wie beim EMS. An beiden Fahrzeugseiten sind Führungsmagnete angebracht, die sich an eiserne Schienen heranziehen können. Sensoren halten den Abstand bei 10 mm und führen den Transrapid sicher in seiner Spur, auch bei Seitenwind und in Kurven, wo zusätzliche horizontale Kräfte auftreten.

Die dargestellten Prinzipien lassen den Transrapid berührungslos und reibungsfrei in der Luft schweben. Beeindruckend wurde dies am 2. Juni 2004 von der TVE und dem TV-Senders Sat1 gezeigt. In der Sendung „Clever“ zogen acht Kinder den 160 t schweren Transrapid in 20 Sekunden 10 Meter weit!

⁴ vgl. Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, FAQ, 19.12.2004

⁵ Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, Technik, 19.12.2004

2.2.2. Antrieb

Das EMS ist nicht nur für das Schweben des Fahrzeugs verantwortlich, sondern gleichzeitig ein Teil des Motors. Seinen Antrieb erhält der Transrapid durch einen synchronen Langstator-Linearmotor. „Der Linearmotor kann als eine aufgeschnittene und in eine Ebene abgewickelte Drehstrommaschine verstanden werden. An Stelle des Drehfeldes wird durch den Ständer ein Wanderfeld erzeugt. Das Drehmoment wird zur Schubkraft.“⁶ Den Rotor bilden die Tragmagnete des Zuges.

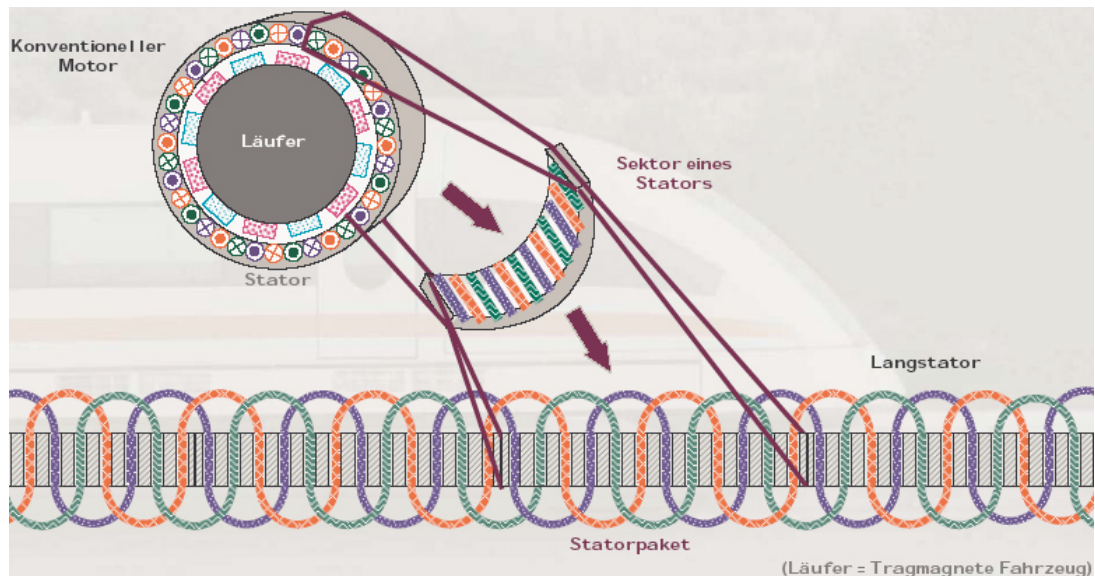


Abb. 2

Die Wicklungen im Stator sind kunststoffisolierte Aluminiumkabel, welche, bedingt durch die Ströme von bis zu 1500 A, einen Querschnitt von 300 mm² aufweisen. Am Ende eines Fahrwegabschnitts werden alle drei Phasen des Motors zusammengeführt und geerdet (Sternschaltung). Um die Wirbelstromverluste zu vermeiden, die normalerweise durch das sich ständig ändernde Magnetfeld der Tragmagnete im Stator entstehen, wird der Stator als etwa 1 m langes Blechpaket ausgeführt.

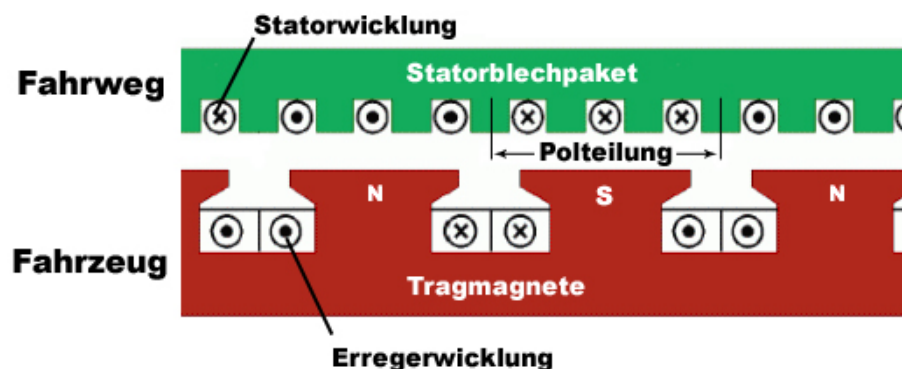


Abb.3

³ Filipović: Elektrische Bahnen, Springer-Verlag, S. 75

Abbildung 3 zeigt wie durch die abwechselnde Polung der Tragsmagnete und das alternierend verlegte Kabel im Stator der Vortrieb entsteht. Gemäß der Drei-Finger-Regel entsteht in der Abbildung eine Kraft nach links, denn am Nordpol zeigt die Richtung des Magnetfeldes nach oben und die Richtung des Stroms aus der Zeichenebene. Am Südpol treten die Magnetfeldlinien wieder in den Magneten ein, der Stromfluss hat aber eine andere Ausrichtung, weil ja das Kabel wechselseitig verlegt ist. Hat sich der Zug nun um die Polteilung τ_p , also die Länge die ein Magnet einnimmt, nach links bewegt, so kehrt sich die Kraft nicht um. Weil es sich bei dem eingespeisten Strom um Wechselstrom handelt weist der Stromfluss in diesem Moment eine andere Ausrichtung auf, die das Fahrzeug weiter vorantreibt. So wird auch deutlich, wieso es sich bei diesem Antriebssystem um einen Synchronmotor handelt: die Geschwindigkeit des Fahrzeugs hängt direkt von der Frequenz des Wanderfeldes ab. Da kein Schlupf, wie bei einem Asynchronmotor, auftritt, ist bei einem Synchronmotor die Geschwindigkeit V_{syn} (Drehzahl) direkt proportional zur Frequenz f des Wanderfeldes (Drehfeldes). τ_p entspricht der Polteilung, die beim Transrapid 26,6 cm beträgt. Der Zug bewegt sich in der Zeitspanne $\frac{1}{2 \cdot f}$ um diesen Wert. Die Fahrzeuggeschwindigkeit lässt sich somit folgendermaßen berechnen⁷:

$$V_F = V_{syn} = \pm 2 \cdot \tau_p \cdot f \cdot 3,6 = \pm 7,2 \cdot \tau_p \cdot f \quad [Km/h]$$

Um den Zug zu bremsen, wird die Richtung des Wanderfeldes umgekehrt, weswegen die Geschwindigkeit ein negatives Vorzeichen erhält. Die kinetische Energie des Zuges wird dabei über den Strom, der in den Statorwicklungen induziert wird, wieder ins Stromnetz zurückgespeist. Der Motor fungiert jetzt als Generator.

„Der Antrieb wird aus dem 110 kV Landesnetz über Unterwerke an der Strecke im Abstand von 30 bis 50 km mit variabler Spannung zwischen 0 und 10 kV bzw. 14 kV und variabler Frequenz zwischen 0 und 270 Hz gespeist.“⁸

Vorteilhaft ist beim Transrapid, dass der Motor nicht wie bei normalen Zügen im Fahrzeug mitgeführt wird, denn der Motor eines herkömmlichen Zuges muss immer so dimensioniert sein, dass er die steilste Stelle seiner Strecke bewältigen kann. Deshalb wird immer ein enormes Gewicht transportiert, welches die meiste Zeit nicht nötig ist. Beim Transrapid kann an steilen Stellen eine höhere Motorleistung installiert werden und ohne den „Ballast“ eines mitgeführten Motors kann er Steigungen bis 10%

⁷ vgl. Filipović: Elektrische Bahnen, Springer-Verlag, S. 75

⁸ Fiedler: Bahnwesen, Werner Verlag, S. 369

überwinden. Auch die Verzögerung ist darum höher als bei normalen Zügen, wird aber beim Transrapid auf S-Bahn-Niveau ($a \leq 1 \text{ m/s}^2$) herabgesetzt, um Anschlüssen unnötig zu machen. „Da sich der Antrieb im Fahrweg befindet und auf jede einzelne Sektion wirkt, beeinflussen weder Fahrzeuglänge noch das Gewicht [des Fahrzeugs] das Beschleunigungsvermögen.“⁹ So können Züge mit bis zu zehn Sektionen zusammengestellt werden. Die erreichbare Höchstgeschwindigkeit ist theoretisch nicht begrenzt, in der Praxis wird jedoch bei Geschwindigkeiten weit über 500 km/h der wirtschaftliche Aufwand zu groß.

