

Die Magnetschnellbahn Transrapid im Experiment

MARKUS UHLENBROCK, VOLKHARD NORDMEIER, H. JOACHIM SCHLICHTING

Die Magnetschnellbahn Transrapid ist die bekannteste Anwendung des Linearmotors als Fahrzeugantrieb. Ohne die Fahrbahn zu berühren, wird das Fahrzeug von elektromagnetischen Wanderfeldern auf Geschwindigkeiten von über 400 km/h beschleunigt. In einem Demonstrationsexperiment zum Linearmotor mit handelsüblichen Lehrmitteln lassen sich Entstehung und Wirkung von elektromagnetischen Wanderfeldern und somit die Funktionsweise des synchronen Langstator-Linearmotors veranschaulichen.



Abb. 1: Die Magnetschwebbahn Transrapid 07

1. Einleitung

Obwohl die Geschichte der Magnetschnellbahn bis in die zwanziger Jahre dieses Jahrhunderts zurückreicht, ist das Konzept des Transrapid erst wieder in den letzten Jahren in die Medien und somit in den Blickpunkt der Öffentlichkeit gerückt. Die in den Siebzigern ersonnenen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Linearmotoren reichten vom Aufzugturantrieb bis zum Förderbandantrieb für den Schüttguttransport [1]. Doch haben sich diese in der Praxis allesamt nicht durchgesetzt. Einzig der Transrapid mit dem Linearmotor als Antrieb ist heute noch im Gespräch. Die Debatten über ihn werden allerdings meist ebenso kontrovers wie unfundiert geführt.

Die Aufgabe des naturwissenschaftlichen Unterrichts an Schulen besteht nicht zuletzt darin, zentrale Bereiche unserer zunehmend naturwissenschaftlich-technisch geprägten Umwelt zu thematisieren. Dies bietet neben der physikalisch-technischen Erkenntnisgewinnung die Möglichkeit, Schülerinnen und Schüler in die kritische Betrachtung moderner Technologien mit ihren vielschichtigen Aspekten einzuführen.

Im Folgenden sollen die Funktionsweise der Magnetschwebbahn Transrapid aufgezeigt und ein experimenteller Zugang vorgestellt werden.

2. Geschichte des Transrapid [2]

Im Jahre 1922 erfand der Hannoveraner Ingenieur HERMANN KEMPER das Prinzip der Magnetschwebbahn und begann mit deren Entwicklung. Im Jahre 1934 meldete er für die "Schwebbahn mit räderlosen Fahrzeugen" das Patent an. 1962 schlug W. BÄSELER das Rollbahn-Prinzip vor, um den Straßenverkehr zu entlasten. Die Autos sollten dabei einer Art Förderband stehen, auf dem sie mit hoher Geschwindigkeit zum Ziel transportiert würden. Eine Analyse von MBB ergab, daß solche Rollbahnen nur bei Geschwindigkeiten sinnvoll sind, die die Grenzen des Rad-Schiene-Systems übersteigen. 1969 erteilte Verkehrsminister GEORG LEBER (SPD) den Auftrag zur Durchführung der "Hochleistungs-Schnellbahn-Studie", die unter anderem klären sollte, welche Systeme das steigende Verkehrsaufkommen auffangen könnten.

In den siebziger Jahren wurden verschiedene Hochgeschwindigkeits-Systeme, wie Luftkissenfahrzeuge und Magnetgleiter nach dem Prinzip elektrodynamischen Schwebens EDS (Abstoßung) sowie dem elektromagnetischen Prinzip EMS (Anziehung) weiterentwickelt und getestet. Während sich in der Entwicklung des elektromagnetischen Schwebens die Firmen MBB und Krauss-Maffei engagierten, wurde das elektrodynamische Schwebesystem von AEG, BBC und Siemens entwickelt [3]. 1977 entschied der Bundesminister für Forschung



Abb. 2: Vorläufer des Transrapid: (a) Das Prinzipfahrzeug von MBB (EMS) (1971);
(b) Der Erlanger Erprobungsträger EET (EDS) (1974)

und Technologie zugunsten des elektromagnetischen, anziehenden Prinzips. Es folgte die Entwicklung einer Reihe von Transrapid-Generationen einschließlich der Planung und Errichtung einer 31,5 km langen Versuchstrasse im Emsland Anfang der achtziger Jahre. 1991 wurde die technische Einsatzreife des Transrapid festgestellt. 1993 stellte der Transrapid 07 unter normalen Betriebsbedingungen den neuen Geschwindigkeitsweltrekord von 450 km/h auf. Im Mai 1996 verabschiedete der Bundestag das Gesetz zum Bau der Magnetschwebebahn-Trasse zwischen Hamburg und Berlin.

