

Die folgenden Seiten beinhalten ein Manuskript, das bei der Zeitschrift „Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule“ eingereicht wurde.

Die exakte Quellenangabe des erschienenen Artikels ist:

WILHELM, T.

***Der asynchrone Linearmotor - einfachst nachgebaut***

Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule 51, Nr. 2, 2002, S. 25 - 29

# Der asynchrone Linearmotor – einfachst nachgebaut

T. Wilhelm

## 1 Einleitung

Die Magnetschwebbahn Transrapid und die ins Auge gefassten Strecken tauchen immer wieder in den Medien auf und werden kontrovers diskutiert. Erfahrungen in einem Unterrichtsprojekt [1] und in Vorträgen zeigen, dass Schüler die Magnetschwebbahn sehr fasziniert und motiviert, insbesondere wenn sie selbst einen Linearmotor nachbauen dürfen. So meint auch Lukner [2], dass sich der Transrapid hervorragend für einen fächerübergreifenden und projektorientierten Unterricht eignet. Uhlenbrock et al. [3] haben einen sehr guten Überblick über Geschichte, Antrieb und Umweltaspekte des Transrapids gegeben.

## 2 Technik des Transrapids

Faszinierend beim Transrapid ist sowohl die Schwebetechnik als auch die Antriebstechnik. Zum Schweben besitzt der Transrapid starke Elektromagnete, die das Fahrzeug, das seitlich unter den Fahrweg greift, von unten an den Fahrweg aus ferromagnetischem Material heranziehen und es anheben (Elektromagnetisches Schweben). Die Tragsmagnete sind Gleichstrommagnete mit in fast 20 cm Abstand wechselnder Polung (siehe Abb. 1), die durch ein elektronisches Regelsystem über Sensoren einen gleichbleibenden Abstand von rund 10 mm zwischen Fahrzeug und Fahrweg erzeugen.

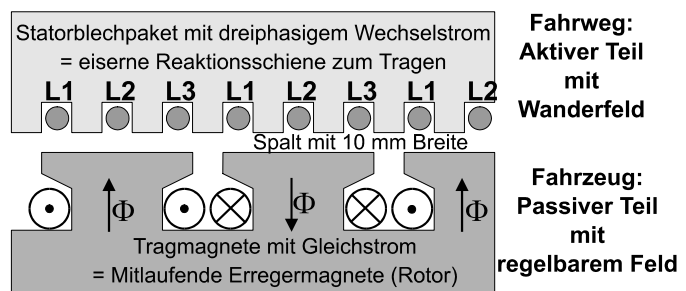


Abbildung 1: Blick von Seite auf den Querschnitt des synchronen Langstator-Linearmotor (Prinzipische Skizze)

Als Antrieb hat der Transrapid einen synchronen Langstator-Linearmotor. Dabei befinden sich im Fahrweg Statorblechpakete mit sich überlagernde Wicklungen, in denen ein sehr hoher dreiphasiger Wechselstrom fließt, wodurch ein lineares Wanderfeld entsteht (Langstator) (Siehe Abb. 2). Das Fahrzeug wird durch seine Tragsmagnete, die außer zum Tragen bzw. Schweben gleichzeitig als Erregerteil (Rotor/Läufer) wirken, mit dem Wanderfeld mit

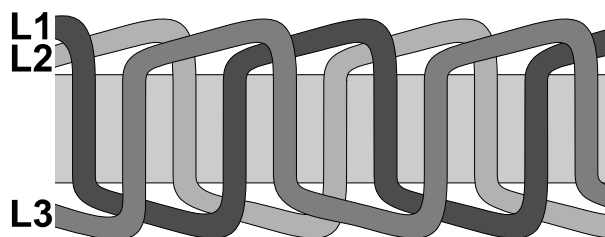


Abbildung 2: Blick von unten auf die Wanderfeldwicklungen des Statorbleches (Prinzipische Skizze)

*gleicher* Geschwindigkeit mitgezogen (*synchroner* Linearmotor). Im Luftspalt von 10 mm zwischen Tragmagneten und Schiene steht das Magnetfeld schief und zieht den Zug nicht nur nach oben, sondern auch nach vorne, so dass eine Kopplung von Tragen und Antreiben vorliegt. Durch das lineare Wanderfeld wird gleichzeitig elektrische Leistung an das Fahrzeug zum Aufladen der Bordbatterien und für die Trag- und Führungsmagnete übertragen.