Ein wichtiger und notwendiger Teil des Transrapids ist auch der Induktionsgenerator. Das sind zusätzliche Wicklungen in den Tragsmagneten, die durch Induktion berührungslos Energie aufnehmen können. „Zur elektromagnetischen Induktion nutzt der Lineargenerator Oberwellen im Antriebsmagnetfeld, die sich aufgrund der Nuten des Langstators, in welchem die Statorkabel eingelegt sind und der dadurch vom Fahrzeug aus gesehenen zeitlichen Veränderung in der magnetischen Leitfähigkeit der beteiligten magnetischen Kreise, ergeben.“¹⁰ Mit diesem Nebeneffekt des Antriebs, der ab etwa 100 km/h einsetzt, werden die Akkus an Bord des Fahrzeugs aufgeladen¹¹.

2.2.3. Fahrweg

Der Fahrweg hat beim Transrapid nicht nur die Funktion ihn dort anzutreiben, sondern auch auf seiner Spur zu führen. Es gibt mehrere Ausführungen des Fahrwegs. Er kann aus Stahl oder Stahlbeton sein und ebenerdig oder bis zu 20 m hoch aufgeständert verlaufen. Außerdem besteht die Möglichkeit den Fahrweg aus Stahlbeton und nur die äußeren Teile, an denen der Stator angebracht wird, aus Stahl zu fertigen. Durch diesen Hybridfahrweg werden die Vorteile beider Materialien vereinigt und eine extrem geringe Fertigungstoleranz erzielt. Die einzelnen Träger des Fahrwegs können bis zu 61 m lang sein.

In Kurven wird die Trasse oft überhöht gebaut, damit der Zug die Kurve mit einer höheren Geschwindigkeit durchfahren kann. Eine Überhöhung von 12 Grad ist üblich, 16 Grad sind in Ausnahmefällen möglich. Dabei ergibt sich wegen der Zentripetalkraft der Radius einer Kurve aus der Geschwindigkeit mit der sie durchfahren werden soll. Genaue Werte, sowie Eigenschaften weiterer Trassierungselemente, sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Der Spurwechsel wird über Stahlbiegeweichen vollzogen. Innerhalb von 30 Sekunden werden die Weichen über einen elektromechanischen Stellantrieb, elastisch gebogen.

⁹ Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, Technik, 19.12.2004

¹⁰ Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, FAQ, 19.12.2004

¹¹ vgl. Siemens, http://w4.siemens.de/Ful/de/archiv/zeitschrift/heft1_98/artikel06/, 26.01.2005

Sie sind entweder 78 m oder 148 m lang und können mit 100 km/h, oder bei der längeren Weiche mit 200 km/h durchfahren werden. Wird eine Weiche in Geradeausstellung überfahren, so gibt es keine Geschwindigkeitsbeschränkung.

Im Fahrweg integriert ist ein Ortungssystem, das die genaue Position des Zuges ermittelt. Über Sensoren im Fahrzeug werden bei jeder Fahrt Änderung des Fahrweges gemessen und bei Überschreitung der Toleranz wird die fehlerhafte Stelle erfasst und der Leitzentrale übermittelt, sodass der Fehler schnell behoben werden kann. Die Breite des Fahrwegs liegt mit 2,80 m vorteilhaft über der, der herkömmlichen Eisenbahn. Zur Datenübertragung nutzt der Transrapid eine Richtfunk-Verbindung. So werden Daten mit der Betriebszentrale ausgetauscht und z.B. Informationen zur Beschleunigung des Zuges übermittelt, denn der Motor muss ja extern gesteuert werden. Außerdem ist „die Kabelwicklung [...] in Schaltabschnitte unterteilt (typischer Wert 2 km) [und] es wird nur der Abschnitt aktiviert, in dem sich das Fahrzeug gerade befindet“¹².

Der Motor bietet auch einen zusätzlichen Sicherheitsaspekt. Da sich das Wanderfeld nur in eine Richtung bewegt, können Züge auf der selben Strecke weder zusammenstoßen, weil der eine Zug in die entgegengesetzte Richtung fährt, noch weil der eine den anderen einholen kann. Des weiteren umgreift der Transrapid bekanntlich den Fahrweg und kann somit nicht entgleisen, was bei Geschwindigkeiten von 500 km/h unabdingbar ist.

2.3. Wirtschaftlichkeit und Umwelt

Da das Fahrzeug zu keiner Zeit Kontakt mit dem Fahrweg hat, ist das System nahezu verschleißfrei. Die Instandhaltungskosten sind entsprechend geringer. Durch seine größere Breite von 3,70 m hat ein Zug den Widerstandsbeiwert von $c_w = 0,26$, was etwas mehr ist im Vergleich zu anderen modernen Hochgeschwindigkeitszügen. Die Luftreibung ist durch fehlende Roll- und Antriebsgeräusche die einzige Schallquelle. Bei Fahrten „mit 300 km/h ist der Transrapid daher etwa so laut wie eine S-Bahn mit 80 Km/h.“¹³ Allerdings werden bei Hochgeschwindigkeitsfahrten mit 400 km/h im Abstand von 25 m Schalldruckwerte von 89 dB erreicht.

Auch der Energieverbrauch liegt entgegen weitverbreiteter Meinung, nicht stark unter dem moderner schienengebundener Züge. Es sollen hier bewusst Zahlenwerte vermieden werden, da sich die Angaben je nach Untersuchung und Auftraggeber unterscheiden. Auf der Homepage der Herstellerfirmen Siemens und ThyssenKrupp

¹² Fiedler: Bahnwesen, Werner Verlag, S. 369

¹³ Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, Umwelt, 19.12.2004

transrapid.de z.B., verzichtet man auf einen Vergleich mit dem ICE 3, da dieser mit seiner neuen Technik deutlich unter dem Energieverbrauch der alten ICE Generationen liegt. Stattdessen werden die alten ICE 1 und ICE 2 Züge mit dem Transrapid verglichen, was einen Vorteil für den Transrapid ergibt. Der augenscheinlich recht hohe Energiebedarf des Transrapids liegt in der hohen Beschleunigung begründet, für die ein sehr großer Anfahrtsstrom benötigt wird, von dem ICE 3 jedoch nicht im Ansatz erreicht wird. Auch bei einer Geschwindigkeit von 400 km/h, die der ICE nicht erreicht, ist durch den hohen Luftwiderstand, der mit der Geschwindigkeit im Quadrat wächst, viel Energie nötig. Der Vergleich verschiedener Zahlen lässt den Schluss zu, dass der Transrapid im Geschwindigkeitsbereich bis 300 km/h z.B. mit dem ICE 3 etwa gleichauf liegt. Der spezifische Energieverbrauch pro Sitzplatz und km liegt aber immer noch deutlich unter dem von Flugzeug und Auto.

Es können nicht nur Personen, sondern auch Güter in speziellen Gütersektionen transportiert werden. Da die Nutzlast allerdings auf 17 t/Sektion begrenzt ist, können schwere Güter nicht transportiert werden.

Bei der Bewertung des Systems spielen gesundheitliche Fragen auch immer eine Rolle. Oft führen Gegner als Kritikpunkt eine hohe Strahlenbelastung durch Magnetfelder auf. Dabei ist das Magnetfeld im Fahrgastraum mit 100 μ T doppelt so stark wie das Erdmagnetfeld, was einem Bruchteil des Feldes eines Haarföns o.ä. entspricht.

Wichtig für die Realisierung eines Projekts sind auch die Kosten für den Fahrweg. Der Hersteller gibt für Fernverbindungen Kosten von 17 Mio. Euro/ Km Doppelfahrweg an. Zum Vergleich: in Shanghai werden die Kosten auf 28 Mio. Euro geschätzt. Bei herkömmlichen Hochgeschwindigkeitstrassen sieht es dagegen auch nicht anders aus und somit sind die Kosten in der Realität genauso hoch wie beispielsweise für eine neue ICE-Strecke. Deutliche Vorteile ergeben sich für den Transrapid in schwierigem Gelände, da durch die hohe Antriebsleistung größere Steigungen überwunden werden können und deshalb Tunnelbauten überflüssig werden. Der Flächenverbrauch ist auch niedriger wie bei herkömmlichen Trassen. Bei einer ICE Strecke werden 14 m²/m und bei einer ebenerdigen Transrapid-Trasse werden 12 m²/m benötigt. Bei einem aufgeständerten Fahrweg gehen nur 2 m²/m Land verloren, da die Flächen unterhalb der Trasse nutzbar bleiben¹⁴.