3. Der Antrieb der Magnetschwebebahn Transrapid

Jedes Fahrzeug, gleich welcher technischen Konzeption es auch angehört, muß folgende drei Aufgaben erfüllen:

- Tragen
- Antreiben
- Führen

Das System muß das gesamte Gewicht des Fahrzeuges tragen, es soll das Verkehrsmittel antreiben und bremsen und hat schließlich dafür zu sorgen, daß es die zur Fortbewegung vorgesehene Trasse nicht verläßt.

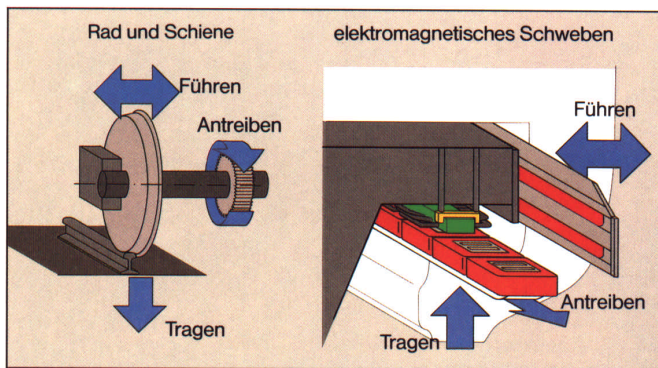


Abb. 3: Aufgaben eines Verkehrsmittels

Bei Eisenbahnen erfüllt diese Aufgaben das System Rad-Schiene (Abb. 3). Die Räder tragen das Gewicht des Zuges und seiner Last, sie übertragen die kinetische Energie des Motors und sorgen durch ihre Kegelform und die Radkränze gewöhnlich dafür, daß der Zug nicht entgleist.

All dies muß das Konzept einer Magnetschwebebahn ebenfalls leisten. Nur besteht hier das Ziel, diese Anforderungen berührungsfrei zu erfüllen.

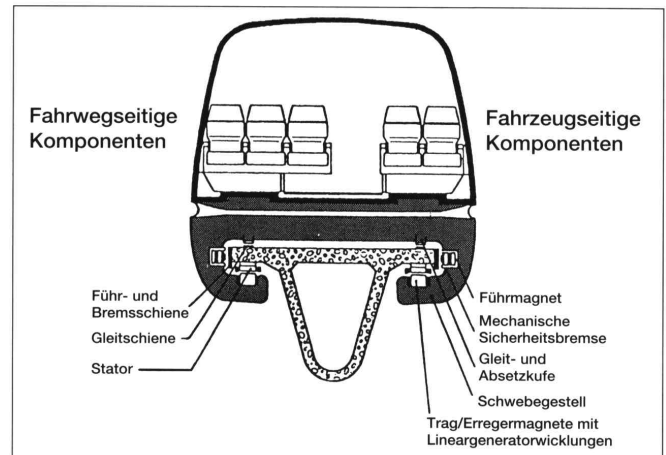


Abb. 4: Antriebskomponenten von Fahrzeug und Fahrweg

Dazu besitzt der Transrapid ein umfangreiches Trag- und Führsystem (Abb. 4). An den Schwebegestellen, die beidseitig die Fahrbahn umgreifen, sind über die gesamte Fahrzeuglänge Trag- und Führmagnete angebracht. Diese Magnete sind jeweils einzeln gesteuert und sorgen mit Hilfe von Abstandssensoren und Regeleinheiten für einen gleichbleibenden Abstand zwischen Fahrzeug und Fahrweg. Die Tragemagnete ziehen das Fahrzeug von unten an den Fahrweg heran, der seinerseits mit ferromagnetischen Reaktionsschienen, den Statorpaketen, ausgestattet ist. Während des Schwebens beträgt der Spalt zwischen Magneten und Fahrbahn 10 mm, gleichzeitig mißt der Abstand zwischen Fahrwegtisch und Fahrzeugunterseite ca. 15 cm. Die Führmagnete sind seitlich in den Schwebegestellen angeordnet und halten das Fahrzeug in gleichmäßigem Abstand zum Fahrweg. Jede Fahrzeugsektion verfügt über 15 autonome Trag- sowie 13 autonome Führmagnete.

Die Energieversorgung des Transrapid erfolgt ebenfalls berührungsfrei über Lineargeneratoren, in denen geschwindigkeitsabhängig durch Induktionsschwankungen Spannungen induziert werden.

Der Antrieb der Magnetschwebebahn Transrapid erfolgt durch einen *synchronen Langstator-Linearmotor*. Üblicherweise werden zum Antrieb von Maschinen Drehstrommotoren verwendet, welche Rotationsbewegungen erzeugen bzw. Drehmomente ausüben. Diese Motoren sind aus Rotor und Stator zusammengesetzt. Der Stator besteht im einfachsten Fall aus drei Strängen, die im Gehäuse um 120° gegeneinander versetzt angebracht und mit den drei Phasen des Drehstromnetzes verbunden sind. Auf diese Weise wird ein Magnetfeld erzeugt, das sich räumlich gegen das Motorgehäuse zu drehen scheint. Diesem Drehfeld folgt der Rotor, welcher bei synchronen Motoren aus sogenannten Erregermagneten besteht, instantan.