### **3 Vorgeschlagene Versuchsaufbauten**

Uhlenbrock et. al. [3] haben einen Versuchsaufbau für einen synchronen Linearmotor für eine sehr kurze Fahrstrecke vorgestellt, der aber leider an der Lehrmittelausstattung der meisten Schulen scheitert, so dass sie auf Versuchsaufbauten für Gleichstromlinearmotore oder für asynchrone Linearmotore in der didaktischen Literatur verweisen (Ein Asynchronmotor = Induktionsmotor hat wie ein Synchronmotor ein räumlich veränderliches Magnetfeld im Ständer, aber das Magnetfeld im Läufer wird induktiv erzeugt.)

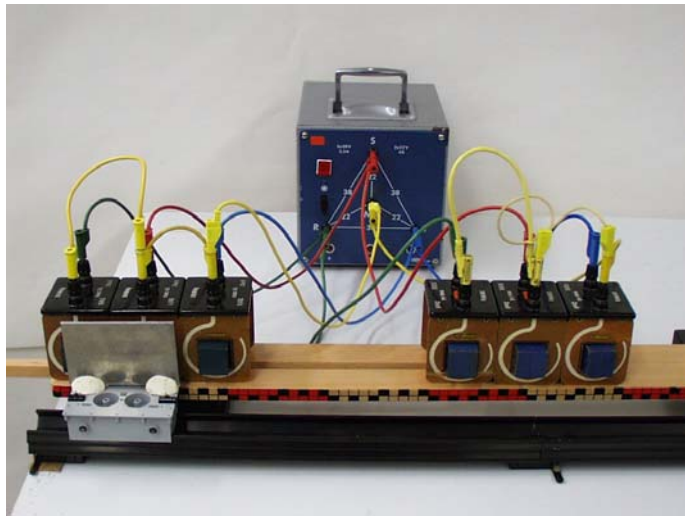
Die Gleichstromlinearmotore von Sperber [4] sind wenig praktikabel, da ein schwieriges Umpolen (manuell oder automatisch) des Stromes nötig ist, und der asynchrone Linearmotor von Sperber [4] ist trotz den nötigen 380 V nicht überzeugend. Bei dem Versuchsaufbau von Hagner [5] und physikalisch äquivalent bei dem Versuchsaufbau von Bader [6] wird ein ferromagnetischer Eisenkern als Modell eines Fahrzeugs im Inneren von feststehenden Spulen gezogen, was kaum an ein Fahrzeug erinnert. Bei dem sehr gut funktionierenden Versuch von Helms und May [7] sind umgekehrt die Spulen auf einem beweglichen Wagen und der ferromagnetische Eisenkern in ihrem Inneren ist festgemacht. Dies ist aber zum Antrieb eines Verkehrsmittels auch nicht verwendbar, da der Wagen sich nur über die kurze freie Strecke zwischen den Befestigungspunkten der Eisenstange bewegen kann. Bei diesen zwei Varianten wirkt das Magnetfeld jeweils parallel zur Wanderrichtung des Feldes, was man einen longitudinalen Linearmotor nennt. Bei realistischen Linearmotoren liegt das Magnetfeld senkrecht zur Wanderfeldrichtung, so dass ein transversaler Linearmotor vorliegt. Am ehesten scheint noch der aufwendige asynchrone Linearmotor von Wilke [8] geeignet, bei dem das Magnetfeld im Fahrzeug erzeugt wird und der Fahrweg aus Aluminium besteht. Der Versuch ist zur Durchführung durch Schüler allerdings nicht geeignet, da er Netzspannung benötigt.

In Anbetracht dieser Versuchsvorschläge ist es umso überraschender, dass es in einem Projekt zum Thema Induktion in einer 10. Klasse zwei Projektgruppen schafften, zwei asynchrone transversale Linearmotoren zu bauen, bei denen wie im Transrapid das Wanderfeld im Fahrweg erzeugt wird [1]. Diese Versuchsaufbauten wurden nun weiter so optimiert, dass sie leicht nachgebaut werden können.

#### 4 Ein einfacher Versuchsaufbau

An sehr vielen Schulen ist ein Drehstromtrafo 22/38 V, 4 A vorhanden, mit dem die hier beschriebenen Versuche sehr gut durchgeführt werden können. Da 22 V relativ ungefährlich sind, kann man auch Schüler damit experimentieren lassen. Besitzt die Physiksammlung keinen solchen Drehstromtrafo, kann man nach einem Vorschlag von Hagner [5] mit etwas elektronischer Bastelerfahrung mit einem Drehstrom-Stecker und drei Schuko-Kupplungen eine Verzweigung bauen, um drei Netzgeräte (Trafos) an jeweils eine Phase der Drehstromsteckdose und an den Neutralleiter anzuschließen.