In Anbetracht der verschiedenen Eigenschaften muss vor dem Bau einer neuen Strecke abgewogen werden, welches Bahnsystem geeigneter ist. Z.B. im Nahverkehr

¹⁴ Transrapid International: <http://www.transrapid.de>, Umwelt, 19.12.2004

könnte durch die schnelle Beschleunigung Zeit gespart werden. Denn um eine Geschwindigkeit von 300 km/h zu erreichen benötigt der Transrapid eine Strecke von 5 km, der ICE 2 30 km. Seine Höchstgeschwindigkeit von 500 km/h erreicht er nach 256 Sekunden und 23 km Strecke. Es ist in der heutigen Zeit jedoch nicht immer eine so hohe Geschwindigkeit nötig, die natürlich, wie bei jedem Bahnsystem, zu Lasten des Aufwands geht.

3. Die Modelle

3.1. Magnetschwebebahn

3.1.1. Aufbau und Fahrweg

Das Modell des Transrapids sollte, was die Funktion anbelangt, so gut wie möglich dem Original entsprechen, was auch die erste Zielsetzung war: Der Bau einer Magnetschwebebahn, die sich durch geregelte Elektromagnete von unten an den Fahrweg heranzieht und stabil schwebt. Des Weiteren sollte die Möglichkeit bestehen, nachträglich am Fahrweg einen Linearmotor anzubringen, der den Zug antreibt. Wegen der zur Verfügung stehenden Maschinen kamen nur die Materialien Holz und Leichtmetall in Frage, was für eine stabile Konstruktion aber ausreichen sollte; lediglich beim Fahrweg musste prinzipbedingt dennoch eine eiserne Reaktionsschiene angebracht werden.

Zuerst wurde mit dem Bau des Fahrwegs begonnen. Abbildung 6 zeigt den Aufbau in der Frontansicht, wobei die Maße in mm angegeben sind. An das Aluminium-Vierkant-Rohr in der Mitte ist zu beiden Seiten ein Stahlprofil angebracht, an welchem sich die Magnete emporziehen sollen. Auf den beiden Stahlrohren befindet sich jeweils ein Aluminium-L-Profil, das mehrere Funktionen hat: einerseits dient es der seitlichen Führung des Fahrzeugs und andererseits gibt es die Schwebehöhe vor, dazu jedoch später mehr. Verschraubt wurden die einzelnen Teile mit Metallschrauben der Größen M4 und M5. Da die meisten Metallteile bereits eine Länge von 1 m hatten, sollte die Schiene ebenfalls dieses Maß besitzen.

Die Stützen des Fahrweges bestehen aus Holz (schraffierte Fläche in Abb. 6) und wurden zum Schutz lackiert. Es wurden zwei Stützen gebaut, die jeweils aus zwei Rundhölzern und einer MDF-Platte bestehen. Leider erwies sich die Verbindung von Füßen und Schiene mittels einer Holzschraube als zu schwach und deswegen wurden die Füße zusätzlich an eine Holzlatte geschraubt, welche wiederum mit der Schiene verbunden wurde.

Das Gefährt umgreift wie beim Original den Fahrweg, was recht gut in Abbildung 8 zu erkennen ist; es musste deswegen recht verwindungssteif gebaut werden. Nach

anfänglichen Überlegungen das Fahrzeug aus Aluminiumprofilen zu bauen, wurde es wie die Füße des Fahrwegs, aus MDF-Holz gebaut, weil das Aluminium nur durch Metallschrauben hätte verbunden werden können und so wahrscheinlich recht instabil geworden wäre. Das Fahrzeug selbst besteht aus einer Grundplatte mit Aussparungen zur Gewichtsreduktion. An den Seiten sind insgesamt vier Holzstücke angeschraubt, welche die Schiene mit den Magneten tragen (siehe Abb. 9).

Um die Ausmaße des Fahrzeugs zu ermitteln war es wichtig zu wissen, wie viel Kraft ein Elektromagnet entwickelt, was die Anzahl der Magnete und somit die Länge des Fahrzeugs bestimmt. Die Berechnungen der Spulen sind dem nächsten Gliederungspunkt zu entnehmen. Mit den angestellten Berechnungen und dem Testaufbau mehrerer Spulen stand fest, dass sich auf jeder Seite zehn Spulen befinden sollen, was mit dem Durchmesser und dem Abstand der Spulen eine Fahrzeuglänge von 30 cm ergibt. Montiert wurden die Spulen auf einem Aluminium-L-Profil, welches mit der gesamten Spulenreihe an das Fahrzeug geschraubt wurde. Weil Aluminium aber paramagnetisch ist ($\mu_r < 1$), wurden zusätzlich zwei Lagen eines Eisenbleches zugeschnitten und auf dem Profil befestigt, auf dem sich die Magnete befinden. Das ist wichtig, denn die Polung der Magnete ist wie beim Original abwechselnd, was ein spürbar stärkeres Magnetfeld ergibt, v.a. wenn die Spulen noch zusätzlich durch ein ferromagnetisches Material verbunden sind.

Sollte sich der Zug nicht in der Schwebeposition befinden, ist er auf vier I-förmigen Aluminiumprofilen, die sich über dem Fahrweg befinden, abgesetzt. Insgesamt wiegt das Fahrzeug stattliche 3,5 Kg, was durch die schweren Eisenkerne und den vielen Kupferdraht der Spulen, die Muttern zur Befestigung derselben und durch die massive Bauweise des Gefährts zustande kommt.

3.1.2. Schwebeprinzip und Elektronik

Es wurde schon von Anfang an von einem hohen Gewicht ausgegangen, was bei der Berechnung der Magnete berücksichtigt werden musste. Als Berechnungsgrundlage wurde ein maximales Gewicht von 6 kg angenommen. Vor dem Baubeginn des Zuges, war es wie schon erwähnt notwendig, die Tragkraft der Magnete zu berechnen.

Die Grundgleichung des magnetischen Feldes lautet $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$. Bei Spulen mit einem Kern, wird zusätzlich der materialabhängige Koeffizient μ_r zur Grundgleichung hinzumultipliziert. Da die Spulen um einen Eisenkern gewickelt wurden, beträgt die relative magnetische Permeabilität μ_r in diesem Fall höchstens 1000. Für die

magnetische Feldstärke H gilt bei endlich langen Spulen die Beziehung¹⁵:

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4R^2}{l^2}}}$$

Da das Magnetfeld einer kurzen Spule stark von dem einer „unendlich langen“ abweichen kann, muss man nun herausfinden, ab welcher Länge das Magnetfeld an den Enden der Spule stark genug gebündelt wird. Durch eine längere Spule wird das Streufeld verkleinert und die Magnetfeldlinien treten in einem größerem Winkel aus der Spule aus und reichen somit weiter in den Raum. Mit einem Zahlenbeispiel kann man anhand der gegebenen Funktion die Stärke von B sehr grob abschätzen:

$$\mu_r = 1000; \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}; N = n \cdot l = 5 \cdot l; I = 1 A; R = 1,0 \text{ cm}$$

$$\text{Es folgt: } B(l) = 1000 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{5 \cdot l \cdot 1 A}{l} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4 \cdot (0,010 \text{ m})^2}{l^2}}}$$

Zum Verständnis:

μ_r und μ_0 besitzen feste Werte. Da der ausgewählte Kupferlackdraht eine Strombelastbarkeit von 1 A aufweist ist $I = 1 A$. Die Spule sollte aufgrund der Befestigungsmöglichkeiten durch Muttern, eine Gewindestange M10 ($r = 0,5 \text{ cm}$) als Kern besitzen. Um die Abmessungen einer Spule in Grenzen zu halten, wurde ein Gesamtradius von $R = 1,0 \text{ cm}$ gewählt. Mit $R - r = 0,5 \text{ cm}$ ergibt sich der kupferdrahtgefüllte Bereich (rot) um den Kern (schraffiert) (siehe Abb. 4). Beim Wickeln der Spulen wird jener Bereich mit einer gewissen Anzahl von Drahtwindungen umschlungen. Betrachtet man den Bereich in der Ebene, so wird ersichtlich, dass sich die maximale

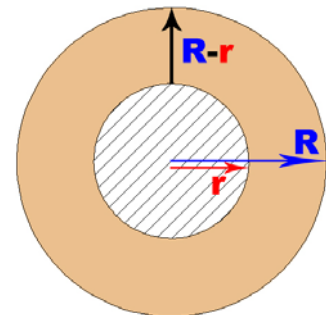


Abb. 4

$$\text{Windungsanzahl } n \text{ aus } n = \frac{R - r}{d} = \frac{0,5 \text{ cm}}{0,063 \text{ cm}} \approx 8 \quad (\text{d=}$$

Drahtdurchmesser) zusammensetzt. Es sind also 8 Windungen übereinander nötig, um den (roten) Bereich mit Kupferdraht auszufüllen. Da 8 Windungen auch bei optimalem Wickeln praktisch nicht erreicht werden, wird als realistischer Wert $n = 5$ angenommen. Bezogen auf die Gesamtlänge der Spule lässt sich nun die gesamte Wicklungsanzahl N aus der Spulenlänge l und der Windungsanzahl n mit $N = n \cdot l = 5 \cdot l$ berechnen.