Die Motordrehzahl stimmt dann mit der Frequenz des Drehfeldes überein. Beim Asynchronmotor ist keine Stromzufuhr zum Rotor erforderlich, da der Strom durch Induktion im Rotor selbst erzeugt wird. Dieser wird dann als Kurzschluß- oder Käfigläufer bezeichnet. Zwar ist hier die Geschwindigkeit des Motors nicht durch die Frequenz des Drehstroms festgelegt, doch fallen so verschleißanfällige Schleifringe und Bürsten für die Stromzufuhr zum Rotor weg.

Der synchrone Langstator-Linearmotor entsteht nun dann, wenn man den beschriebenen synchronen Drehstrommotor im Gedankenexperiment aufschneidet und streckt. Dann erzeugen die Statorwicklungen kein Drehfeld, sondern ein *Wanderfeld*. Beim Transrapid werden die dreiphasigen Wicklungen in Profilen verlegt, die aus Elektroblech zusammengesetzt sind, sogenannten Statorpaketen (Abb. 5). Diese sich überlagernden Wicklungen sind über die gesamte Wegstrecke an der Unterseite des Fahrweges angebracht und erzeugen ein Magnetfeld, welches sich fortzubewegen scheint, das Wanderfeld. Als Erregermagnete des Motors dienen hier die Tragmagnete an der Unterseite der Schwebestelle. Größere Lasten erfordern hierbei stärkere Erregermagnetfelder. Diese werden aber schon dadurch erzielt, daß bei solchen Lasten größere Tragmagnetfelder notwendig sind, um einen gleichbleibenden Luftspalt zwischen Fahrzeug und Fahrweg zu garantieren. Somit ist die Forderung eines auf die Last abgestimmten Erregermagnetfeldes erfüllt. Trotz der Unterstützung durch diese Anpassung wird die eigentliche Motorleistung im Fahrweg realisiert. Bei diesem synchronen Langstator-Linearmotor folgt das Fahrzeug mit seinen Tragmagneten synchron dem Wanderfeld, d.h. die Geschwindigkeit des Fahrzeuges ist gleich der Phasengeschwindigkeit des Wanderfeldes.



Abb. 5: Statorpaket mit dreiphasiger Wicklung

Die Geschwindigkeit der Magnetschwebbahn ist somit durch die Frequenz des Drehstromes bestimmt. Bei einer Polteilung (Abstand zwischen "Nord"- und "Süd"-Pol des Wanderfeldes) von 258 mm, d.h. einer Statorperiode ("Wellenlänge") von 516 mm, erreicht die Magnetschwebbahn mit einer Frequenz von 215 Hz eine Geschwindigkeit von $v = 0,516 \text{ m} \cdot 215 \text{ s}^{-1} = 110,94 \text{ m/s} \approx 400 \text{ km/h}$.

Für eine optimale, komfortable Fahrt müssen Lage, Geschwindigkeit und Stärke des Wanderfeldes (gleichbedeutend mit Phasenwinkel, Frequenz und Stromstärke des Drehstromes) ständig an die Umstände angepaßt werden. Hierzu wird neben der Position auch die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bestimmt. Die Stromregelung erfolgt dann mit einer großen Genauigkeit, die einer Längenabweichung von weniger als 12 mm entspricht. [4]