Eine oder besser zwei Leybold-Schülerfahrbahnen (Eine Phywe-Fahrbahn geht auch, hat aber etwas mehr Reibung.) werden mit einem Verbindungsstück, mit dazupassendem Wagen und evtl. einem Stopper am Ende der Bahn (evtl. Knetmasse verwenden) auf den Versuchstisch gestellt. Auf der dem Beobachter abgewandten Seite des Wagens wird eine Aluminiumplatte (mindestens 6 cm x 11 cm x 0,4 cm groß) mit etwas

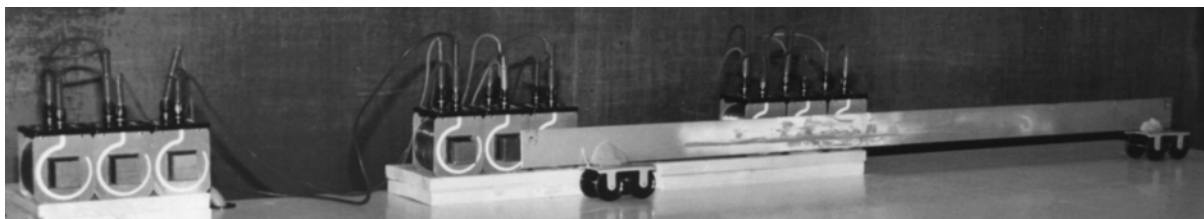


**Abbildung 3: Asynchroner Linearmotor mit Spulen im Fahrweg**

Knetmasse befestigt (siehe Abb. 3). Hinter der Fahrbahn werden drei Phywe-Spulen mit je 300 Windungen und mit stabförmigen, geblättern Eisenkerne (Querschnitt 2,9 cm x 3,0 cm) direkt nebeneinander aufgestellt und in Sternschaltung (jede Spule an eine Phase und an die Erde) an 22 V eines Drehstromtrafos angeschlossen, wobei man hiermit die Bewegungsrichtung festlegt, da sich der Wagen in die Richtung R-S-T bzw.  $L_1$ - $L_2$ - $L_3$  bewegen wird. Daneben können noch einmal drei Spulen mit Eisenkernen gestellt werden, die genauso - also parallel zu den ersten - angeschlossen werden (Sollten dabei die Sicherungen des Drehstromtrafos überlastet sein, muss man zwei Spulentripel in Reihe schalten und kann dazu ein drittes Spulentripel parallel schalten). Mit Hilfe von Unterleghölzern muss man sicherstellen, dass die Eisenkerne genau in der Höhe der Aluminiumplatte stehen. Schließlich muss man kontrollieren, dass beim Fahren des Wagens die Aluminiumplatte zwar an keinen Eisenkern anstößt, aber von allen Eisenkernen nur einen sehr geringen Abstand von wenigen Millimetern hat. Wenn alles richtig eingestellt ist, stellt man den Wagen an die erste Spule. Beim Einschalten des Drehstromes beginnt der Wagen loszufahren.

Zwar erzeugt jede einzelne Spule nur ein Wechselfeld senkrecht zur Bewegungsrichtung (transversaler Linearmotor), es entsteht aber insgesamt ein Magnetfeld, das in Richtung der Fahrbahn wandert (lineares Wanderfeld). In der Aluminiumplatte entstehen durch Induktion Ströme und dadurch eine Kraft. Nach der Lenzschen Regel muss sich der Aluminiumleiter mit dem Magnetfeld mitbewegen, wobei er aber wesentlich langsamer als das Magnetfeld ist (*asynchroner* Linearmotor). Während hier zur Erzeugung des Wanderfeldes Elektromagnete (Wicklungszahl  $n = 300$ ) benutzt werden, werden beim Transrapid einfache, sich überlagernde Windungen (Windungszahl  $n = 1$ ) verwendet, in denen ein Strom von 1200 A fließt. In beiden Fällen überlagern sich die ortsfesten, phasenverschobenen Wechselfelder aber zu einem Wanderfeld.