¹⁵vgl. Müller, Leitner, Mráz: Physik Leistungskurs 1. Semester, Ehrenwirth Verlag, S. 141

Mit obiger Funktion $B(I)$ wird jetzt also die Stärke des Magnetfeldes in Abhängigkeit von dem Verhältnis von Spulenlänge und Radius beschrieben. Die Werte lassen sich am besten mit einem Computerprogramm berechnen, welches gleichzeitig den Graph aufzeichnet (Abb. 5).

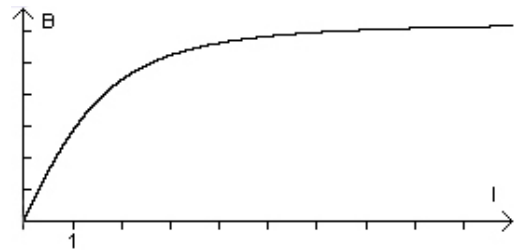


Abb. 5

Man erkennt zuerst einen nahezu linearen Bereich und bei höheren Werten für I , tritt eine Sättigung ein. Ab etwa zweifacher Spulenlänge ist eine verwertbare Feldstärke entstanden. Es wurde also angenommen, dass die Länge der Spulen mindestens das doppelte des Radius betragen sollte. Ausgeführt wurden die Spulen schließlich mit einer Länge von etwa 3 cm – dem dreifachen des Radius.

Da die Kraft des Magneten direkt von seiner Feldstärke abhängt, muss diese so groß wie möglich sein. Auch der Abstand δ der Magnete zur Eisenschiene spielt eine Rolle.

Zunächst muss das Durchflutungsgesetz betrachtet werden:

„Als elektrische Durchflutung einer Fläche bezeichnet man die Summe aller durch die Fläche tretenden Ströme [...]“¹⁶

Durch eine von bewegter Ladung durchflossene Fläche (\rightarrow Durchflutung Θ), wird also ein Magnetfeld hervorgerufen, welches wie folgt berechnet werden kann¹⁷:

$$\frac{B}{\mu_0} \cdot 2\delta = \Theta \quad \rightarrow \quad B = \frac{\Theta \cdot \mu_0}{2\delta}$$

Mit der Maxwellschen Normalkraft folgt: $F_y = \frac{B^2 \cdot A_m}{2 \cdot \mu_0} = \frac{\Theta^2 \cdot \mu_0 \cdot A_m}{8 \cdot \delta^2}$

Die Kraft nimmt also mit dem Abstand δ um den Faktor $\frac{1}{\delta^2}$ rasch ab; die Stirnfläche der Pole A_m ist direkt proportional zur Kraft und die Feldstärke beeinflusst die Kraft im Quadrat. Jedoch kann die Feldstärke nicht beliebig erhöht werden, da sonst der Spulenstrom zu hoch wird, der direkt proportional zur Feldstärke ist und auch eine Sättigung des Eisenkerns auftritt, welche das Magnetfeld nicht mehr stärker werden lässt.

¹⁶ Hammer: Taschenbuch der Physik, J. Lindauer Verlag München, S. 72

¹⁷ Canders: Elektromagnetisches Schweben, <http://www.iem.ing.tu-bs.de/download/EI-Fzg-u-Verk.zip>
 \rightarrow kap8b.pdf, 12.01.2005

Mit den bisher aufgezeigten Formeln wurde eine rechnerische Bestimmung des Magnetfeldes versucht. Da aber die Ergebnisse der resultierenden Tragkraft im Schwebeabstand 1 mm, mehrere Zehnerpotenzen über der Realität lagen, musste in mehreren Testaufbauten die tatsächliche Kraftentwicklung eines Magneten gemessen werden. Zu diesem Zweck wurden mehrere Spulen gewickelt. Drei der Spulen wurden in Serie geschaltet und abwechselnd gepolt auf eine Stahlschiene geschraubt. Bei einem Spulenstrom von 2,5 A konnten Metallstücke von über 8 kg gehalten werden; dies allerdings ohne Luftspalt. Mit einem Karton zwischen Magnet und Eisenteil, der den Schwebeabstand (mind. 1 mm) simulieren sollte, trat immerhin noch eine Kraft von etwa 12 N auf. Umgerechnet auf 20 Elektromagnete ergibt sich eine Kraft von etwa 80 N was für ein Gefährt mit $m = 6$ kg ausreichend sein müsste.

Um das Schwebeprinzip zu verdeutlichen, muss nun kurz auf den elektro-mechanischen Zusammenhang eingegangen werden. Voraussetzung ist, dass die Magnete elektronisch geregelt werden, damit sie abgeschaltet werden, wenn sie der Metallschiene zu nahe kommen und wieder angeschaltet werden, wenn der Zug durch die Schwerkraft nach unten fällt. Eine wichtige Rolle kommt deswegen der Sensorik zu. Sie erkennt in welcher Höhe sich der Zug gerade befindet und gibt das Regelsignal über eine Endstufe verstärkt an die Spulen weiter. Genau so lässt sich auch der Aufbau der Schaltung beschreiben.

Die Auswahl geeigneter Sensoren ist nun sehr begrenzt, denn es stehen entweder Hallsensoren oder Lichtschranken zur Verfügung; Feldplatten sind kaum zu beschaffen und außerdem zu langsam. Mit einem Hallsensor und einem Magnet könnte durch die Änderung des magnetischen Flusses ein lineares Regelsignal erzeugt werden, was aber einen hohen Schaltungsaufwand zur Auswertung der Signale bedeuten würde. Somit wurde eine Schaltungsvariante mit einer Infrarot-Lichtschranke in Angriff genommen.

Der Zug soll durch die Lichtschranke, die unterbrochen wird, wenn er zu niedrig und geschlossen wird, wenn er zu hoch ist, in der Schwebe gehalten werden. Hier wird jetzt auch die Funktion des L-Profiles auf beiden Seiten des Fahrwegs deutlich: mit der nach oben gerichteten Seite wird die Lichtschranke unterbrochen und somit die Soll-Position des Fahrzeugs bestimmt. Wichtig ist außerdem, dass eine Lichtschranke nicht ausreichen würde ein stabiles System zu erzeugen. Vielmehr sind vier Lichtschranken, an jeder Fahrzeugecke notwendig, um den Zug in allen Achsen stabil zu halten. Je fünf Spulen sind deswegen hintereinander montiert und in Reihe geschaltet. Jede der vier Spulenreihen ist mit einem eigenen Regelkreis verbunden.

Als Schaltung wurde ein Zweipunktregler gewählt (Abbildung 7). Wenn sich der Zug zu hoch befindet, fällt Licht von der IR-LED (LED1) auf den NPN-Fototransistor T1. Dieser wird leitend und nahezu die gesamte Spannung fällt am variablen Widerstand P2 ab, so dass das Gate des Leistungs-MOSFETs (N-Typ) auf Massepotential liegt und er deshalb sperrt. Es kann so kein Strom mehr durch die Spulen fließen und der Zug fällt wegen der Schwerkraft nach unten. Befindet sich der Zug zu tief, wird die Lichtschranke unterbrochen und es fällt die meiste Spannung am Fototransistor ab, da dieser ohne Lichtbestrahlung einen sehr hohen Widerstand besitzt. Am Gate des MOSFETs liegen nun 12 V an und er leitet, was einen Stromfluss in den Spulen bewirkt und somit den Zug wieder hebt. MOSFETs (Metall-Oxidschicht-Feldeffekt-Transistoren) werden nicht wie bei üblichen Transistoren durch einen Basisstrom gesteuert, sondern über eine Spannung. Der ganze Vorgang sollte jetzt mit einer sehr hohen Geschwindigkeit ablaufen, damit der Zug stabil schwebt. Die Hochspannungsdioden D1 ist in Sperrichtung geschaltet und schützt den Transistor von der durch die Spulen auftretende Hochspannung, in dem sie die Induktionsspannung, die beim Ein- und Ausschalten der Spule auftritt, kurzschließt. Beide Widerstände P1 und R1 dienen der Strombegrenzung in den Leuchtdioden.