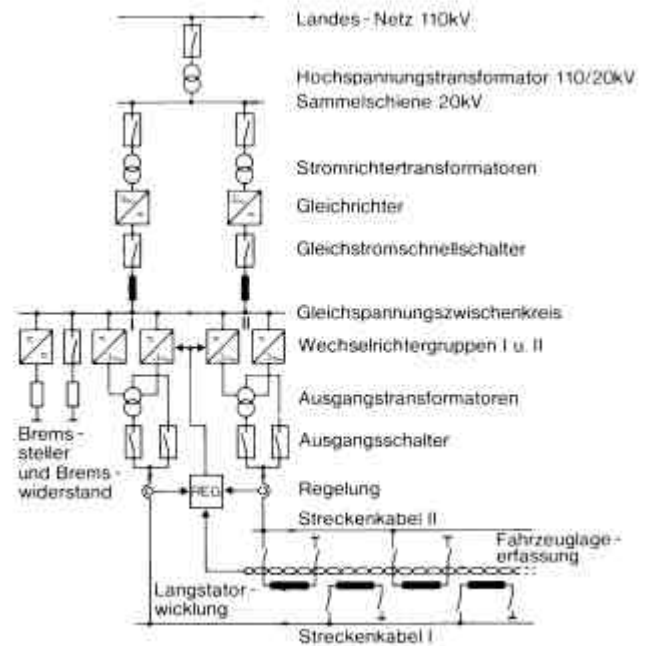


Abb. 6: Energieversorgung des Antriebs, Übersichtsschaltbild

Die Fahrstrecke des Transrapid ist in Motorspeiseabschnitte eingeteilt; dies hat den Vorteil, daß lediglich die jeweils befahrenen Streckenabschnitte mit Energie versorgt werden müssen. Außerdem braucht man die einzelnen Streckenabschnitte nur mit der üblicherweise erforderlichen Leistung auszustatten, da diese einen spezifischen Leistungsbedarf haben. Beispielsweise erfordert eine Beharrungsstrecke grundsätzlich weniger Leistung als eine Beschleunigungsstrecke (z.B. hinter Bahnhöfen oder an Steigungen). Lokomotiven sind hingegen dauerhaft mit ihrer maximal benötigten Leistung ausgestattet und müssen diese ständig mit sich führen.

4. "Elektrosmog"

Die Exposition durch elektrische und magnetische Felder, umgangssprachlich "Elektrosmog", bietet gerade bei einem Verkehrsmittel wie der Magnetschwebbahn Transrapid Anlaß zu Befürchtungen über die Gefährdung von Fahrgästen und Mitarbeitern. Deshalb war die Versuchsstrecke im Emsland 1994 Objekt der Untersuchungen der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin.

Das Gutachten weist aus, daß die Hauptquellen der magnetischen Felder in den Trag- und Antriebssystemen liegen. Diese erzeugen sowohl Gleichfelder, als auch Wechselfelder variabler Frequenz bis zu 230 Hz. Da der Transrapid auf dem anziehenden Prinzip beruht, die Tragmagnete weit unterhalb des Fahrgastraumes liegen und die Abstände zwischen Tragmagneten und Reaktionsschienen klein sind, seien diese Felder räumlich sehr stark auf den Nutzungsort konzentriert und nur geringe Streuanteile erreichten die für Menschen zugänglichen Bereiche. Der Untersuchung zufolge liegt die Stärke der elektrischen Felder im Fahrzeuginneren und im für Menschen zugänglichen Teil der Anlage unter 10 V/m, d.h. in der Größenordnung der in bewohnter Umgebung vorhandenen Hintergrundfeldstärken und damit um mindestens zwei Größenordnungen unter den international empfohlenen Grenzwerten für 24stündige Exposition. [5] Eine Gefährdung der Gesundheit sowohl des Personals, als auch der Fahrgäste könne nach dem gegenwärtigen Stand der gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisse ausgeschlossen werden. [6]

5. Umweltaspekte

Die Debatte um das Für und Wider der Errichtung einer Magnetschnellbahnstrecke zwischen Hamburg und Berlin dauert an. Die Lager der Befürworter und Gegner stehen unversöhnlich gegenüber. Während die einen im Transrapid ein Sinnbild des technologischen Fortschritts sehen, ahnen die anderen in ihm ein weiteres Milliardengrab. Doch so beredt die Interessenvertreter auch sind, zu einer Versachlichung der Diskussion tragen sie kaum bei; folgende Äußerungen aus der Politik illustrieren das gesamte Spektrum der Debatte:

- "Den Bau der Transrapid-Strecke Hamburg-Berlin lehnen wir ab. Er ist verkehrs- und wirtschaftspolitisch sinnlos und bürdet der Deutschen Eisenbahn und dem Bund Risiken in Milliardenhöhe auf."
Bundestagswahlprogramm 98 der GRÜNEN
- "Die Entwicklung und praktische Anwendung der Magnetschwebbahn Transrapid ist ein herausragendes Beispiel modernster europäischer Technologie, das in der Verkehrs- und Wirtschaftspolitik eindrucksvoll den Weg in die Zukunft weist."
Matthias Wissmann (CDU) als Bundesverkehrsminister

Die Befürworter des Transrapid führen u.a. seine Umweltfreundlichkeit ins Feld. Die Magnetschnellbahn benötige bei der Trassierung weniger Platz und zeige im Betrieb einen geringeren Energieverbrauch bei niedrigerer Geräuschentwicklung. Sie schließe dank großer Beschleunigung und Spitzengeschwindigkeit die Lücke zwischen Eisenbahn und Flugzeug und könne Berlin vor dem drohenden Verkehrsinfarkt retten. Ferner werde sich der Transrapid als Exportschlager erweisen, wenn erst eine reguläre Strecke in Betrieb genommen sei.