In einem Unterrichtsprojekt zum Thema Induktion [1] stand sogar eine regelbare Drehstromquelle mit bis zu 230 V (in Sternschaltung) zur Verfügung. Zwar darf hier nur die Lehrkraft den Drehstrom einschalten, aber mit der hohen Spannung funktionieren bereits schlechtere Aufbauten. Als erstes haben die Schüler neun Spulen (= drei Spulentripel) mit je 600 Windungen und je einem Eisenkern nebeneinander gestellt, wobei Spulen gleicher Phase in Reihe geschaltet wurden. Die Spulen wurden dabei mit ihrem Eisenkern nach oben aufgestellt und eine Glasplatte daraufgelegt, so dass eine Aluminiumplatte bei angelegten 230 V auf dieser Glasplatte entlanggezogen wurde. In einer zweiten Variante stellten dann Schüler eine lange, schmale Aluschiene mit etwas Knetmasse auf zwei Phywe-Experimentierwägelchen und kippten die Spulen so, dass die Eisenkerne horizontal lagen (siehe Abb. 4). Wurde das Fahrzeug, das nun aus der langen



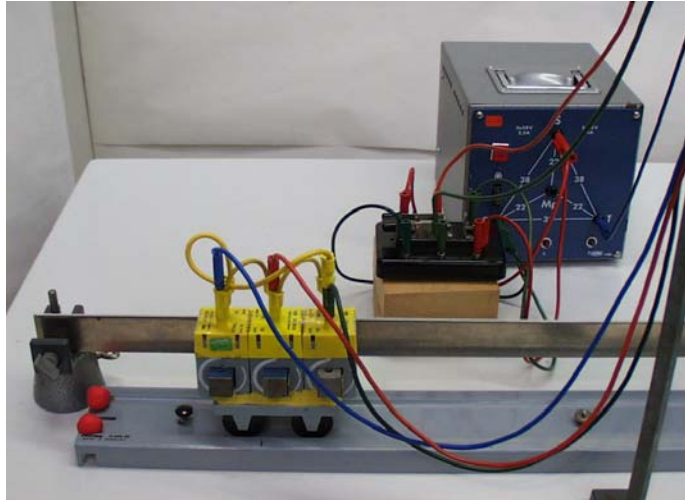
**Abbildung 4: Linearmotor einer Schülergruppe im Unterrichtsprojekt**

Aluschiene bestand, neben die Spulen gestellt, so rollte es an ihnen vorbei und rollte am Ende der Spulen noch weiter. Leider sind bei diesem Aufbau aber immernoch ca. 50 V nötig.

### **5 Umgekehrte Variante**

Etwas aufwendiger ist die umgekehrte Variante, bei der die Spulen im Fahrzeug sind. Eine Phywe-Fahrbahn mit dazupassendem Wagen (Eine Leybold-Schülerfahrbahn geht auch, der Fahrbahnwagen ist aber für drei Spulen etwas kurz.) wird hier auf den Versuchstisch gestellt und an den Enden Stopper angebracht (evtl. Knetmasse verwenden). Auf den Wagen werden drei kleine Phywe-Spulen für Schülerversuche mit je 400 Windungen gestellt und mit reichlich Tesafilm und Knetmasse untereinander und an den Wagen gut befestigt. In die Spulen werden

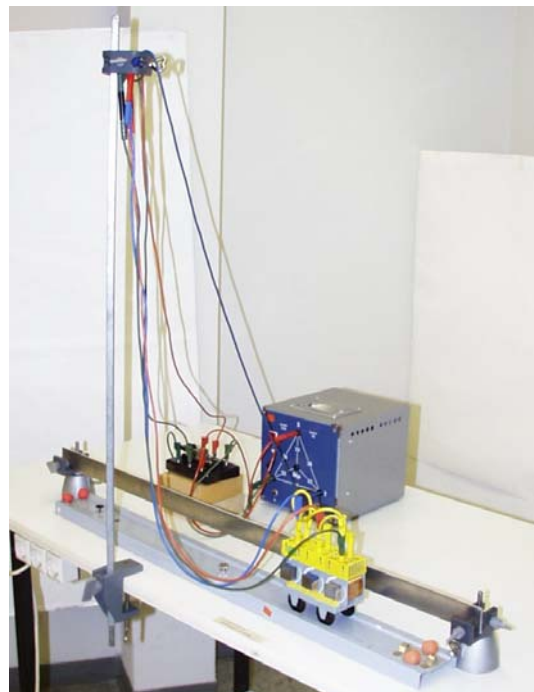
stabförmige, geblätterte Eisenkerne (Querschnitt 2,0 cm x 2,0 cm) gesteckt und zum besseren Halt zusätzlich etwas Pappe so hineingesteckt, dass die Eisenkerne nicht mehr verrutschen können. Auf der dem Beobachter abgewandten Seite des Wagens wird mit Hilfe von zwei Tonnenfüßen und zwei Doppelmuffen eine Aluminiumplatte (mindestens 4 cm x 100 cm x 0,4 cm groß) parallel zur Fahrbahn aufgestellt (siehe Abb. 5). Ideal eignet sich dafür die stabilere Leybold-Schülerfahrbahn, die aus schwarz angestrichenem Aluminium (Präzisions-Metallschiene) besteht. Beim Aufbau