Mit dem beschriebenen Aufbau wurde schließlich versucht das Fahrzeug in der Schwebelage zu halten, was leider nicht gelang. Wenn das Fahrzeug in Schwebelage gehalten wurde, ratterte es nur und nach einem kurzen Moment des Aufschaukelns war kein Schweben mehr möglich. Die nötige Tragkraft ist vorhanden, da auch im mit einem Karton simulierten Schwebelageabstand das Fahrzeug ohne Probleme gehoben werden kann. Allerdings fallen in diesem Fall Induktionseffekte in der Reaktionsschiene weg, weil das Magnetfeld konstant ist. Beim dynamischen System treten aufgrund des sich ändernden Magnetfeldes Wirbelströme in der Tragschiene auf, die das Fahrzeug abstoßen. Es wurden dennoch etliche Schaltungsvarianten mit verschiedenen Transistoren, Widerständen etc. ausprobiert, aber mit keiner konnte verhindert werden, dass sich das Fahrzeug aufschaukelte. Wie sich später herausstellte, lag es an der Phasenverschiebung, welche die Spule hervorruft. Der Stromfluss baut sich durch die Induktionsspannung nur langsam in der Spule auf und kann dann nicht verhindern, dass das System instabil wird.

3.2. Schwebende Kugel

3.2.1. Aufbau

Nachdem mit dem Gefährt schließlich kein Aussicht auf Erfolg mehr gesehen werden konnte, wurde nach einem einfacher zu realisierenderen Aufbau gesucht. Ein bekannter Versuch ist das Modell „Schwebende Kugel“, bei dem eine Metallkugel unterhalb eines Elektromagneten schwebt. Weil es genau der Funktionsweise des ersten Modells entspricht, aber auf wesentliche Komponenten beschränkt ist, sollte das Schwebeprinzip nun anhand dieses Modells verdeutlicht werden.

Zunächst diente die Praktikumanleitung der Uni Hannover¹⁸ als Vorlage. Der Aufbau wurde stabil und kostengünstig aus noch vorhandenem Holz aufgebaut. Auf einer Grundplatte ist ein Holzbogen montiert, der in der Mitte den Elektromagneten hält. Die Aufgabe der Positionsbestimmung trägt, wie beim ersten Modell, eine Lichtschranke, die zu beiden Seiten des Magnets angebracht ist. Die elektronische Schaltung wurde mehrmals auf Lochrasterplatinen aufgebaut, funktionierte jedoch nicht. Auch als später eine Platine aus der beigefügten Vorlage geätzt wurde, funktionierte die Schaltung trotz etlicher Überprüfungen nicht.

Da nun viel Zeit verstrichen war wurde eine anderer Schaltplan verwendet¹⁹, der auf Antrieb funktionierte. Bei dieser Schaltung wird als Sensor statt einer Solarzelle ein Fototransistor verwendet. Eine weitere Änderung wurde bei dem Holzbogen vorgenommen. So trägt jetzt nur noch eine Stütze den Magneten, an der sich zu beiden Seiten verstellbar, Fototransistor und IR-LED befinden (Abb. 10). Dies ist wichtig, da die Schwebhöhe durch den Abstand von Lichtschranke und Elektromagnet eingestellt werden muss. Dazu wurden auf eine Kupferplatte zwei Messingrohre gelötet, an deren Ende sich Transistor und LED befinden. Erkenntnisse, die bei der Berechnung der Spulen des ersten Modells gewonnen wurden, fanden auch wieder bei diesem Modell Verwendung. Der Radius der Spule beträgt etwa 1,7 cm und die Länge etwa 6 cm (die Spule ragt in das Holz hinein). Ihr Ohmscher Widerstand liegt bei ca. 4 Ohm. Die Funktionsweise ist analog zu der des ersten Modells. Der einzige Unterschied ist, dass der Strom eingeschaltet wird, wenn die Lichtschranke geschlossen ist, da der Fototransistor vom Schatten, den die Oberkante der Kugel wirft, geschaltet wird. Der einfachen Stromversorgung dienen zwei Bananenbuchsen, die mit der Schaltung verbunden sind.

¹⁸ vgl. Ruskowski: Die Schwebende Kugel;
http://www.mzh.uni-hannover.de/upload/pdf/Schwebende_Kugel.pdf, 23.10.2004

¹⁹ Niederberger: <http://n.ethz.ch/student/ndominik/kugel/schalp.gif>, 14.11.2004

3.2.2. Schweben und elektronische Regelung

Als Schwebekörper kommt eine Styroporkugel zum Einsatz (siehe Abb. 11), in die ein kleiner, sehr starker Neodymmagnet eingeklebt ist. Mit diesem wird der Schwebeabstand enorm vergrößert, da die Anziehungskraft des Magneten zusätzlich zu der des Elektromagneten hinzukommt.

Da die ursprüngliche Schaltung einige Nachteile aufwies, wurden Änderungen vorgenommen. Statt der IR-LED kam zuerst eine normale Glühbirne zum Einsatz, da diese einfacher zu handhaben ist. Die Widerstände R12-R23 in der Schaltung (siehe Abb. 12) setzen die Spannung von 12V auf 3,6V für die Lampe herab. Es hätte auch ein Hochlastwiderstand verwendet werden können, aber weil die Widerstände vorhanden waren, wurde ein kleines Widerstandsnetzwerk aufgebaut. Als der Aufbau nachträglich überarbeitet wurde, ist die Lampe wieder gegen eine IR-LED (LED2) ausgetauscht worden, da eine LED nur einen Bruchteil der Stromes einer Glühbirne benötigt und viel kleiner ist. Zudem ist das Infrarotlicht nicht sichtbar, was den Aufbau vielleicht etwas effektvoller erscheinen lässt. In der jetzigen Ausführung haben die Widerstände R12-R23 somit keine Funktion mehr und könnten durch eine Drahtbrücke ersetzt werden.

Außerdem wurde die Spannungsversorgung der Schaltung verändert. Der verwendete Schaltplan sah zur Versorgung der Operationsverstärker, die zwei verschiedene Potentiale für ihre Aufgabe benötigen, zwei Versorgungsspannungen vor (+15 V und –15 V). Da dies extrem umständlich ist und zwei Netzteile benötigt werden würden, wurde von mir einfach ein Spannungsteiler (R10 und R11) eingefügt. Das mittlere Potential liegt nun bei 6 V, das obere bei 12 V und das untere bei 0 V. Die Kondensatoren C2 und C3 glätten die Spannungen 12 V und 6 V. Als weiterer Zusatz wurde eine Kontroll-LED eingebaut (LED1), die anzeigt, ob der Elektromagnet an oder aus ist.

Den wesentlichen Teil der Schaltung stellt ein P-D-Regler dar, den der Operationsverstärker IC1 bildet. Der proportionale Anteil (P) verstärkt das Regelsignal um einen einstellbaren Faktor und der differentielle Teil (D) der Schaltung verhindert ein Aufschwingen des Schwebekörpers, indem die Ableitung des Regelsignals gemessen wird. Der proportionale Verstärkungsfaktor ist über die Widerstände R4-R6 gegeben. Den differentiellen Teil stellt der Kondensator C1 dar. Durch ihn wird mit IC1 die Änderungsgeschwindigkeit des Regelsignals gemessen und verstärkt. Mit dem Operationsverstärker IC2 wird das Regelsignal von IC1 um einen festen Faktor verstärkt an den Darlingtontransistor Q1 weitergegeben, der den Strom für den Elektromagneten L1 regelt. Ein Darlingtontransistor besteht eigentlich aus zwei

Transistoren, deren Stromverstärkungsfaktoren multipliziert werden, was eine sehr hohe Stromverstärkung ergibt. Wegen dem recht hohen Strom, der durch Q1 fließt, ist ein angemessener Kühlkörper nötig, damit der Transistor die Verlustleistung, die durch seinen Ohmschen Widerstand verursacht wird, in Form von Wärme gut an die Umgebung abgeben kann.

Da der Fototransistor T1 sehr empfindlich auf Helligkeitsänderungen reagiert, muss bei jeder größeren Änderung der Umgebungshelligkeit, die Empfindlichkeit der Schaltung über das Potentiometer P1 justiert werden. Obligatorisch ist die Hochspannungsdioden D1, die den Leistungstransistor (Q1) vor der Zerstörung bewahrt.