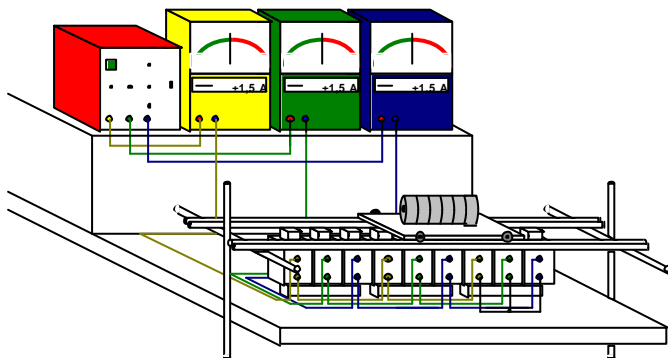


Abb. 7: Skizze und Abbildungsausschnitt des Versuchs zum synchronen Linearmotor

Die Gegner des Transrapid bezweifeln die meisten dieser Argumente; die prognostizierten Fahrgastzahlen von 9 bis 14,5 Mio. Fahrgästen pro Jahr seien utopisch. Außerdem sei der Betrieb mit einer Streichung aller anderen Fernbahnverbindungen verbunden. Der Zeitgewinn durch den Transrapid sei nur unwesentlich, und de facto gäbe es keine Lücke zwischen Flugzeug und Eisenbahn mehr.

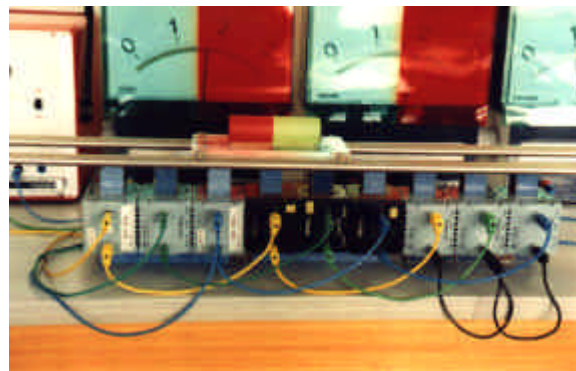
Ein großer Streitpunkt zwischen Gegnern und Befürwortern ist der Energieverbrauch von Transrapid und ICE; streitig ist, auf welche Fahrzeuglängen, welche Bestuhlungsdichten, welche Auslastungszahlen und welche Fahrzeugversionen sich die Berechnungen beziehen sollen.

Die Schweriner Volkszeitung hat im Internet ein Diskussionsforum [7] eingerichtet, in dem Gegner und Verfechter des Transrapid über ein breites Spektrum von Themen diskutieren.

Auf diesen Seiten findet man die gesamte Palette von Pro- und Contra-Argumenten, sowie eine große Anzahl von Links zu weiteren Quellen. In diesem Rahmen sei nur auf zwei Studien zum Energiebedarf und zur Wirtschaftlichkeit des Transrapid verwiesen. [8]

Der Lehrstuhl für TechnikWirkungs- und Innovationsforschung der Universität GH Kassel hat mit dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie ICE und Transrapid gegenübergestellt. Dabei wurde unter der Prämisse des Bedarfs einer Hochgeschwindigkeitsverbindung zwischen Hamburg und Berlin die Ressourcenproduktivität beider Systeme verglichen. Zur Messung dieser ökologischen Größe wurde das Konzept des Materialinput pro Serviceeinheit (MIPS) gewählt. MIPS umfaßt die gesamten stofflichen Inputs für Errichtung und Betrieb von Produkten bzw. Dienstleistungen und schließt in diesem Fall die Kategorien abiotische Rohmaterialien, Wasser und Luft ein.

"Der Technologievergleich zeigt deutlich, daß der Transrapid prinzipiell bei identischer Geschwindigkeit weniger Ressourcen verbraucht als ein ICE. Wird er mit Geschwindigkeiten deutlich unter 400 km/h betrieben, so wäre sein Einsatz unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenproduktivität dem ICE vorzuziehen. [...] so zeigen die Ergebnisse, daß bei einem leichten Abrücken von der politischen Vorgabe von einer Fahrzeit von genau einer Stunde hin zu Höchstgeschwindigkeiten von nicht mehr als 350 km/h, eine Fahrt mit dem Transrapid weniger Ressourcen verbrauchen würde als eine mit einem ICE, selbst wenn dieser zu zweidritteln bestehende bzw. andere in Bau befindliche Hochgeschwindigkeitstrassen nutzen würde." [9]



6. Das Modell des synchronen Linearmotors

Im folgenden soll ein Modell des synchronen Linearmotors skizziert und weitgehend mit Schulmitteln aufgebaut werden. Um eine Drehspannung variabler Frequenz und Drehrichtung zu erhalten, verwenden wir einen Dreiphasen-Generator. Bei Frequenzen weit unter einem Hertz bietet er die Möglichkeit, inne zu halten und die Phasenlage in den drei Zweigen in Ruhe zu betrachten.