**Abbildung 5: Asynchroner Linearmotor mit Spulen im Fahrzeug**

muss man sicherstellen, dass die Eisenkerne genau in der Höhe der Aluminiumplatte liegen. Schließlich muss man wieder kontrollieren, dass beim Fahren des Wagens die Eisenkerne zwar nirgends an der Aluminiumplatte anstoßen, aber überall von der Aluminiumplatte nur einen sehr geringen Abstand von wenigen Millimetern haben.

Direkt neben der Fahrbahn befestigt man mit einer Tischklemme eine lange Stativstange (siehe Abb. 6). Die Stromkabel werden von den Spulen mit etwas Spielraum hoch zur Spitze der Stativstange geführt, dort befestigt und weiter zum Drehstromtrafo geführt. Die Spulen werden in Dreiecksschaltung (erste Spule an R und S, zweite an S und T, dritte an T und R) an 38 V angeschlossen, so dass man mit nur drei Kabeln auskommt. Will man den Wagen einfach hin- und herfahren lassen, schaltet man noch einen Kreuzschalter (oder einen zweipoligen Wechselschalter) so ein, dass man damit zwei Phasen vertauschen kann, z.B. R und S. Wenn alles richtig eingestellt ist, stellt man den Wagen an den



**Abbildung 6: Überblick über den gesamten Versuchsaufbau**

Anfang der Fahrbahn. Beim Einschalten des Drehstromes beginnt der Wagen loszufahren. Kurz vor dem Ende der Fahrbahn legt man den Schalter um, so dass der Wagen abbremst und

sich in umgekehrte Richtung weiterbewegt.

So haben wir nun zwei faszinierende Linearmotore, die mit Schulmitteln leicht nachzubauen sind. Die störenden Zuleitungen zum Fahrzeug in der zweiten Variante zeigen einen Grund, warum man beim Transrapid die das Wanderfeld erzeugenden Spulen wie im ersten Versuch im Fahrweg hat.

## **6 Die lenzsche Regel**

Nachdem die experimentelle Durchführung geklärt ist, bleiben zwei Probleme: Wie erklärt man, dass ein Leiter einem sich bewegendem Magnetfeld folgt? Wie zeigt man, dass die ortsfesten Spulen ein wanderndes Magnetfeld erzeugen?

Der Grund für das Mitbewegen eines Leiters mit einem Magnetfeld ist die lenzsche Regel. Leider wird meist nur mit dem typischen Gerät der Lehrmittelfirmen das Waltenhofensche Pendel, bei dem eine Metallplatte zwischen den Polen eines starken Elektromagneten schwingt und durch entstehende Wirbelströme abgebremst wird, gezeigt und so der falsche Eindruck erweckt, die lenzsche Regel bedeute, alles käme zur Ruhe. Schon bei der Einführung der "Induktion im bewegten Leiter" sollte man Wert darauf legen, dass es nicht auf die Bewegung vom Leiter oder Magneten ankommt, sondern auf deren Relativbewegung zueinander.

Bewegt man einen Stabmagneten durch einen aufgehängten Metallring, von dem man zeigt, dass er nicht magnetisch ist, bewegt sich der Ring in die Bewegungsrichtung des Stabmagneten. Der Induktionsstrom fließt also so, dass die dadurch entstehende Kraft die Relativgeschwindigkeit verkleinert (= lenzsche Regel). Es ist dabei nicht nötig, sich die Stromrichtung im Metallring zu überlegen. In einem anderen Beispiel stellt man einen Stabmagneten, der drehbar gelagert ist, neben ein Teelicht-Aluminiumdöschen, das leer umgekehrt auf einer Nadel liegt [9]. Versetzt man den Stabmagneten in Drehung, dreht sich das Aluminiumdöschen mit. Aufgrund der lenzschen Regel muss man sich nicht mehr überlegen, wie der Induktionsstrom fließt und wie die Kraft wirkt, sondern sich nur merken, dass das Metall der Bewegung der Magnetpole folgt. Schließlich kann man auch über das Aluminiumdöschen einen Hufeisenmagneten an eine Schnur hängen, die man verdrillt, so dass sich der Hufeisenmagnet zu drehen beginnt. Man kann sich leicht vorstellen, dass sich auch hier das Döschen mit dem Magneten mitbewegt, und hat damit schon ein Modell für einen Drehstrommotor. Während es eigentlich schwer ist, sich ein drehendes Magnetfeld vorzustellen, ist dies hier offensichtlich. Einen einfachen Drehstrommotor erhält man, wenn man den rotierenden Hufeisenmagnet durch drei Elektromagnete (Spulen mit 600 oder 1200 Windungen) ersetzt, an die eine Drehstromquelle mit geringen Spannungen (z.B. 22 V) angeschlossen wird. Dem mit 50 Hz ro-