Das gesamte Schaltungslayout (Abb. 13) wurde selbst entworfen und geätzt. In der Tabelle 2 sind alle nötigen Bauteile aufgelistet. Die fertige Schaltung im Betrieb ist in Abb. 14 dargestellt.

3.3. Probleme und Verbesserungsvorschläge

Beim Bau beider Modelle zeigten sich teilweise gravierende Schwierigkeiten. So war bereits die Konstruktion der Spulen beim ersten Modell fehlerhaft. Die Dicke des Kupferlackdrahts schien am Anfang passend, da der Draht für einen Strom von etwa 1 A ausgelegt ist und mit dem höheren Strom im Vergleich zu einem dünneren Draht, ein stärkeres Magnetfeld erzeugt werden kann. Allerdings wird durch den vielen Kupferlackdraht, der um die schwere Gewindestange gewickelt ist, ein hohes Gewicht erzeugt. Da jede der vier Spulenreihen einen Strombedarf von etwa 2,5 A hat, ergibt sich rechnerisch ergibt bei 12 V, eine maximale Verlustleistung von 120 W. Das Gefährt hat also einen Tragleistungsbedarf von exorbitanten 26 kW/t im Vergleich zum Transrapid mit 0,8 kW/t. Durch die hohen Ströme werden die Spulen aufgeheizt, was dem Draht nicht viel ausmachen sollte, obwohl er weit über den Spezifikationen betrieben wird, weil er bis 150 °C temperaturbeständig ist. Abhilfe hätte die Verwendung eines wesentlich dünneren Drahtes gebracht, was aber die Induktivität der Spulen sehr erhöht hätte. Der Wechselstromwiderstand wäre stark gestiegen:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot A \cdot \frac{N^2}{l}$$

In der fälschlichen Annahme, dass ein höherer Wechselstromwiderstand die Krafteigenschaften der Magnete wegen des durch X_L geringeren Stromflusses enorm verschlechtert, wurden die Spulen mit weniger Windungen für einen höheren Strom konzipiert. Da dies aber ohne Auswirkungen bleibt, weil nur das Produkt aus Windungszahl mal Strom das Magnetfeld beeinflusst, wäre ein dünnerer Draht mit mehr Wicklungen um die Spule sinnvoller gewesen.

Dennoch war das größte Problem die Schaltung selbst, denn mit der richtigen Wahl der Schaltung wäre es sicherlich möglich gewesen das Modell zum Schweben zu bringen, weil die nötige Tragkraft vorhanden ist. Dass ein Zweipunktregler für diese Anwendung nicht zu gebrauchen ist, wurde erst zu spät bemerkt. Er kennt, in Verbindung mit der Lichtschranke, nur die Zustände ein und aus. Mit der erwähnten Phasenverschiebung der Spulen ist es aber so in keinem Fall möglich einen Schwebezustand zu erreichen. Mit einem P-D-Regler, wäre der Schaltungsaufwand jedoch so enorm geworden, dass es den Rahmen gesprengt hätte, denn die Schaltung hätte nicht einmal, wie bei dem zweiten Modell aufgebaut werden müssen, sondern viermal.

Da sich mit dem kleinen Maßstab sämtliche Größen verringert hatten, z.B. der angestrebte Schwebenabstand sollte 1 mm betragen, waren die Möglichkeiten sehr begrenzt. An die Genauigkeit wurden hohe Anforderungen gestellt, was aber ohne spezielle Maschinen teilweise nicht umgesetzt werden konnte. Auch durch die Verwendung anderer Sensoren, wären u.U. bessere Einstellungsmöglichkeiten gegeben gewesen. Denn die Lichtschranke besitzt keinen linearen Messbereich, was genaue Einstellungen sehr schwierig macht. Ein induktiver Spaltmesser, in Form eines Schwingkreises, hätte eventuell bessere Signale geliefert, wäre aber kaum selbst herzustellen oder zu kaufen gewesen.

Das zweite Modell war insgesamt überschaubarer, aber auch hier ergaben sich Probleme. Die zuerst verwendete Schaltung funktionierte unverständlicherweise nicht, aber mit der zweiten gelang es schließlich dennoch die Kugel zum Schweben zu bringen. Die Befestigung der Lichtschranke gestaltete sich schwierig, da sie stabil und möglichst unscheinbar sein sollte. Dies konnte aber durch die Verwendung von Metallblechen und -Rohren erreicht werden. Außerdem wäre eine weitere Möglichkeit der Verbesserung die Vergrößerung des Elektromagnet gewesen. Um einen sichtbar größeren Schwebenabstand zu erhalten, hätte der Magnet aber wesentlich größer werden müssen. Bei dem jetzigen Schwebenabstand von ca. 3 cm hätte sich dies nicht gelohnt. Der einzige Nachteil der Schaltung selbst, ist die Empfindlichkeit des Fototransistors bei verschiedenen Helligkeiten. Somit muss bei jeder Helligkeitsänderung die Empfindlichkeit der Schaltung über das Potentiometer angepasst werden. Insgesamt funktioniert die Schaltung aber zuverlässig.

4. Zukunftsperspektiven

Da der Transrapid in Shanghai problemlos seinen Betrieb aufgenommen hat, wird voraussichtlich eine weitere Strecke gebaut. Die Chinesen wollen aber einen noch größeren Technologietransfer durchsetzen, weil durch Produktionen im eigenen Land sämtliche Kosten verringert werden könnten. In Deutschland dagegen scheint eine baldige Realisierung einer Transrapidverbindung nicht möglich. Das Metrorapidprojekt, welches die Städte Düsseldorf und Dortmund über mehrere Zwischenhalte in weiteren Städten verbinden sollte, ist gescheitert. Zu hohe Kosten und ein für viele Menschen fragwürdiger Nutzen verhinderten die Realisierung. Eine weitere Streckenvariante ist der Flughafenzubringer in München. Am 20. Dezember 2004 hat der Freistaat Bayern seinen Teil der Vorbereitungsgesellschaft an die Deutsche Bahn übertragen, was laut offizieller Seite keinen Ausstieg des Freistaates aus dem Projekt bedeutet. Es wird nun abzuwarten zu sein, welchen Schluss das Planfeststellungsverfahren bringt, welches im Februar 2005 aufgenommen wird. Die Kosten würden bei dem Projekt bei rund 1,6 Mrd. Euro liegen, wobei die Finanzierung bei den heutigen Haushalten wohl das größte Problem darstellen wird. Dennoch wäre eine Vorzeigestrecke der deutschen Technologie im eigenen Land nach so langer Zeit wünschenswert und könnte auch vielleicht anderen Ländern einen Impuls für weitere Projekte geben.

5. Quellenverzeichnis

Texte:

- Canders**, Wolf-Rüdiger (2003): Elektromagnetisches Schweben (EMS), <http://www.iem.ing.tu-bs.de/download/EI-Fzg-u-Verk.zip> -> kap8b.pdf, 12.01.2005
- Dt. Museum München** (o.J.): Abteilung Transrapid, Infokasten Hermann Kemper
- Fiedler**, Joachim (⁴1999): Bahnwesen; Planung, Bau und Betrieb von Eisenbahnen, S-, U-, Stadt- und Straßenbahnen, Werner Verlag
- Filipović**, Žarko (²1992): Elektrische Bahnen; Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung; Springer-Verlag; S. 75
- Hammer**, Dr. Anton/ Dr. Karl (⁵1978): Taschenbuch der Physik für Schüler und Studierende; Alle wichtigen Definitionen und Formeln mit kurzen Ableitungen und Tabellenteil; J. Lindauer Verlag München
- Müller, Leitner, Mráz** (¹1991): Physik Leistungskurs 1. Semester, Elektrische und magnetische Felder, Ehrenwirth Verlag
- Niederberger**, Dominik (1998): <http://n.ethz.ch/student/ndominik/kugel/schalp.gif> 14.11.2004
- Ruskowski**, Dipl.-Ing. Martin (2002): Die Schwebende Kugel; http://www.mzh.uni-hannover.de/upload/pdf/Schwebende_Kugel.pdf 23.10.2004
- Siemens** (1998): Auf Magnetfeldern ueber die Schienen schweben, http://w4.siemens.de/Ful/de/archiv/zeitschrift/heft1_98/artikel06/, 26.01.2005
- Transrapid International** (o.J.): Magnetschwebebahn Transrapid <http://www.transrapid.de/> 19.12.2004

Abbildungen:

- Titelbild:** http://www.transrapid.de/foto_galerie/images/fahrzeuge/tr08_bug.jpg, 11.12.2004
- Abb. 1:** <http://www.transrapid.de/pics/tech/te1006.jpg>, 28.11.2004
- Abb. 2:** E-Mail von info@transrapid.de, Dateianhang Antrieb.pdf, Seite 2, 01.12.2004
- Abb. 3:** Vorlage: http://www.magnetbahnen.de/linearmotor/bilder/ems_pms.gif, 10.01.2005
- Abb. 4 - Abb. 14:** Eigenentwürfe/ -Fotografien

6. Anhang

Elemente	für Geschwindigkeiten		
	300 km/h	400 km/h	500 km/h
max. Überhöhung	12°	12°	12°
in Sonderfällen	16°	16°	16°
Minimaler Radius bei 12° Überhöhung	1920 m	3410 m	5330 m
max. Steigung	10%	10%	10%
Tunnelquerschnitt- einspurig	39 m ²	70 m ²	-
Tunnelquerschnitt- doppelspurig	78 m ²	-	-

Tabelle 1: Geschwindigkeitsabhängige Trassierungselemente

(Vgl. Fiedler, *Bahnwesen*, Werner Verlag 1999, S. 371)

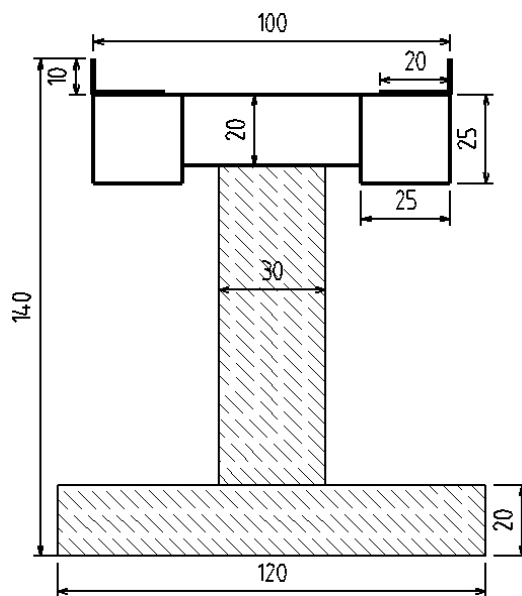


Abb. 6: Frontansicht Fahrweg
(Erstellt mit QCad)

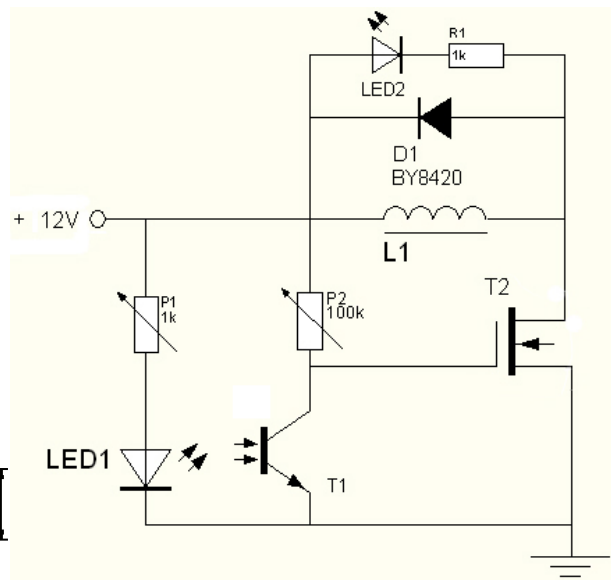


Abb. 7: Schaltplan Schwebebahn
(Erstellt mit SPlan 5.0)



Abb. 8: Fahrweg mit Magnetbahn

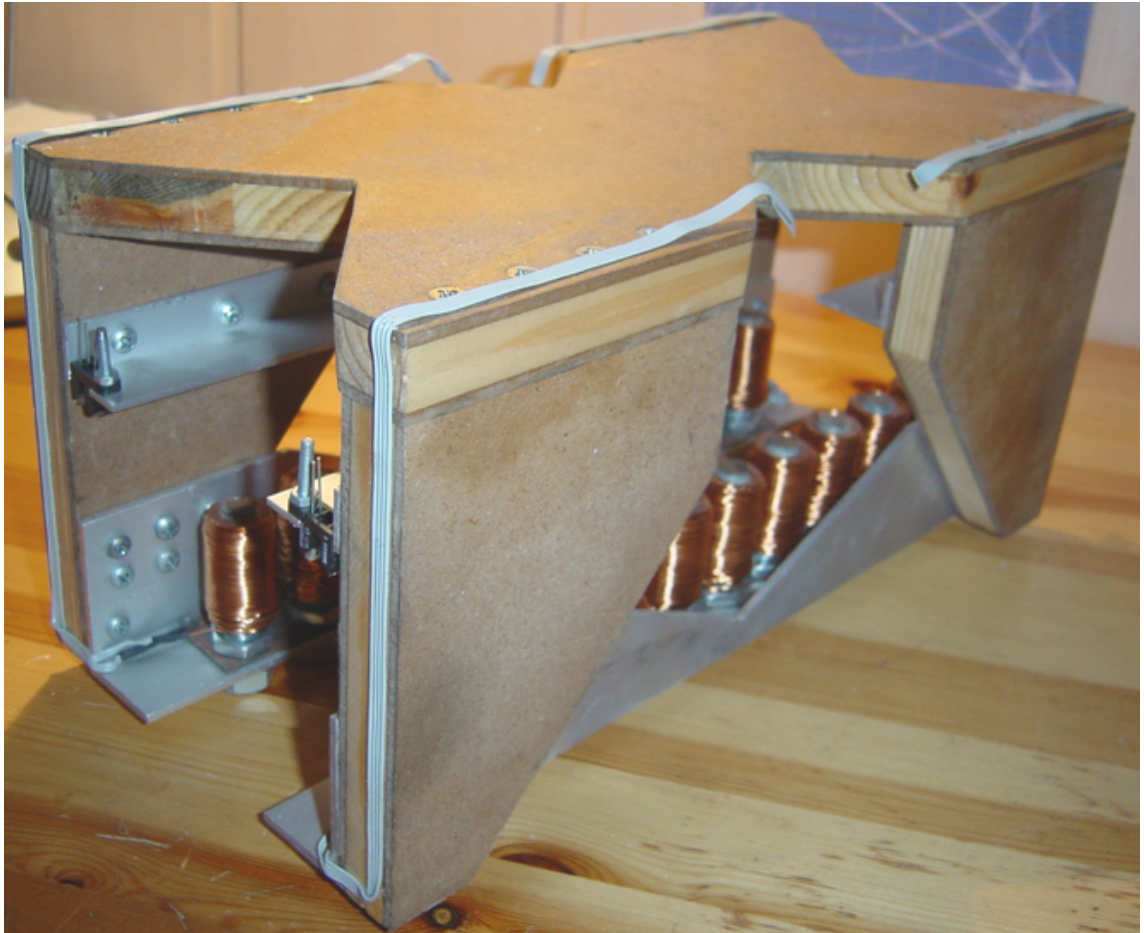


Abb. 9: Magnetschwebefahrzeug

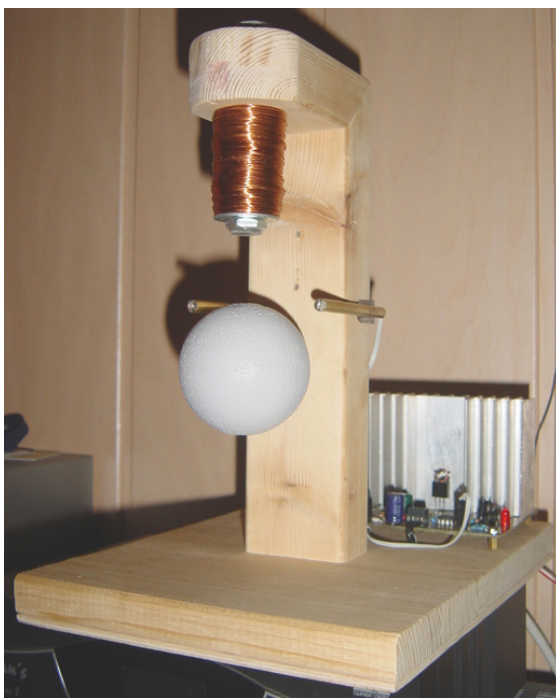


Abb. 10: Schwebende Kugel
(Gesamtaufbau)



Abb. 11: Schwebende Kugel
(Detailansicht)

