

Facharbeit im Leistungskurs: „Physik“

Thema: Theoretische Grundlagen des Linearmotors und Aufbau eines
funktionsfähigen Modells

Vorgelegt von:
Patrick Rosyk

am:
2. Februar 2004

Note/Punktzahl der einfachen Wertung:

bei Kursleiter:
Herr Orthuber

..... /

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung: Entwicklung des Linearmotors.....	3
2. Hauptteil: <u>2.1 Theoretische Grundlagen des Linearmotors</u>	
2.1.1Der Drehstrom	
2.1.1.1 Erzeugung von Drehstrom.....	5
2.1.1.2 Verkettung der drei Phasen.....	6
2.1.2 Aufbau und Wirkungsweise von Drehstrommaschinen.....	7
2.1.3 Aufbau und Funktionsweise von Linearmotoren.....	9
<u>2.2. Einsatz von Linearmotoren</u>	
2.2.1 Allgemeiner Einsatz von Linearmotoren.....	11
2.2.2 Einsatz des Linearmotors am Beispiel des Transrapid	
2.2.2.1 Technik des Transrapid.....	12
2.2.2.2 Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE).....	15
<u>2.3. Modell des Linearmotors</u>	
2.3.1 Bau eines Drehstromgenerators.....	16
2.3.2 Aufbau eines Linearmotors in der Schule.....	17
2.3.3 Bau eines Linearmotors.....	18
3. Schluss: Der Linearmotor.....	21

1. Entwicklung des Linearmotors



Abbildung 1

Der Ursprung der Linearmotoren begann im Jahre 1851, als der Amerikaner G. Page erstmals das Grundprinzip der geradlinigen Bewegung einer elektrischen Maschine angewandt und patentiert hat. Damit sind lineare elektrische Motorvarianten genauso alt wie die rotierenden Maschinen, jedoch haben sie sich wegen des offenen elektromagnetischen Systems und der damit verbundenen Sonderanfertigung für alle linearen Antriebe, nicht so weit entwickelt.

Als aber 1922 der Ingenieur Hermann Kemper eine elektromagnetische Schwebebahn nach dem Prinzip der elektroinduktiven Abstoßung nach Thomson baute, stieg das Interesse an der Schwebebahn und somit auch am Linearmotor sehr stark an. Ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte sich die einfache Schwebebahn zu einem leistungsfähigen Beförderungsmittel, dem Transrapid. Die hohe Fahrtgeschwindigkeit von fast 500 km/h, der sehr geringe Verschleiß, die sichere und komfortable Fortbewegung und die große Zuverlässigkeit sind nur einige Beispiele für die große Überlegenheit des Transrapiids gegenüber vielen anderen Fortbewegungsmitteln.

Am Anfang des Jahres 2004 wurde in China eine 30 km lange Transrapid Strecke von Shanghai bis zum Flughafen Pudong-International in Betrieb genommen. Damit wurde diese Schwebebahn zum weltweit schnellsten kommerziell betriebenen Bahnsystem. Durch den großen Erfolg in China, stieg das Interesse an der neuen Technologie. Im Jahre 2009 soll voraussichtlich in München ein Transrapid den Hauptbahnhof und den Flughafen „Franz Josef Strauß“ verbinden.

Da mit der Zeit das Interesse und der Einsatzbereich von Linearmotoren immer größer wird, sollte man sich näher mit dieser „neuen“ Technologie befassen.

In dieser Facharbeit werde ich die theoretischen Grundlagen des Linearmotors erläutern, den Einsatz der linearen Antriebe besprechen und mein Modell des Linearmotors vorstellen.

2.1.1.1 Erzeugung von Drehstrom

Für den Betrieb der Linearmotoren wird in erster Linie eine spezielle Stromart benötigt. Im Gegensatz zu den herkömmlichen elektrischen Motoren, die entweder mit Gleichstrom oder Wechselstrom betrieben werden, benötigen lineare Maschinen einen Drehstrom, der mit einem Drehstromgenerator erzeugt wird (Abb.2). Dieser Generator besteht aus einem Ständer (Stator) und einem Läufer (Rotor). Der kreisförmige Stator besitzt drei um 120° versetzte Anker, die jeweils eine spezielle Drahtwicklung ($U_1, U_2; V_1, V_2; W_1, W_2$) besitzen. Der Rotor, der ein starkes Magnetfeld erzeugt, besteht entweder aus einem Dauermagneten oder aus einem mit Gleichstrom betriebenen Elektromagneten. Versetzt man den Rotor mittels mechanischer Energie in Bewegung, so bewegt sich bei jeder vollen Bewegung des Läufers der Nord – und Südpol des Magneten einmal an jeder der drei Ankerwicklungen vorbei. Infolge der magnetischen Flussdichteänderung an den Ankerwicklungen, die durch die Vorbeibewegung der Magnetpole hervorgerufen wird, wird Spannung in die Spulen induziert. Wegen der abwechselnden Vorbeibewegung des Nord – und Südpols, wird abwechselnd eine positive und eine negative Spannung induziert. Somit fließt Wechselstrom in jeder der drei Spulen. Infolge der räumlichen Verschiebung der drei Anker, wird jedoch die Wechselspannung nacheinander in jede der drei Spulen induziert. Somit bilden sich drei gleich große Stromimpulse bzw. drei gleiche Sinuskurven der Wechselspannung, die aber genau wie die Anker um 120° bzw. $2\pi/3$ verschoben sind (Abb.3). Das Polrad erzeugt bei 90° in der Spule $U_1 - U_2$ (L_1) den Höchstwert von Spannung und Strom. Erst nach $1/3$ Drehung erreichen Spannung und Strom in Spule $V_1 - V_2$ (L_2) den Höchstwert. Nach weiteren 120° haben Spannung und Strom in Spule $W_1 - W_2$ (L_3) den Höchstwert. Da die Spulen immer nacheinander ihre Stromhöchstwerte

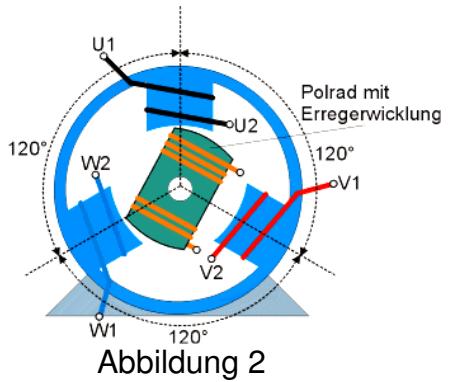


Abbildung 2

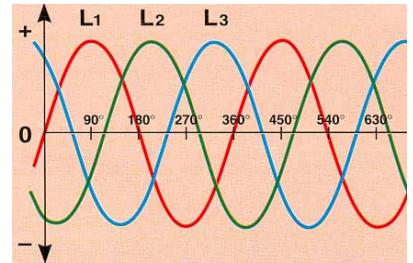


Abbildung 3

kommen, stellen sich diese für den Stator als Drehströme dar, die sich mit einer bestimmten Frequenz drehen. Es bildet sich der sogenannte Drehstrom. Unter der Voraussetzung, dass die drei Induktionsspulen gleiche Windungszahlen und die Verbraucher der Spulen gleiche Wirkwiderstände haben, fließen in den drei Stromkreisen drei Wechselströme gleicher Stärke und gleicher Frequenz. Diese Strangströme sind mit ihren dazugehörigen Spannungen phasengleich.