tierenden, zweipoligen Magnetfeld folgt der Kurzschlussläufer mit *geringerer* Winkelgeschwindigkeit (= *asynchron*). Nach diesem Prinzip lassen sich mit den Döschchen von Teelichtern viele verschiedene Asynchronmotore (= Induktionsmotore) bauen [10], wie z.B. einen Spaltpolmotor [9] oder einen Wechselstromzähler [11].

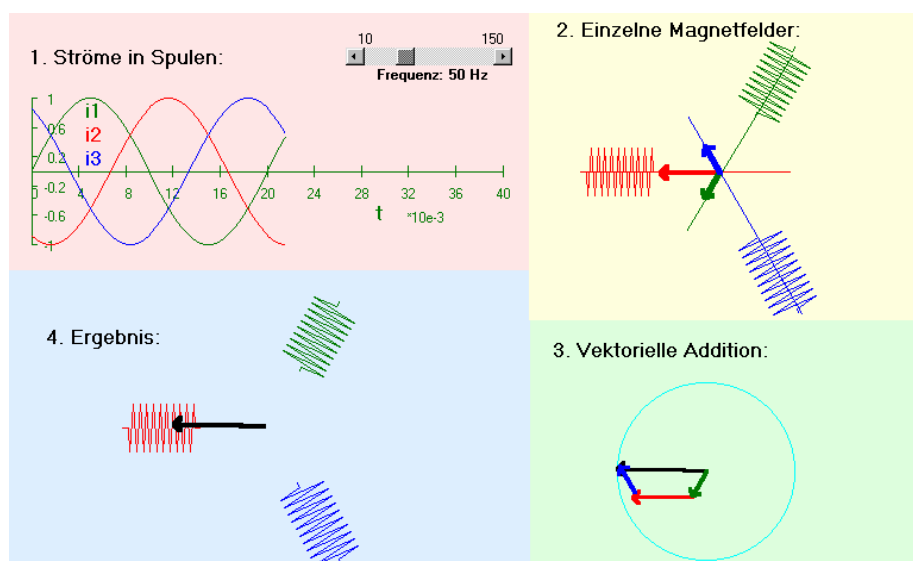
Insgesamt ist den Schülern nach dem hier skizzierten Vorgehen die lenzsche Regel auch in dem Sinne bekannt, dass ein elektrischer Leiter wie Aluminium einem sich bewegenden Magnetfeld aufgrund eines entstehenden Induktionsstromes und der daraus folgenden Kraft nachläuft bzw. von dem Magnetfeld mitgenommen wird.

## 7 Das Wanderfeld

Jede Spule erzeugt immer nur ein ortsfestes magnetisches Wechselfeld. Bei allen Asynchronmotoren muss man zeigen, wie aus der Überlagerung mehrerer solcher Felder ein sich bewegendes Magnetfeld wird - insbesondere bei den interessantesten Motoren: Drehstrommotor und Linearmotor.

Man könnte das rotierende äußere Magnetfeld eines Drehstrommotors versuchen zu zeigen, indem man als Läufer statt dem Aludöschchen eine Magnetnadel verwendet, die sich dann synchron mit 50 Hz mit dem äußeren Magnetfeld mitbewegt, und dies mit einem Stroboskop verdeutlichen. Eine Erklärungsmöglichkeit wäre, zu welchen Zeiten in welcher Spule gerade der Strom maximal ist. Das bedeutet, dass zu dem entsprechenden Zeitpunkt auf der dem Kurzschlussläufer zugewandten Seite der Spule z.B. gerade der Nordpol der Spule ist. Man stellt dann fest, dass dieser Nordpol um den Kurzschlussläufer herumläuft. Fraglich bleibt aber, was zwischen diesen Zeitpunkten passiert. Für eine genauere Betrachtung muss man die Magnetfelder der drei Spulen vektoriell addieren. Bei einer statischen Darstellung auf dem