Dort sind je drei Elektromagnete in Reihe geschaltet. Im Experiment haben sich Spulen mit 600 Windungen (9 mH) bewährt. Weiterhin befindet sich in jedem Zweig ein analoges Strommeßgerät in Mittelstellung; rot-grüne Markierungen oder transparente Farbfolien vor der Skala zeigen die Orientierung des Magnetfeldes der Elektromagnete jedes Zweiges an (Abb.

7b; rot im Bild dunkel, grün hell). Die drei Zweige sind in Sternschaltung verbunden. Da in jedem einzelnen gleiche Lasten herrschen, erübrigt sich sogar ein Nulleiter (Abb. 8). Die Spulenkörper werden nun abwechselnd (erste Spule der Phase R, erste Spule der Phase S, erste der Phase T, zweite Spule der Phase R usw.) auf E-förmige oder entsprechend angeordnete Eisenkerne gesteckt. Auf diese Weise hat man ein elektromagnetisches Wanderfeld erzeugt. D.h. es ändern sich zwar mit der Frequenz der Wechselspannung Betrag und Orientierung der ortsfesten Magnetfelder der einzelnen Elektromagnete, doch entsteht in der Überlagerung ein Magnetfeld, welches sich fortzubewegen scheint und den Erregermagneten auf dem Wagen mit sich zieht. Im Unterschied zum Original sind im Modell leider Spulen notwendig. Während sich das Vorbild bei einem Motorstrom von 1200 A mit einfachen Wicklungen bescheiden kann, muß man hier bei entsprechend geringeren Stromstärken die Windungszahl erhöhen.

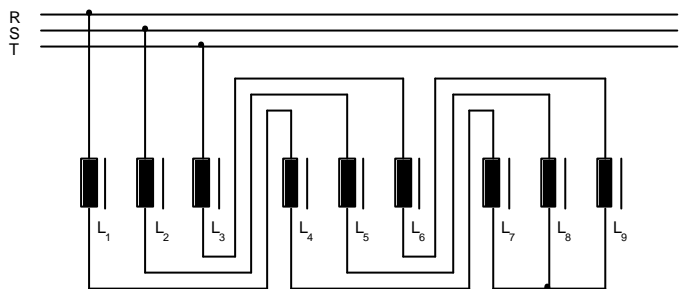


Abb. 8: Schaltskizze zum synchronen Linearmotor in der Topologie des Versuchsaufbaus

Die Fahrbahn, die dicht oberhalb der Eisenkerne beginnen sollte, läßt sich aus Stativmaterial leicht herstellen. Der Wagen besteht aus einer Plexiglasplatte mit leichtgängigen Rollen. Obenauf ist ein Stabmagnet befestigt, der aus einzelnen Scheiben besteht, welche als Schwebemagneten oft zu Demonstrationszwecken verwendet und paarweise von Leybold vertrieben werden (vgl. Abb. 9a). Mit Hilfe der Scheiben läßt sich der Stabmagnet in geeigneter Länge zusammensetzen. Es ist am günstigsten, wenn die Stablänge der Polteilung des Wanderfeldes entspricht. Wegen der Geometrie des Aufbaus entspricht das hier dem anderthalbfachen Abstand zweier Spulennitten.

Ein weiterer, interessanter Aspekt der Magnetschwebbahn, der sich zu behandeln lohnt, ist das elektromagnetische

Schweben. Dieser läßt sich an Hand eines physikalischen Spielzeugs erörtern. Hierbei wird eine magnetische Kugel durch einen Elektromagneten nach oben gezogen. Dabei durchbricht diese eine Lichtschranke, was den Magneten abschaltet; die Kugel fällt wieder und gibt die Lichtschranke frei. Der Vorgang beginnt von neuem; die Kugel schwebt. Hierin hat man ein einfaches System elektromagnetischen Schwebens mit einem Abstandssensor und einer Steuereinheit (Abb. 9b). Die Spiegelkugel wird zu Dekorationszwecken von unten angestrahlt. Dies ist nicht mit der Lichtschranke zu verwechseln, welche in Höhe der Oberseite der Kugel liegt.