2.1.1.2 Verkettung der drei Phasen

Nachdem man den Drehstrom erzeugt hat, möchte man ihn normalerweise an einen Verbraucher anschließen. Da aber der Drehstromgenerator drei Stränge besitzt, könnte er eigentlich drei Einphasensysteme bzw. drei Wechselstromverbraucher speisen. Zur Fortleitung der elektrischen Energie wären dann sechs Leitungen notwendig. Solche voneinander unabhängigen Phasensysteme werden aber in der Praxis nicht verwendet, da sie einen hohen Aufwand an Leitungsmaterial haben und somit unwirtschaftlich sind. Zur Verringerung der Leiterzahl besteht aber die Möglichkeit die drei Induktionsspulen des Generators zusammenschließen. Das Phasendiagramm (Abb.3) zeigt, dass in jedem beliebigen Zeitpunkt die Summe der Augenblickswerte der Spannungen in den drei Stromkreisen den Wert Null hat. Bei einem Drehwinkel von 90° erreicht die Spannung in Spule L1 ihren positiven Scheitelwert. Im gleichen Zeitpunkt sind die Spannungen in den Spulen L2 und L3 negativ und gleich der Hälfte des Scheitelwertes. Weil die Summe der Spannungen in jedem Augenblick Null ist, kann man die drei Induktionsspulen zusammenschließen (verketten), ohne dass ein Kurzschluss entsteht. Für diese Verkettung gibt es zwei Grundschaltungen, die man als Dreiecks- oder Sternschaltung bezeichnet.

Bei der Dreiecksschaltung (Abb.4) wird jeweils ein Spulenanfang mit dem Spulenende einer anderen Spule verbunden. An die so entstanden drei Anschlusspunkte werden die drei Außenleiter L1, L2 und L3 angeschlossen. Bei der Dreieckschaltung

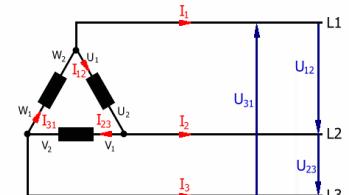


Abbildung 4

sind die Außenleiterspannungen so groß wie die Strangspannungen, die Außenleiterströme sind aber um den Wert „Wurzel 3“ höher als die Strangströme.

Bei der Sternschaltung (Abb.5) wird aber von jeder Spule jeweils ein Spulenanschluss mit dem Anschluss einer anderen Spule verbunden (Anschluss: $U_2+V_2+W_2$). Dadurch entsteht ein Knotenpunkt, der auch als Sternpunkt oder Mittelpunkt bezeichnet wird. In diesem Knotenpunkt wird der Neutralleiter N angeschlossen. An die drei anderen Spulenanschlüsse U_1 , V_1 , W_1 werden die Außenleiter L_1 , L_2 und L_3 angeschlossen. Obwohl man eine gleichmäßige Belastung der drei Stromkreise anstrebt, ist diese Forderung in der Praxis nur näherungsweise erfüllt. Deshalb wird im normalen Dreiphasennetz der Nulleiter miteinbezogen, der meist geerdet ist. Bei ungleichmäßiger Belastung der drei Stromkreise fließt im Nulleiter nur ein Ausgleichstrom, der wesentlich niedriger als die Außenleiterströme ist.

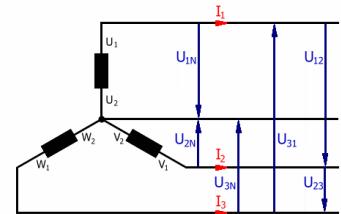


Abbildung 5

Bei der Sternschaltung sind die Außenleiterströme genau so groß wie die Strangströme aber die Außenleiterspannungen sind um den Faktor „Wurzel 3“ größer als die Strangspannungen. Da man mit der Sternschaltung Über- und Unterspannung an den Verbrauchern im Drehstromsystem verhindert, wird diese Grundschatzung viel öfter eingesetzt.

2.1.2 Aufbau und Wirkungsweise von Drehstrommaschinen

Damit man den Aufbau und die Wirkungsweise eines Linearmotors verstehen kann, sollte man die Grundlagen über die Funktionalität von Drehstrommaschinen kennen. Drehstrommotoren unterscheidet man vor allem in synchrone und in asynchrone Motoren. Abbildung sechs zeigt in vereinfachter Form den Aufbau und die Abwicklung einer Drehstromasynchronmaschine. Der Ständer besteht aus einem Ständerblechpaket, dass in einem gegossenen Ständergehäuse befestigt ist. Zur Reduzierung der Wirbelströme ist das Ständerblechpaket aus

gegeneinander isolierten Dynamoblechen aufgebaut. Der Ständer, auch Stator genannt, trägt eine zweipolige Einschichtwicklung, die in 24 Nuten eingelegt ist. In realen Maschinen ist natürlich die Nutenzahl, die Windungszahl pro Nut und die Verteilung viel

höher. Die Ständerwicklung hat die Aufgabe einen mit der Frequenz der Speisespannung umlaufendes Drehfeld im Luftspalt zu erzeugen. Um eine möglichst große Energieausbeute zu erhalten, sollte der Luftspalt so gering wie möglich gewählt werden (unter 1mm). Je nach Betriebsbedingungen kann man die drei Stränge (U1, U2; W1, W2; V1, V2) in Stern- oder Dreiecksform schalten. Der Läufer, auch Rotor genannt, der den magnetischen Rückschluss für das Drehfeld bildet, gibt es in zwei verschiedenen Bauweisen. Bei der Schleifringläufermaschine, deren Betriebsverhalten mit Läuferwiderständen gesteuert wird, trägt der Rotor eine in Nuten eingelegte Drehstromwicklung, die über Schleifringe und Bürsten mit Drehstrom versorgt wird. Wegen des Verschleißes, der durch die Schleifringe verursacht wird, hat man sich in der Praxis oft für den Käfigläufer entschieden. Die Nuten des Käfigläufers sind mit Profilstäben aus einer Kupferlegierung ausgefüllt, welche an der Stirnseite über Kurzschlussringe miteinander verbunden sind. Legt man an die Ständerwicklung einen Drehstrom an, so wird ein Drehfeld aufgebaut, dass Spannungen in den Rotor induziert. Man kann sich das Drehfeld als einen Nord- und Südpol vorstellen, der mit der Netzfrequenz im Luftspalt umläuft. Durch diese Induktion bilden sich Ströme in dem kurzgeschlossenen Käfigläufer, die ein Magnetfeld hervorrufen, dass nach der Lenzschen Regel auf das erzeugende Drehfeld eine abstoßende Kraft ausübt. Somit wird der Rotor in Bewegung gesetzt. Aufgrund der asynchronen Wirkungsweise entsteht eine positive oder eine negative Drehzahldifferenz zwischen dem Ständerfeld und dem Läuferfeld. Damit ist die Drehzahl des Motors nicht an die Frequenz der Ständerspannung gebunden.

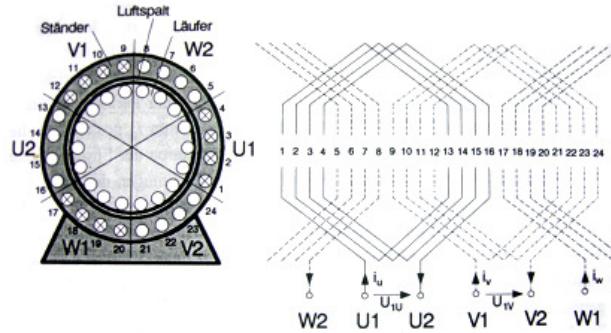


Abbildung 6

Die Synchronmaschine, deren Stator identisch mit dem der Asynchronmaschine ist, unterscheidet sich lediglich im Aufbau des Rotors. Der Rotor, auch Polrad genannt, besitzt Nuten, in die eine Gleichstromwicklung eingelegt ist. Somit erzeugt das Polrad ein Gleichfeld, dass vom Magnetfeld des Stators in Drehung versetzt wird. Der Rotor kann dabei auch aus einem Dauermagneten bestehen. Bewegt sich das Läuferpolrad und somit auch das Gleichfeld, so stellt sich dieses für den Ständer als ein Drehfeld dar. Da der Stator zusätzlich noch ein Drehfeld erzeugt, wird insgesamt das Drehfeld der Synchronmaschine zum Teil vom Ständer und zum Teil vom Läufer aufgebaut. Im Gegensatz zu asynchronen Motoren, ist die Drehfeldzahl der Synchronmaschine an die Frequenz der Statorspannung gebunden.

2.1.3 Aufbau und Funktionsweise von Linearmotoren

Wegen der geometrischen Ähnlichkeit zwischen einem Drehstrommotor und einem Linearmotor, kann man die gedankliche Entwicklung des Linearmotorprinzips aus der Funktionsweise der rotierenden Maschinen am Beispiel einer Drehstromasynchronmaschine sehr gut verdeutlichen.

Wie bereits bekannt, trägt der kreisförmige Stator drei Stränge der Drehstromwicklung und im Inneren einen runden Rotor, der aus einem Aluminiumkäfig besteht. Um einen Linearmotor zu erhalten, wird die Drehstromasynchronmaschine an einer beliebigen Stelle aufgetrennt (Abb.7). Danachwickelt man den Stator und den Rotor in eine Ebene ab und erhält somit einen linearen Rotor und einen linearen Stator. Dabei liegen Rotor und Stator in zwei getrennten aber parallelen Ebenen. Zwischen diesen beiden Ebenen befindet sich jetzt der dünne, geradlinige Luftspalt. Schließt man den linearen Stator an eine Drehstromquelle an, so erzeugt er jetzt statt einem Drehfeld ein Wanderfeld, bei dem die

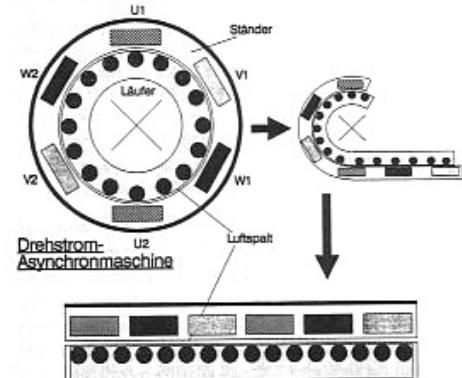


Abbildung 7

magnetischen Pole linear durch den Luftspalt laufen. Dieses Wanderfeld induziert in den geradlinigen „Läuferkäfig“ Spannungen, die entsprechende Ströme hervorrufen. Diese Stromdurchflossene Leiter führen in dem magnetischen Stator-Wanderfeld zu Lorentzkräften, die entweder den Läufer oder Ständer nach links oder rechts bewegen (Lenzsche Regel). Somit entsteht aus einer rotierenden Bewegung eine geradlinige Bewegung. Damit sich der Läufer oder der Ständer in eine der beiden Richtungen bewegen kann, muss eine der beiden Komponenten etwas länger sein. Soll sich zum Beispiel der Rotor bewegen, so muss der ortsfeste Stator länger sein.

Durch die unterschiedlichen Längen des Rotors und des Stators, muss man zwischen zwei Ausführungsmöglichkeiten der linearen Maschine unterscheiden (Abb.8). Wird der Ständer längs der Strecke verlegt, so spricht man von einem Langstator- Linearmotor. Hier wird der Stator direkt mit einer Drehstromquelle versorgt, so dass bewegte Kontakte zum Läufer vollständig entfallen.

Wird aber der Rotor längs der Strecke verlegt, so spricht man von einem Kurzstator- Linearmaschine. Bei dieser Variante werden drei Schleifringe, die den bewegten Ständer mit elektrischer Energie versorgen, benötigt.

Wie schon bekannt, ist der Aufbau asynchronischer Drehmotoren den Linearmotoren sehr ähnlich. Aus Fertigungsgründen ist aber oft der Rotor der Linearmaschine aus einer beblechten Eisenplatte (Fe) für den magnetischen Rückschluss des Wanderfeldes und einer darüberliegenden Kupferplatte (Cu) für die elektrischen Ströme aufgebaut. Da aber Kupfer diamagnetisch ist, wird bei dieser Bauform der Luftspalt um die Dicke des Kupfers erhöht. Als Folge dieser Vergrößerung, verringert sich aber die Energieausbeute.

Bei synchronen Langstator Linearmotoren wird die Kupfer- und Eisenschiene durch Elektromagnete oder Dauermagnete ersetzt. Falls Elektromagnete eingesetzt werden, müssen sie natürlich zusätzlich mit Gleichstrom versorgt werden.

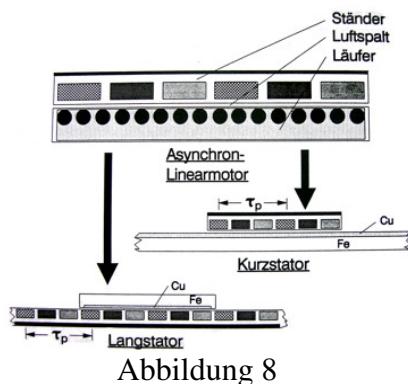


Abbildung 8

2.2.1 Allgemeiner Einsatz von Linearmotoren

Obwohl die meisten Bewegungsabläufe linear verlaufen, wird in der Praxis meist der umständliche Weg über die Umwandlung der Rotationsenergie in lineare Energie zum Beispiel über die Kupplungs-Getriebe-Achse-Rad-Boden Anordnung verwendet. Bei dieser Umwandlung geht natürlich viel Energie verloren, so dass man sich immer öfter für den Einsatz von Linearmotoren entscheidet. Wie schon bekannt, wird bei den linearen Motoren die Energie direkt in geradlinige Bewegungen umgewandelt. Durch diese Anordnung, bei der man mechanische Komponenten einspart, können maximale Wirkungsgrade von bis zu 80 Prozent erreicht werden. Weitere Vorteile der Linearantriebe sind zum Beispiel Kompaktheit, Robustheit und Verschleißfreiheit durch berührungslose Kraftübertragung. Infolge des unterschiedlichen Aufbaus und der einzelnen Vor- und Nachteile der synchron und asynchron Linearmotoren, werden die beiden Varianten auch in unterschiedlichen Einsatzgebieten angewendet.

Durch den einfachen Aufbau des Läufers und durch die große Robustheit werden Asynchronmotoren öfters in der Praxis eingesetzt. Anwendungsbereiche sind vorwiegend betriebsinterne Transport- und Positionierungssysteme. Weitere Einsatzgebiete sind zum Beispiel das schnelle und verschleißfreie Schließen von Rolltoren, das Bewegen von Schiebetüren ohne Selbsthemmung bei Stromausfall oder das Querschneiden in rauer Umgebung. Eine weitere interessante Anwendungsmöglichkeit wird noch bei asynchronen Langstatormaschinen angewendet. Elektrische sowie auch magnetisch leitende Produktionsmittel und Flüssigkeiten können selbst als Läufer ausgenutzt und direkt angetrieben werden. So werden zum Beispiel diese Art von Linearmotoren für den Transport und die Positionierung von Eisenblöcken und Eisenrohren im Stahlwerk eingesetzt.

Im Gegensatz zu asynchronen Linearantrieben, ist der Anwendungsbereich von synchronen Linearmotoren sehr gering. Sie haben sich vor allem in spurgebundenen Bahnsystemen, wie den hochgeschwindigkeits-Magnetschwebebahnen durchgesetzt.

Linearmotoren können theoretisch überall dort eingesetzt werden, wo

geradlinige Bewegungen stattfinden. In der Praxis ist das aber oft nicht der Fall. Wegen des offenen elektromagnetischen Systems sind alle lineare Maschinen Sonderanfertigungen, so dass sich oft der Einsatz von montage- und anschlussfertigen rotierenden Maschinen mit Getrieben, Kupplungen und Rädern öfters lohnt.

2.2.2.1 Technik des Transrapids

Da der Einsatz des Linearmotors erst in der Magnetschwebebahntechnik eine große Bedeutung bekam, sollte man sich näher mit dieser Technik befassen. Weil der Transrapid eine der bekanntesten und erfolgreichsten Magnetschwebebahnen und eine grundlegende Innovation in der Bahntechnik seit dem Bau der ersten Eisenbahnen ist, möchte ich den Antrieb, das Trage und Führungssystem, den Aufbau des Fahrwegs/ Fahrzeugs und die Betriebsleittechnik des Transrapids näher erläutern.

Statt einem Antrieb wie er bei einer Eisenbahn durch Elektromotoren, Räder und Schienen erfolgt, wird beim Transrapid eine Kombination aus einem berührungsfreiem elektromagnetischen Antriebs-, Trag- und Führungssystem ausgenutzt.

Für eine technische Realisierung des Transrapids stelle man sich zuerst eine T-förmige Schiene vor (Abb.9/10). Unter den beiden Querträgern des T werden beidseitig zwei linear, ferromagnetischen Statorpakete angebracht. Der gesamte T-Oberteil, die beiden Querträger

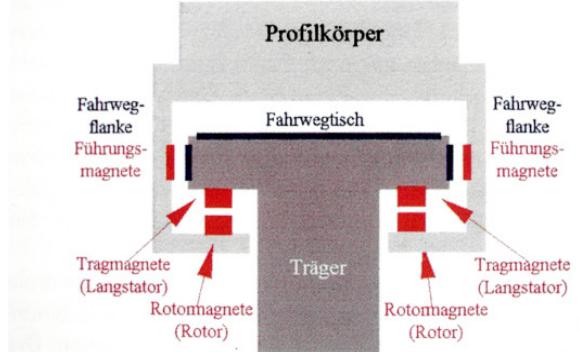


Abbildung 9

und die unteren Querteile der T-Schiene werden von dem Fahrzeug umklammert. An den beiden Haken der Fahrzeugumklammerung werden nach oben weisende, elektronisch geregelte Tragmagnete entlang des gesamten Fahrzeugs angebracht. Die beiden Magnetgruppen, die des Linearstators und

die des linearisierten Rotors, werden elektronisch in einem Abstand von ca. 10mm gehalten. Dabei führt die Magnetregelung 100.000 mal in der Sekunde Messungen von dem Luftspalt durch und vergleicht diese mit dem Sollwert. Die Differenz wird dann wieder ausgeglichen, indem die Regelung den Strom für die Elektromagneten ändert.

Der Antrieb erfolgt über einen synchronen Langstator-Linearmotor, bei dem sich der Stator im Fahrweg und der Rotor im Fahrzeug befindet. Somit ist das Fahrzeug ein Teil des Linearmotors. Diese beiden Magnetgruppen sind die gleichen Komponenten, die für das elektromagnetische Schweben (EMS) verantwortlich sind. Die Tragmagnete sind gleichzeitig das Erregerteil (Rotor) für den Stator. Somit wird der Transrapid durch einen Linearmotor in Kombination mit dem magnetischen Tragesystem angetrieben.

Wie schon bekannt, erzeugt der Langstator mit seinen an den Drehstrom angeschlossenen Wicklungen ein elektromagnetisches Wanderfeld, von dem das Fahrzeug durch seine Elektromagnete mitgezogen wird. Dabei werden diese Elektromagnete durch die Bordbatterien mit Gleichstrom versorgt. Die Geschwindigkeit des Fahrzeuges (400- 500km/h!) lässt sich stufenlos durch Veränderung von Stärke und Frequenz des Stroms in den Wicklungen des Fahrweges regulieren. Ändert man die Kraftrichtung des Wanderfeldes durch umpolen zweier Phasen, so wird der Linearmotor zum Lineargenerator, der das Fahrzeug berührungs frei bremst. Die dabei in Form von Strom freiwerdende Bremsenergie, kann wieder in die Bordbatterien des Fahrzeuges zurückgespeist werden.

In der Horizontalen Lage wird der Transrapid durch das elektromagnetische Schwebesystem immer in einem konstanten Abstand zum Fahrweg gehalten. Damit der Transrapid auch seitlich in der Spur bleibt, wird jeweils ein Führungsmagnet entlang des ganzen Fahrzeuges und eine Führungsschiene entlang des T-förmigen Oberteil angebracht (Abb.9/10).

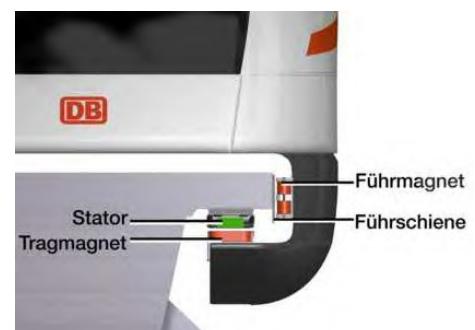


Abbildung 10

Die Energieversorgung für das Trag-, Antriebs- und Führsystem des

Fahrzeuges erfolgt in der Fahrt über die Bordbatterien, die durch die in den Tragmagneten integrierte Linear-Generatoren mit Strom versorgt werden. Sie werden während der Fahrt durch das Magnetfeld zwischen Fahrzeug und Fahrweg geführt. Durch diese ständige Magnetfeldänderung wird Strom in die Spulen der Lineargeneratoren induziert. Somit wird kinetische in elektrische Energie berührungslos umgewandelt. Im Stillstand kann das Fahrzeug etwa eine Stunde schweben. Dabei verbraucht das Schwebesystem nicht mehr Energie, als die Klimaanlage an Bord des Fahrzeuges. Ansonsten erfolgt die Stromversorgung an den Haltepunkten über Stromabnehmer oder Nabelschnursteckdosen.

Die Stromversorgung für den Fahrweg (Stator) erfolgt nur abschnittsweise. Würde man die ganze Fahrstrecke mit Strom versorgen, so wäre der Energieverlust sehr hoch. Man unterteilt deshalb den Fahrweg in viele Motorabschnitte, die eine Länge von 300m bis 2000m besitzen. Mit Strom wird nur der Motorabschnitt versorgt, indem sich auch ein Fahrzeug befindet. Zusätzlich kann man die Stromstärke in jedem Abschnitt zum Beispiel bei ansteigender Fahrstrecke erhöhen.

Die Magnetschwebetrassen können ebenerdig und aufgeständert ausgeführt werden. Die ebenerdigen Versionen bedürfen besonderen Seitensicherungen, da eine Gefährdung für die in der unmittelbaren Nähe befindlichen Personen besteht. Bei der Vorbeifahrt entsteht nämlich durch die hohe Geschwindigkeit eine starke Druckwelle und anschließend ein starker Sog. Die bevorzugte Variante sind die aufgeständerten Trassenteile, da sie optisch zurücktreten und nur einen Bruchteil der Fläche einer Straßen- oder Bahnlinie benötigen.



Abbildung 11

Das Transrapid-Fahrzeug besteht aus mindestens zwei Sektionen. Jede davon besitzt durchschnittlich etwa 90 Sitzplätzen. Je nach Einsatzfall und Verkehrsaufkommen können Züge mit bis zu zehn Sektionen (zwei Bug- und acht Mittelsektionen) zusammengestellt werden. Der Transrapid kann aber noch zusätzlich Güter befördern. Dazu können spezielle Gütersektionen mit den Personensektionen kombiniert werden.

Die Betriebsleittechnik steuert den Betrieb der Transrapid-Fahrzeuge. Sie

sichert die Fahrzeugbewegungen, die Stellung der Weiche und alle anderen Funktionen wie zum Beispiel noch die Stromstärke im Fahrweg. Die Ortung der Fahrzeuge auf der Strecke erfolgt durch ein fahrzeugseitiges Ortungssystem, das digital kodierte Ortsmarken am Fahrweg erfasst. Zur Kommunikation zwischen dem Fahrweg und dem Leitstand, der Betriebszentrale, dient eine Richtfunk-Datenübertragung.

2.2.2.2 Transrapid Versuchsanlage Emsland (TVE)

Bevor man sich entscheidet Fahrzeuge kommerziell einzusetzen, müssen sie immer zuerst auf Versuchsanlagen entwickelt und erprobt werden. Für die Erprobung des Transrapiids entschloss man sich 1980 für den Bau der 31,5 Kilometer langen Transrapid Versuchsanlage (TVE) in Emsland in der Nähe der Stadt Bremen (Abb.12). Die TVE umfasst einen geschlossenen Kurs mit einer gerade Strecke, zwei Schleifen mit unterschiedlichen Radien und den dazugehörigen Weichen. Ferner gehören zu ihr die erforderlichen Leiteinrichtungen, ein Versuchszentrum und Einrichtungen zur Betreuung und Information der Besucher. Auf der linearen Strecke (12 km) erreicht der Transrapid eine Höchstgeschwindigkeit von 450 km/h. Am Nord- und Südende der geradlinigen Strecke führt eine sogenannte Schnellfahrweiche in die Nordschleife mit einem Kurvenradius von 1700m und in die Südschleife mit einem Kurvenradius von 1000m. In der Nordkurve erreicht der Transrapid eine Geschwindigkeit von 350 km/h und in der Südkurve eine Geschwindigkeit von 200 km/h. Die gesamte technische Ausstattung der TVE ist so ausgelegt, dass viele fahrtechnische Parameter zu ermitteln und zu testen sind. Man untersucht zum Beispiel das Fahrverhalten, die maximale Fahrwegsteigung (10%!), die Druckverhältnisse bei Tunnel-einfahrten und den entstehenden Geräuschpegel, der viel geringer als bei allen ähnlichen Verkehrsmitteln ist.



Abbildung 12

2.3.1 Bau eines Drehstromgenerators

Bevor ich mich näher mit dem Aufbau des Linearmotors beschäftigte, konstruierte ich zusätzlich ein Drehstromgenerator (Abb.13), der eigentlich einen kleinen Linearmotor betreiben sollte. Wie sich jedoch später herausstellte, ist seine Leistung für solch einen Betrieb zu gering.

Der Aufbau des Generators erfolgte genau nach der „Abbildung 2“. Für jede der drei Ankerwicklungen benutzte ich jeweils eine Schraube, auf die ein isolierter Draht eines Transformators aufgewickelt wurde. Da die Ahnzahl der Wicklungen sehr groß ist, beschloss ich den Draht mit Hilfe einer Bohrmaschine aufzuwickeln. Nachdem der Draht auf die Schrauben aufgewickelt wurde, befestigte ich die drei Anker mittels Heißkleber in die drei Ecken eines gleichseitigen Dreiecks. Danach wurde jeweils ein Spulenende mit einem Spulenanfang einer anderen Spule verlötet (Dreiecksschaltung). Dieses hölzerne Dreieck besitzt zusätzlich eine zentrale Bohrung für die Motorachse, auf der das Polrad, dass aus einem starken Neodym-Magneten (Zugkraft 10N) besteht, befestigt ist. Der 12 V Gleichstrommotor versetzt den Magneten in Drehung, der wiederum Spannungen in die drei Anker induziert. Beim Bau musste vor allem beachtet werden, dass sich der Magnet nicht zu nah an den Ankern vorbeibewegen kann, da ansonsten die magnetische Kraft zwischen Anker und Magnet so groß wäre, dass die Motorkraft nicht mehr ausreichen würde das Polrad in Bewegung zu versetzen. Die Induktionsspannung der Spulen beträgt jeweils drei Volt; der Strom beträgt nur einige milli Ampere. Die drei Sinuskurven sind im Oszilloskop wegen der ungenauen Windungszahl der Spulen und wegen der ungleichmäßigen Frequenz des Motors bzw. des Polrades unterschiedlich groß und leicht verzerrt.

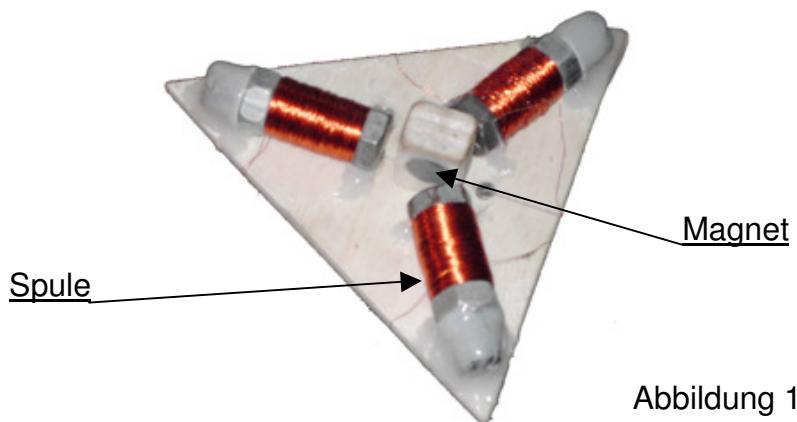


Abbildung 13

2.3.2 Aufbau eines Linearmotors in der Schule

Um sich vorzustellen zu können wie ein Linearmotor funktioniert, welche Bauteile benötigt werden und welche Probleme beim Aufbau auftauchen könnten, baute ich vor dem eigentlichen Bau des Linearmotors zunächst einen in der Schule auf. Da es sehr viele Möglichkeiten für die technische Realisierung eines Linearmotors gibt, entschloss ich mich für den auf der Internetseite¹ der Universität Ulm dargestellten Aufbau.

Der lineare Stator und Rotor des asynchronen Kurzstator-Linearmotors liegen nicht wie normalerweise in einer Ebene. Wegen eines einfacheren Aufbaus und wegen eines höheren Wirkungsgrades, umschließt der Rotor (3 Spulen) vollständig den Stator (leitfähige Stativstange). Für den Aufbau des Rotors befestigte ich drei nebeneinander liegende Spulen (Windungszahl unbekannt), die später in Dreiecksschaltung geschaltet wurden, auf einen Wagen (Abb.14). Danach steckte ich eine Leitfähige Stativstange, die für den magnetischen Rückschluss dient, durch die drei Spulen. Diese Stativstange wurde später an beiden Tischkanten in einer bestimmten Höhe so befestigt, dass sich die Stange genau in der Mitte des Spuleninneren befindet. Damit sich der Wagen mit den drei Spulen nicht mit der Stange in der horizontalen Lage berührt, musste der Wagen genau parallel zum Stab ausgerichtet werden. Später wurde die Spulen mittels drei Kabel an den Drehstromgenerator angeschlossen. Damit die Kabel die Bewegung des Wagens nicht beeinträchtigen können, wurden sie auf einer Stangenkonstruktion in der Höhe befestigt. Nach dem Einschalten des Drehstroms bewegte sich der Wagen in eine Richtung. Durch Umpolen zweier Phasen fuhr der Wagen in die entgegengesetzte Richtung.

Bei diesem Aufbau entstanden zwei kleine Probleme, die später beim Eigenbau des Linearmotors einigermaßen behoben werden mussten. Das erste Problem

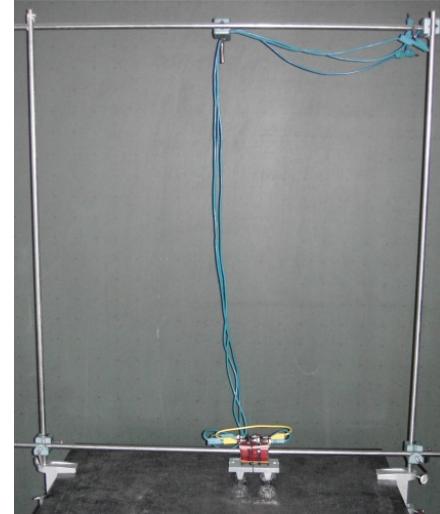


Abbildung 14

¹ <http://vorsam-server.physik.uni-ulm.de/Versuche/EM/html/EM113V00.htm>

entstand durch die ungenaue Ausrichtung des Wagens gegenüber der Stange. Beim Fortbewegen fuhr der Wagen eine leichte Kurve, die zur Folge hatte, dass sich die Spulen seitlich mit der Stativstange berührten. Um dieses Problem zu beheben, musste für den späteren Bau des Linearmotors eine Schiene für den Wagen verwendet werden. Das zweite Problem entstand durch die relativ große Leistung des Generators ($10V \times 10A = 100W$). Beim mehrmaligen benutzen des Motors erhitzten sich nämlich die Spulen sehr stark auf. Dieses Problem könnte man zum Beispiel durch Einbezug eines Vorwiderstandes beheben.

2.3.3 Bau eines Linearmotors

Der Bau des eigenen Linearmotors erfolgte genau nach dem schon vorher in der Schule getestetem Aufbau. Jedoch wurden infolge einiger vorheriger Probleme einige technische Verbesserungen des asynchronen Kurzstator-Linearmotors vorgenommen.

Der Rotor besteht genau wie im schulischen Aufbau aus drei auf einem Wagen befestigten Spulen (Abb.15). Die Spulen, die aus einem alten Transformatordraht bestehen, wurden auf ein acht Zentimeter langes Plastikrohr ($\varnothing 1\text{cm}$) aufgewickelt. Dabei wurden aber zuerst zwei kreisförmige Holzstücke auf 1/3 und 2/3 der Länge des Rohres gesteckt. Somit entstanden drei gleich große Kammern, in die später jeweils eine Spule aufgewickelt wurde. Da die Spulenwindungszahl sehr groß ist, wurde der Draht mittels einer Bohrmaschine auf das Rohr aufgewickelt. Danach wurden die drei Spulen nach der Dreiecksschaltung miteinander verlötet.

Der Wagen besteht aus einem Holzboden und zwei seitlichen Holzwänden. Dabei wurden auf der Unterseite des Bodens vier kleine Räder befestigt. Um die Reibung so klein wie möglich zu halten, entschied ich mich für die Fahrzeugräder die leichtgängigen Räder eines alten Kassettenrekorders zu verwenden (Abb.17). In die Seitenwände wurden

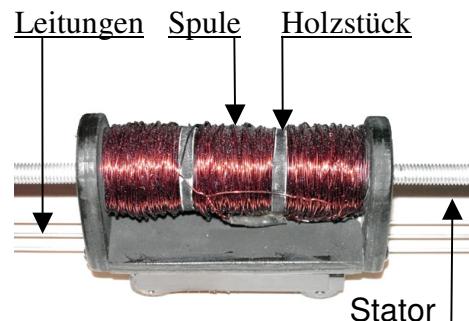


Abbildung 15

jeweils ein Loch gebohrt, in das später das Rohr mit den drei Spulen gesteckt wurde. Zum Schutz der Spulen wurde danach noch ein Metallnetz um die Spulen gewickelt. Somit war der Wagen fast fertig. Für den Stator des Linearmotors wurde einfach eine ein Meter lange Eisenschraube (\varnothing 0.6cm) verwendet.

Der Fahrweg für das Fahrzeug besteht aus einem 95cm langen und 10cm breiten Holzbrett, dass an den beiden Enden jeweils eine hölzerne Wand besitzt. Durch diese Wände wurde später ein Loch für die „Statorschraube“ so gebohrt, sodass sich es genau auf der gleichen Höhe wie das Spuleninnere des Fahrzeugs befindet. Anstatt den Rotor mit drei hochgelegten Kabeln mit Drehstrom zu versorgen, entschloss ich mich für eine arbeitsaufwändigere aber praktischere Lösung. Bei dieser Variante wird das Fahrzeug durch Schleifkontakte mit Strom versorgt. Um diese Idee verwirklichen zu können, mussten zuerst drei bodennahe Leitungen entlang des gesamten Fahrwegs verlegt werden. Für die Leitungen wurde ein 1mm dünner Draht benutzt, der fest zwischen den beiden Wänden des Fahrwegs eingespannt wurde. Dazu wurden jeweils drei nebeneinander liegende Löcher auf einer bestimmten Höhe in die Seitenwände gebohrt. Auf einer der beiden Seiten wurden die Drähte fest mit der Wand verbunden. Da aber die Leitungen sehr fest aufgespannt sein müssen, wurde auf der anderen Wand eine Spannvorrichtung errichtet (Abb16). Dazu wurde als erstes jeder Draht durch die vorgebohrten Löcher der Wand hindurch gesteckt. Später wurde jedes einzelne Drahtende mit einer Schraube verlötet. Durch das Drehen der Mutter einer Schraube, schob sich die Schraube immer weiter von der Wand weg und spannte somit den Draht immer weiter auf. Dieser Vorgang wurde natürlich drei mal durchgeführt. Mit einem ähnlichen Prinzip wird zum Beispiel eine Gitarrenseite aufgespannt. Nachdem die drei Drähte aufgespannt waren, wurden sie mit vier Schaltern verlötet. Drei der Schalter dienen für das Einschalten der drei Phasen. Der einzelne Schalter wird für das umpolen zweier Phasen benötigt. Zusätzlich wurden an die drei Schalter LEDs mit einem geeignetem Vorwiderstand parallel

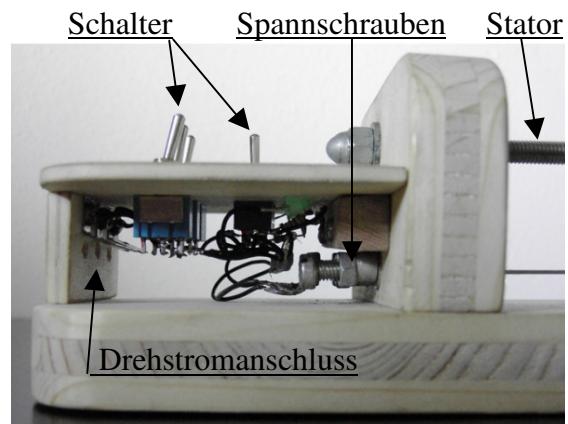


Abbildung 16

geschaltet. Wird der Strom eingeschaltet, so leuchten die Kontrol-LEDs auf. Damit der Wagen mit Strom versorgt werden kann, mussten jetzt noch zusätzlich drei metallische Federn, die mit den Spulen verbunden sind, am Fahrzeugboden installiert werden (Abb. 17). Setzt man den Wagen auf den Fahrweg auf, so drücken die Federn auf die drei Leitungen und schließen somit

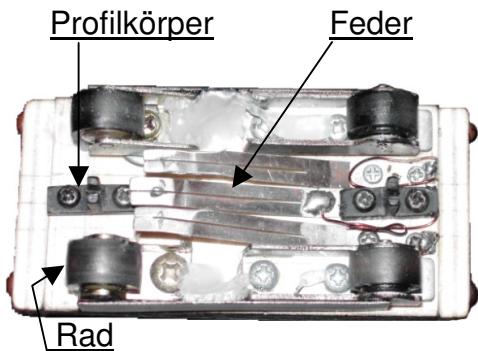


Abbildung 17

den Stromkreislauf. Zusätzlich wurden unter dem Wagen zwei Profilkörper montiert, durch die der mittlere Leitungsdraht verlaufen kann. Somit dient der mittlere Draht gleichzeitig als Führungsschiene für das Fahrzeug.

Im gesamten Bauprozess traten nur einige Probleme auf. Zum Beispiel mussten durch die relativ große Geschwindigkeit des Wagens (3 km/h) an beiden Enden des Fahrwegs zusätzlich Schaumstoffkörper zum Schutz des Fahrzeugs beim Aufprall montiert werden.

Das zweite Problem tritt beim längeren Benutzen des Linearmotors auf. Aufgrund der relativ großen Leistung des Drehstromgenerators (100 W), erhitzten sich die Spulen ziemlich stark auf. Das „schwerwiegendste“ Problem trat jedoch beim erstmaligen benutzen des Linearmotors auf. Der Wagen bewegte sich nämlich sehr langsam und später fast



Abbildung 18

überhaupt nicht mehr. Irgendwo war die Reibung zwischen dem Fahrweg und dem Fahrzeug sehr groß. Wie sich später herausstellte waren die Räder des Wagens nicht genau justiert. Der wagen fuhr nämlich eine leichte Kurve, die zur Folge hatte, dass sich der Profilkörper des Fahrzeuges mit dem mittleren Leitungsdraht zu stark berührten. Dieses Problem konnte jedoch nach einer geringen Justierung der Räder (ca. 0.1mm!) sehr schnell behoben werden.

Wie man schon aus dieser geringen Justierung erahnen kann, musste beim Bauprozess des funktionsfähigen Modells sehr sorgfältig gebaut werden.

3 Der Linearmotor

Bei geradlinigen Bewegungen werden heutzutage Linearmotoren wegen ihrer immensen Vorteile gegenüber „normalen“ elektrischen Motoren immer häufiger eingesetzt.

Lineare Maschinen besitzen fast die gleichen Baukomponenten wie herkömmliche elektrische Maschinen. Sie unterscheiden sich lediglich in ihrem geometrischen Aufbau. Normale Motoren besitzen einen Ständer und einen sich darin drehenden Läufer. Um aus der rotierenden Bewegung eine geradlinige Bewegung zu erhalten, muss oft einen umständlichen Weg zum Beispiel über eine Kupplungs-Getriebe-Achse-Rad-Boden Anordnung gewählt werden.

Linearmotoren besitzen die gleichen Komponenten, jedoch sind diese im Gegensatz zu rotierenden Maschinen geradlinig aufgebaut. Der Läufer und der Rotor eines „normalen“ Motors wurden sozusagen an einer beliebigen Stelle aufgeschnitten und in eine Ebene abgerollt. Somit wird die elektrische Energie direkt in eine lineare Bewegung umgewandelt. Infolge dieser Veränderung können viele Vorteile wie zum Beispiel geringerer Verschleiß, direkte bzw. berührungslos Kraftübertragung, Robustheit und ein viel höherer Wirkungsgrad ausgenutzt werden.

Linearmotoren werden überall dort eingesetzt, wo geradlinige Bewegungen stattfinden. Einige wenige Anwendungsgebiete finden sich zum Beispiel in der Industrie, bei der Magnetschwebebahn oder sogar bei den neusten Achterbahnen.

Die geschichtliche Entwicklung des Linearmotors verlief in der Vergangenheit eher still. Mit dem heutigen Wissensstand können aber die Linearmotoren immer öfters in der Praxis eingesetzt werden und somit werden sie uns immer häufiger im Leben begegnen.

Literaturverzeichnis

Bücher:

- Götzke Horst, Transrapid. Technik und Einsatz von Magnetschwebebahnen, Stuttgart 2002
- Hofer Klaus, Drehstrom-Linearantriebe für Fahrzeuge, Berlin 1993

Internet:

- WWW: <http://www.hennis-home.de/Studium/Transrapid/transrapid.html>
(Stand: 30.01.2004)
- WWW: <http://www.transrapid.de/de/index.html> (Stand: 30.01.2004)
- WWW: <http://elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/drehstrom.php>
(Stand: 30.01.2004)
- WWW: <http://members.magnet.at/alpha-channel/electro/lauf/agen6.htm>
(Stand: 30.01.2004)
- WWW: <http://fips-server.physik.uni-kl.de/fips/teilnehmer/newsticker/history/01-02-06.html> (Stand: 30.01.2004)
- WWW: <http://strombasiswissen.bei.t-online.de/SB123-05.htm>
(Stand: 30.01.2004)
- WWW: <http://www.von-grambusch.de/Meister/M47.htm> (Stand: 30.01.2004)
- WWW: <http://vorsam-server.physik.uni-ulm.de/Versuche/EM/html/EM113V00.htm> (Stand: 30.01.2004)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Götzke Horst, Transrapid

Abbildung 2: <http://www.von-grambusch.de/Meister/M47.htm>

Abbildung 3: <http://strombasiswissen.bei.t-online.de/SB123-05.htm>

Abbildung 4: <http://elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/drehstrom.php>

Abbildung 5: <http://elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/drehstrom.php>

Abbildung 6: Hofer Klaus, Drehstrom-Linearantriebe für Fahrzeuge

Abbildung 7: Hofer Klaus, Drehstrom-Linearantriebe für Fahrzeuge

Abbildung 8: Hofer Klaus, Drehstrom-Linearantriebe für Fahrzeuge

Abbildung 9: Götzke Horst, Transrapid

Abbildung 10: Götzke Horst, Transrapid

Abbildung 11: Götzke Horst, Transrapid

Abbildung 12: Götzke Horst, Transrapid

Abbildung 13: Patrick Rosyk

Abbildung 14: Patrick Rosyk

Abbildung 15: Patrick Rosyk

Abbildung 16: Patrick Rosyk

Abbildung 17: Patrick Rosyk

Abbildung 18: Patrick Rosyk

Der Text zu den einzelnen Abbildungen bezieht sich auf die gleichen Quellenangaben, wie die dazugehörigen Abbildungen.

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Facharbeit selbstständig ohne fremde Hilfe angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Schongau, den 02.02.2004

.....