Papier ist dies nur für einzelne Zeitpunkte möglich, so dass man eine dynamische Darstellung braucht. Eine solche Animation wurde mit PAKMA 2000 erstellt (siehe Abb. 7). Drei Spulen als Elektromagnete stehen um  $120^\circ$  versetzt und in den



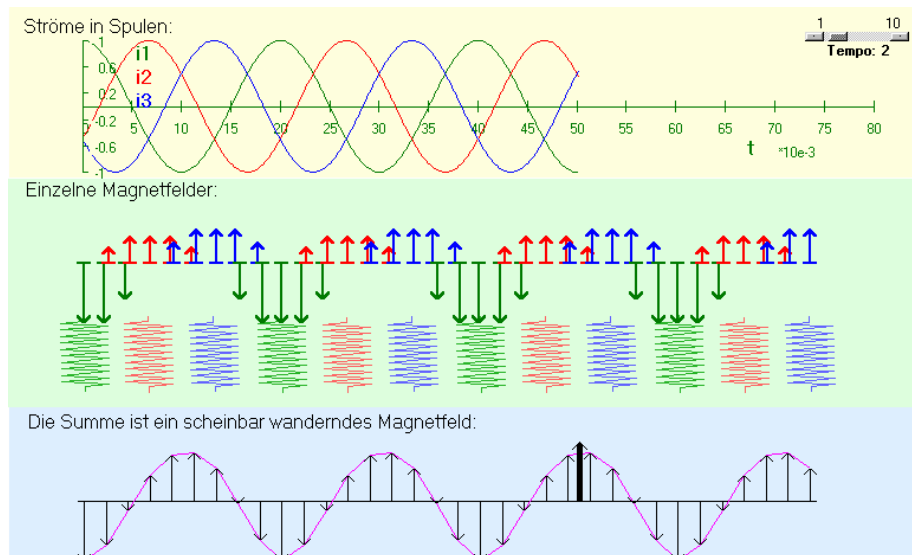
**Abbildung 7: Animation zur vektoriellen Addition der Spulenmagnetfelder im Drehstrommotor**



Spulen fließen phasenverschobene Wechselströme, wobei die Ströme in benachbarten Spulen jeweils zeitlich um  $T/3$  verschoben sind. Gezeigt wird das Magnetfeld jeder einzelnen Spule, sowie die vektorielle Addition der Teilmagnetfelder. Man sieht beim Ablauf, dass sich diese einzelnen Magnetfelder gerade so addieren, dass ein Gesamtmagnetfeld entsteht, dass mit einem konstanten Betrag mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert.

Beim Magnetfeld des Linearmotor begnügt man sich in der Regel damit, darauf hinzuweisen, dass hier nur der Drehstrommotor aufgeschnitten und gestreckt wurde, so dass aus dem Drehfeld ein Wanderfeld wird. In Wirklichkeit ist es etwas schwieriger, da das Drehfeld nur durch die Addition aller drei Spulenmagnetfelder und durch die spezielle Anordnung mit  $120^\circ$ -Winkeln entsteht. Deshalb wurde mit PAKMA 2000 eine Animation erstellt, die die Entstehung des Wanderfeldes zeigt. Wie in dem unter Abschnitt 4 vorgeschlagenen Versuchsaufbau stehen in dieser Simulation viele Spulen als Elektromagnete nebeneinander

(siehe Abb. 8). In den Spulen fließen phasenverschobene Wechselströme, wobei die Ströme in benachbarten Spulen jeweils zeitlich um  $T/3$  verschoben sind und Spulen mit phasengleichen Strömen die gleiche Farbe haben. Es wird der



**Abbildung 8: Animation zur vektoriellen Addition der Spulenmagnetfelder im Linearmotor**

Anteil des Magnetfeld jeder einzelnen Spule senkrecht zur Fahrbahn (y-Komponente) gezeigt, wobei das Magnetfeld einer Spule immer die gleiche Farbe wie die dazugehörige Spule hat. Schließlich wird das Gesamtmagnetfeld an jedem Ort dargestellt, das sich ergibt, wenn man im Überlappungsbereich der Teilmagnetfelder diese vektoriell addiert. Man sieht, dass diese vektorielle Addition ein Magnetfeld ergibt, das ähnlich wie eine Sinuswelle linear weiterläuft. Bei einem synchronen Linearmotor würde sich ein Magnet mit gleicher Geschwindigkeit mitbewegen, bei einem asynchronen Linearmotor würde ein Kurzschlussläufer mit geringerer Geschwindigkeit nachlaufen.

## 8 Schlussbemerkung

Die meisten heute verwendeten Motore sind Asynchronmotore, da sie im Gegensatz zu Stromwendermotoren geräuscharm, weitgehend wartungsfrei und ohne Funkstörungen laufen. Deshalb sollte man diese Motoren auch im Unterricht behandeln. Da sie einen sehr einfachen Aufbau haben, sind dazu viele Experimente in der Schule möglich und eignen sie sich besonders zum Nachbau durch die Schüler.

Der Transrapid steht immer wieder einmal in der politischen Diskussion, von der die Medien berichten, was dafür spricht, ihn auch im Unterricht zu behandeln. Die Aufmerksamkeit der Schüler ist einem dabei sicher. Aber erst dadurch, dass man in einer dynamischen Simulation zeigt, wie und welches Magnetfeld entsteht, ist die Erklärung der Wirkungsweise im Unterricht einfach möglich. Da der hier gezeigte Versuchsaufbau eines asynchronen Linearmotors mit Spulen im Fahrweg (siehe Abschnitt 4) sehr schnell und einfach aufgebaut ist, kann er ohne großen Vorbereitungsaufwand gezeigt werden.

## Literatur

- [1] T. WILHELM: Projekt: Faszination Induktion – In: M. LUDWIG (Hrsg.): Projekte im mathematisch naturwissenschaftlichen Unterricht, Verlag Franzbecker, Hildesheim, 2001, S.53-80 und:  
[http://www.gymnasium-marktbreit.de/projekte/physik\\_10a/index.html](http://www.gymnasium-marktbreit.de/projekte/physik_10a/index.html)
- [2] C. LUKNER: Die Magnetschnellbahn Transrapid als aktuelles Thema eines projektorientierten Unterrichtes - Praxis der Naturwissenschaften - Physik 44, 1995, Nr. 8, S. 32 - 36
- [3] M. UHLENBROCK – V. NORDMEIER – H. J. SCHLICHTING: Die Magnetschnellbahn Transrapid im Experiment - Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU) 53, 2000, Nr. 4, S. 220 - 226
- [4] G. SPERBER: Linearmotor und Lineargenerator – Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie 20 (1972) , Nr. 2, S. 56 - 59
- [5] R. HAGNER, R.: Der Linearmotor - Bearbeitung eines physikalisch-technischen Problems mit schulmäßigen Mitteln - Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie 37, 1989, Nr. 49, S. 28 (354) - 33 (359)
- [6] F. BADER: Dorn-Bader Physik 12/13 Gymnasium Sek II, Schroedel Verlag, Hannover, 2000, S. 93
- [7] A. HELMS – A. MAY: Physik in Demonstrationsversuchen 7.-10. Schuljahr Ausgabe A/B Elektrik Teil 2, Phywe-Schriftenreihe, Industrie-Druck GmbH Verlag, Göttingen, 1977, S. E 8.3.4
- [8] H.-J. WILKE: Die elektromagnetische Induktion in Experimenten – Wirbelströme in magnetischen Wechselfeldern (Teil 7) – Physik in der Schule 32 (1994), Nr. 11, S. 375 - 376
- [9] E. MARHENKE: Der Spaltpolmotor - In: Naturwissenschaft im Unterricht - Physik 7, 1996, Nr. 32, S. 32 (78) - 35 (81)
- [10] <http://alp.dillingen.de/ref/mph/induktion>
- [11] E. MARHENKE: Modell eines Wechselstromzählers - In: Naturwissenschaft im Unterricht - Physik 7, 1996, Nr. 35, S. 12 (192) - 16 (196)

- [12] O. E. BERGE: Aufbau, Wirkungsweise und Anwendung von Elektromotoren - In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie 36, 1988, Nr. 32, S. 2 - 12

**Bemerkung:**

Die beschriebenen Animationen und die beschriebenen Versuchsanleitungen mit Fotos, Videos und weiteren Materialien (auch zu weiteren Asynchronmotoren) befinden sich auf folgender CD-ROM:

HEUER, D. ET AL.: *PAKMA 2000* zur Dorn Bader Physik SEK. II, Bestandteil des Lösungsbandes Dorn Bader Physik SEK. II (CD zum Schülerband Dorn Bader Physik SEK. II), Schroedel-Verlag, Hannover, 2001, ISBN 3-507-10734-1

Weitere Informationen zu den CD-ROMs unter: <http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de>

**Anschrift des Verfassers:**

StR Thomas Wilhelm, Universität Würzburg, Physikalisches Institut, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Am Hubland, 97074 Würzburg