7. Vergleich

Ein Modell gibt Anlaß, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen ihm und seinem Vorbild zu diskutieren. Der beschriebene Versuch ermöglicht es, ein elektromagnetisches Wanderfeld zu erzeugen, welches den Wagen mit dem Stabmagneten als Erregermagneten bewegt. Ein Unterschied be-

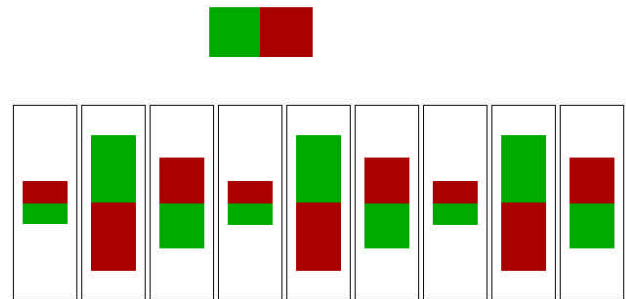


Abb. 10: Momentaufnahme einer Computersimulation zum Versuchsaufbau: Intensität und Polarität der Elektromagnetfelder

steht in der Erzeugung des Wanderfeldes. Beim Transrapid werden einfache, sich überlagernde Windungen verwendet, während im Versuch Elektromagnete eingesetzt werden. Gemein ist ihnen die Überlagerung ortsfester, phasenverschobener magnetischer Wechselfelder zu einem Wanderfeld.

Dieser Versuchsaufbau ist in idealer Weise dazu geeignet, Drehstrom und den Drehstrom- bzw. Linearmotor zu veran-



Abb. 9: Beispiele dynamischen und elektromagnetischen Schwebens

schaulichen, wenn man bei niedrigen Frequenzen die Ströme in den einzelnen Zweigen betrachtet und die Entstehung und Wirkung des Wanderfeldes im Zeitlupentempo verfolgen kann.

Bei größeren Frequenzen stößt das Modell mit der verhältnismäßig kurzen Strecke an seine Grenzen. Insbesondere bei der Beschleunigung des Wagens weichen Fahrzeuglage und Phasenwinkel des Stromes schnell voneinander ab, was eine ruckartige Fahrt zur Folge hat. Dies läßt sich zwar abmildern, indem das Fahrzeug mit einer Anfangsgeschwindigkeit ausgestattet wird, ganz abzustellen ist es aber nicht. Deshalb wird beim Transrapid der Phasenwinkel an die Fahrzeuglage angepaßt.

Alternativ zum Versuch oder ergänzend kann man Computersimulationen beliebiger Komplexität einsetzen. In der oben skizzierten, einfachen Simulation (Abb. 10) ist der Versuchsaufbau nachgebildet: Über eine Anordnung von neun Elektromagneten (äußere Rechtecke) gleitet der Erregermagnet in Form eines Stabmagneten hinweg. Innerhalb der Elektromagnete sind, Stabmagneten gleich, Intensitätsanzeigen angeordnet, die über die Polarität und qualitativ über die Stärke des Magnetfeldes Auskunft geben - je länger die Anzeige, desto größer das Magnetfeld. Der Erregermagnet folgt dann dem Wanderfeld. Die Frequenz des Drehstromes, also die Geschwindigkeit des Fahrzeuges, läßt sich beliebig langsam wählen; der Drehsinn kann umgekehrt werden. So zeigt diese Simulation auch ohne teuren Apparateaufwand, wie die zeitliche Abfolge bei einem Dreiphasen-Wechselstrom ist, wie sich in der Überlagerung aus lokalen, phasenverschobenen Schwankungen ein elektromagnetisches Wanderfeld ergibt.

8. Der Linearmotor im Unterricht

Bei der Diskussion experimenteller und didaktischer Aspekte beschränkt sich die didaktische Literatur meist auf den Gleichstrom- und den asynchronen Linearmotor [10], [11]. Obwohl beide Systeme im Aufbau vergleichsweise einfach sind, ist beispielsweise der Gleichstrom-Linearmotor wenig praktikabel, da er ein manuelles oder automatisiertes Umpolen des Stromes erfordert [10]. Der asynchrone Linearmotor ist zwar im Gegensatz zur synchronen Variante genügsam im Aufbau, dennoch fällt die auf Induktion fußende Erklärung im Unterricht ungleich schwerer.

Dieser Beitrag mag dazu dienen, das Thema Linearmotor/Transrapid im Unterricht zu behandeln. Sollte ein experimenteller Zugang zum synchronen Linearmotor an der Lehrmittelausstattung scheitern, so kann zumindest seine asynchrone Variante vorgestellt werden [11], [12]. Zum synchronen Linearmotor/Transrapid bieten das Internet [2], [13-15], CD-ROMS, Videofilme, Fernsehbeiträge, Zeitungs- und Zeitschriftenartikel sowie Computersimulationen reichhaltig Stoff zur Diskussion. Insbesondere sei auf drei Artikel hingewiesen; C. LUKNER behandelt die Einbindung des Transrapid in einen projektorientierten Unterricht [16]. ROLF FISCHPERER stellt den Antrieb des Transrapid vor [17], während JÜRGEN MIERICKE den Themenbereich "Magnetisches Schweben" als Projektarbeit in einem Pluskurs an einem bayerischen Gymnasium beschreibt [18].

Schließlich ist das Thema Linearmotor/Transrapid dazu geeignet, sowohl physikalisch-technische Aspekte wie Magnetismus, Drehstrom, Drehstrom- und Linearmotor als auch beispielhaft die Vielschichtigkeit komplexer Systeme zu behan-

deln. Außerdem zeigt sich, daß bei der Informationsbeschaffung neue Medien, insbesondere das Internet, immer wichtiger werden. Vertiefende Diskussionen helfen, solche Quellen zu interpretieren und ihre Aussagen zu gewichten.

Die oben beschriebene Computersimulation kann gegen Einsendung einer Diskette von den Autoren bezogen werden.

9. Anschrift der Verfasser:

Markus Uhlenbrock,
Dr. Volkhard Nordmeier,
Prof. Dr. H. Joachim Schlichting
Universität GH Essen
FB 7 Physik - Didaktik der Physik
Universitätsstraße 2
45117 Essen

10. Literatur:

- [1] H.-J. Gutt: Vor- und Nachteile des Wanderfeldmotors im Vergleich zum Drehstrommotor. In: K. Giessen (Hrsg.): Linearmotoren in der Industrie. Haus der Technik - Vortragsveröffentlichungen Heft 319. Vulkan-Verlag, Essen 1973. S. 15 f.
- [2] Internet: <http://transrapid.simplenet.com> am 18.11.1996
- [3] Horst Heßler u. Hans Georg Raschbichler: Die Magnet-schwebbahn Transrapid. In: Magnetbahn Transrapid - Die neue Dimension des Reisens. Darmstadt o.J. S. 13.
- [4] Günter Ciebow et al.: Der Linearmotor und seine Energieversorgung. In: Magnetbahn Transrapid - Die neue Dimension des Reisens. Darmstadt o.J. S. 55.
- [5] Bundesanstalt für Arbeitsmedizin (Hrsg.): Schienengebundene Transportsysteme. Teil 1: Exposition durch statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder an der Magnetschwebbahn Transrapid 07 (Untersuchungsbericht). Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1995. S. 6.
- [6] Ebd. S. 61.
- [7] Internet: <http://www.svz.de/forum/transrapid/index.html>
- [8] Internet: <http://ourworld.compuserve.com/homepages/vrb/TRETITEL.HTM>
Internet: <http://ourworld.compuserve.com/homepages/vrb/TRWTITEL.HTM>
- [9] Volker Gers et al.: Zur Ressourcenproduktivität von spurgeführten Hochgeschwindigkeitssystemen: Vergleich von ICE und Transrapid. Kurzfassung. Wuppertal Papers Nr. 75. S. 16 f.
- [10] G. Sperber: Linearmotor und Lineargenerator. NiU-P/C 2/20. Jg. 1972, S. 56-59.
- [11] H.-J. Wilke: Die elektromagnetische Induktion in Experimenten - Wirbelströme in magnetischen Wechselfeldern (Teil 7). PhyS 11/32. Jg. 1994, S. 375-376.
- [12] Richard Hagner: Der Linearmotor - Bearbeitung eines physikalisch-technischen Problems mit schulgemäßen Mitteln. NiU-P/C 49/37. Jg. 1989, S. 28-33.
- [13] Internet: <http://www.mvp.de>
- [14] Internet: <http://www.magnetschnellbahn.de>
- [15] Internet: <http://www.maglev.de>
- [16] C. Lukner: Die Magnetschnellbahn Transrapid - als aktuelles Thema eines projektorientierten Unterrichts. PdN-Ph. 8/44. Jg. 1995. S. 32-36.
- [17] Rolf Fischperer: Der Transrapid. PhiuZ 2/29. Jg. 1998. S. 79-83.

- [18] Jürgen Miericke: "Magnetisches Schweben" - Projektarbeit in einem Pluskurs. In: Wege in die Physik Bd. 3. Erlangen 1993. S. 293 - 304.

11. Bildnachweis:

- (1) <http://transrapid.simplenet.com/gallery/07himmel.jpg>
am 28.04.1998
- (2a) <http://transrapid.simplenet.com/gallery/eet.jpg> am
28.04.1998
- (2b) <http://transrapid.simplenet.com/gallery/mbb-prin.jpg>
am 28.04.1998
- (3) Thyssen Henschel: Magnetfahrtechnik. Magnetschnellbahn Transrapid. o.O. o.J. S. 3.
- (4) MVP Versuchs- und Planungsgesellschaft für Magnetbahnsysteme: Die Magnetschnellbahn Transrapid ist einsatzreif. o.O. o.J. S. 2.
- (5) Thyssen Henschel: Magnetfahrtechnik. Magnetschnellbahn Transrapid. o.O. o.J. S. 4.
- (6) Günter Ciebow et al.: Der Linearmotor und seine Energieversorgung. In: Magnetbahn Transrapid - Die neue Dimension des Reisens. Darmstadt o.J. S. 52.
- (7-10) Markus Uhlenbrock