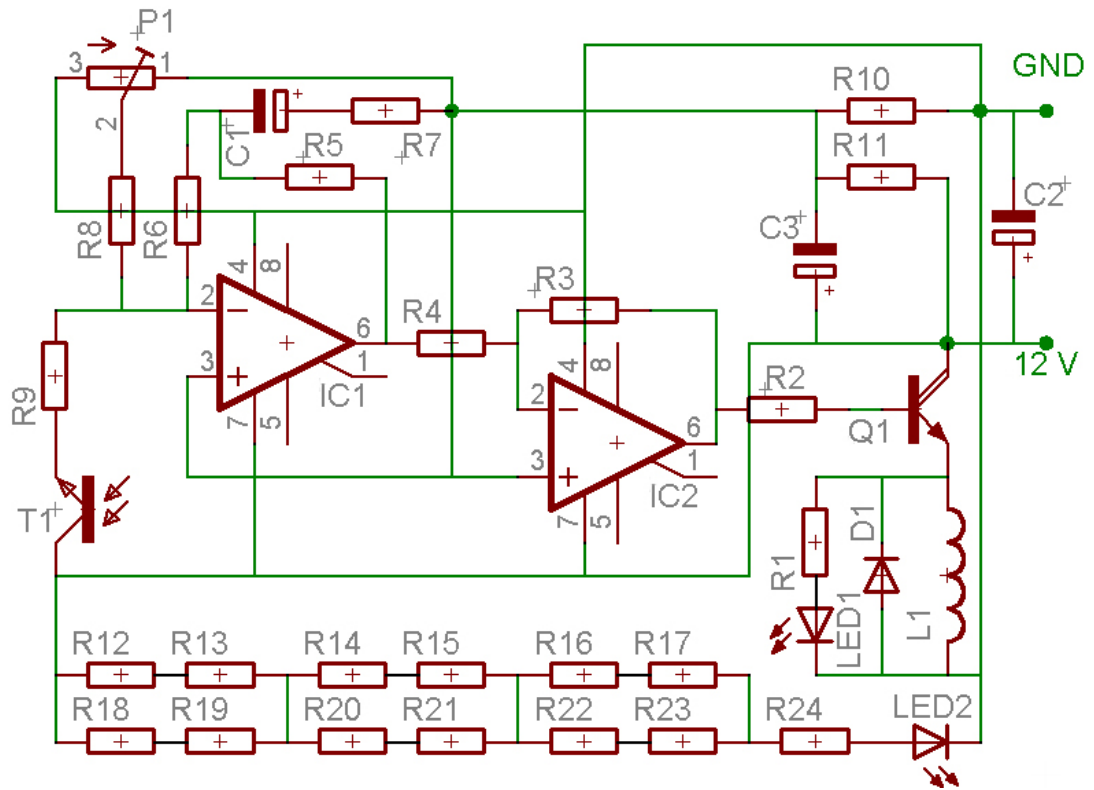


Abb. 12: Schaltplan Schwebende Kugel
(Erstellt mit EAGLE Layout Editor)

Bezeichnung	Wert
C1	47µ
C2	1000µ
C3	470µ
D1	BY8420
L1	Elektromagnet, R~ 4 Ohm
LED1	LED 5mm rot
LED2	IR LED
IC1,IC2	µA 741
P1	2k5
R1,R2	1k
R3	500k
R4	10k
R5,R8	50k
R6	100k
R9	5k
R7	2k
R11,R10	1k3
R12-R23	10
R24	650
Q1	BD647
T1	Fototransistor

Tabelle 2: Stückliste für den Schaltplan Schwebende Kugel

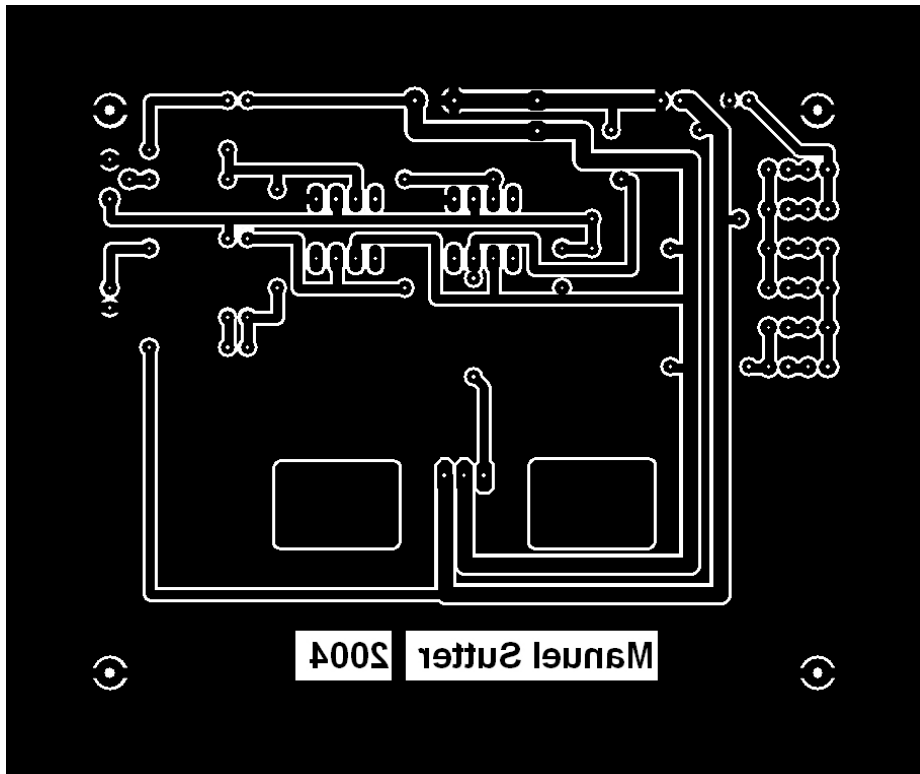


Abb. 13: Platinenlayout Schwebende Kugel (spiegelverkehrt)
 (Erstellt mit Layout 3.0)

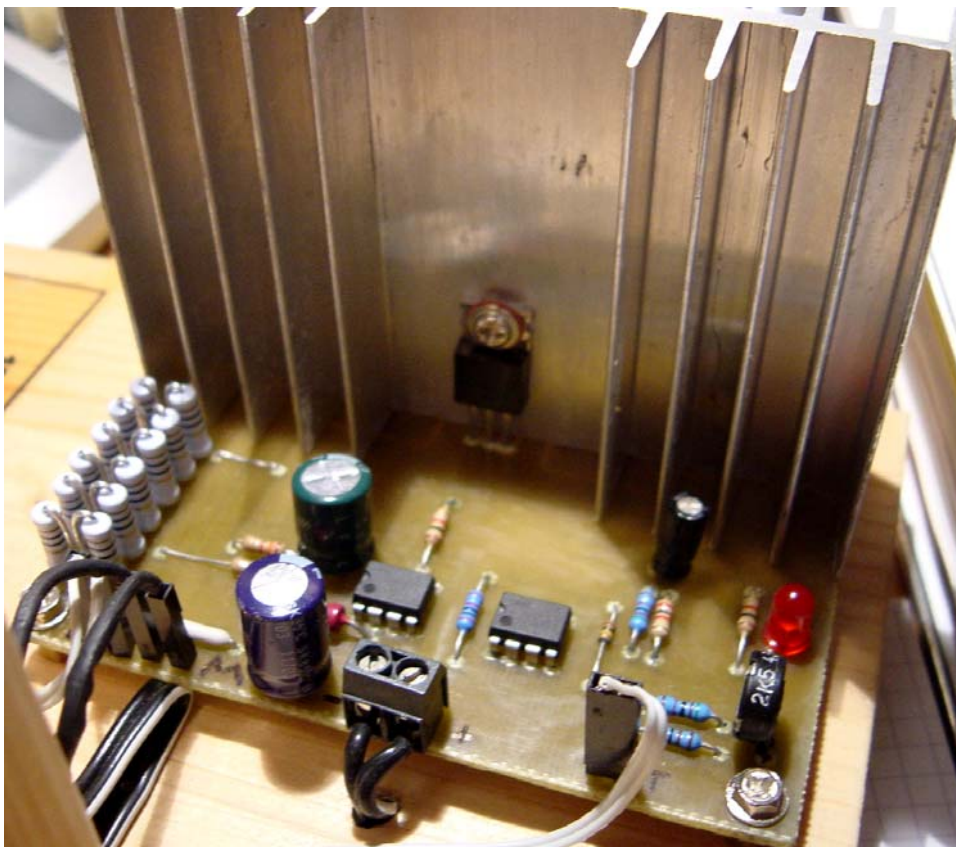


Abb. 14: Schaltungsaufbau Schwebende Kugel

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literatur- und Quellenverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift