

Rotierende Teelichter, Linearmotore und schwebende Scheiben – Faszinierende Induktionsmotore zum einfachen Nachbau im Unterricht

Thomas Wilhelm

Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Am Hubland, 97074 Würzburg

Kurzfassung

Bei der Induktion ist die Relativbewegung von Leiter und Magnetfeld entscheidend. Nach der lenzschen Regel wirkt eine Kraft so, dass sich diese Relativbewegung verkleinert. In Induktionsmotoren = Asynchronmotoren verkleinert sich diese Relativbewegung dadurch, dass ein Leiter dem sich bewegenden Magnetfeld folgt. Induktionsmotore sind die am weitesten verbreiteten Motore, werden aber in der Schule kaum behandelt. Drehstrommotor, asynchroner Linearmotor, Spaltpolmotor und Wechselstromzähler sind Beispiele dafür.

Es wird gezeigt, wie man solche Motoren bzw. Modelle dafür in der Schule leicht nachbauen kann. Da einfachste Mittel wie Teelichter verwendet werden, sind die Versuche für Schüler sehr faszinierend. Des Weiteren werden einfache physikalische Begründungen gegeben. Simulationen helfen dabei zum Verständnis. Schließlich wird von einem Unterrichtsprojekt berichtet, bei dem Schüler selbst Induktionsmotore wie z.B. Linearmotore aufbauten.

1. Die lenzsche Regel in elementarer Form

Die Induktionsmotore sind eine mögliche Anwendung des Themas „Induktion und lenzsche Regel“. Bei der Behandlung der lenzschen Regel in der 10. Jahrgangsstufe habe ich zuerst die Induktion und die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter wiederholt [1, S. 342]: In einem Leiter, der in einem Magnetfeld bewegt wird, fließt auf Grund von Induktion ein Induktionsstrom. Auf einem Leiter, der in einem Magnetfeld von einem Strom durchflossen wird, wirkt wiederum eine Kraft. Nun habe ich den Schülern nahe gelegt, dass diese Kraft die ursprüngliche Bewegung verstärkt, der Leiter also immer schneller wird und damit die Stromstärke immer größer wird. Die Schüler haben daraufhin heftig protestiert, dass ein solches Perpetuum Mobile nicht möglich sei. Allerdings fanden sie keinen Fehler in dieser Argumentation. Erst eine langsame und detaillierte Behandlung der Richtung von Strom und Kraft mit Hilfe der Drei-Finger-Regel der rechten Hand führte zum Ergebnis, dass die Kraft die ursprüngliche Bewegung nicht verstärkt, sondern bremst. Damit war die lenzsche Regel in einer elementaren Form gefunden.

Sehr wichtig ist, dass es dabei nicht auf die Bewegung des Leiters ankommt, sondern auf die Relativbewegung zwischen Leiter und Magnetfeld. Schon bei der Induktion sollte man zeigen, dass es egal ist, ob eine Spule über einen Stabmagneten geschoben wird oder der Stabmagnet in die Spule geschoben wird. Leider wird die lenzsche Regel häufig verkürzt dargestellt: Als einziger Versuch wird das Waltenhofensche Pendel gezeigt. Hier pendelt eine Metallscheibe (meist Messing) zwischen den Polen eines Elektromagneten; sobald der Elektromagnet eingeschaltet wird, kommt die Bewegung der Messingscheibe schnell zur Ruhe. Damit wird den Schülern

der Eindruck vermittelt, die lenzsche Regel bedeutet, dass jede Bewegung zur Ruhe kommt. Richtig ist aber, dass die Relativbewegung verringert wird, nicht unbedingt die Bewegung des Leiters selbst.

Besonders interessant ist der Fall, dass das Magnetfeld wandert und der Leiter auf Grund des induzierten Stromes und der daraus folgenden Kraft dem Magnetfeld langsamer folgt. Da er nicht mit gleicher Geschwindigkeit folgt, spricht man auch von einer asynchronen Bewegung. Ein bekannter Versuch ist der folgende: Ein nicht-ferromagnetischer Ring ist bifilar aufgehängt. Ein Stabmagnet wird schnell in den Ring hineingestoßen. In dem Ring kommt es dann zu einem Induktionsstrom und zu einer Kraft, so dass der Ring der Bewegung des Magneten langsamer folgt (siehe Abb. 1). Es ist dabei nicht nötig, sich die Richtung des Stromes zu überlegen, denn auf Grund der lenzschen Regel weiß man, dass die Kraft in Richtung des bewegten Magnetfelds sein wird.

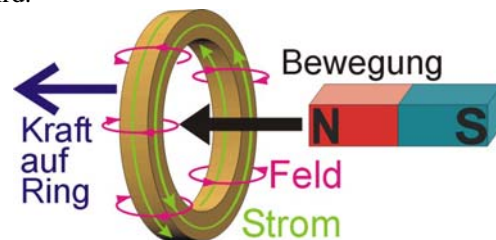


Abb. 1: Stabmagnet wird in Messingring gestoßen

Für alle folgenden Versuche wird die lenzsche Regel nur in dieser Form gebraucht: Wenn sich ein Magnetfeld bewegt, wird im Leiter ein Strom so induziert und damit entsteht eine Kraft so, dass der Leiter dem Magnetfeld folgt.

2. Modelle des Drehstrommotors

Ein Hufeisenmagnet ist an einer Schnur aufgehängt. Ein Aluminiumdöschen eines Teelichts liegt umgekehrt auf einer spitzen Nadel (vorher kleine Delle ins Döschen drücken) und befindet sich unterhalb des Hufeisenmagneten (siehe Abb. 2). Versetzt man den Hufeisenmagneten in Rotation, bewegt sich auch das Aluminiumdöschen in gleiche Richtung mit. Eine Postkarte, die zwischen Hufeisenmagnet und Aluminiumdöschen befestigt ist, macht deutlich, dass es nicht am Luftzug liegen kann. Im Aluminiumdöschen wird irgendwie ein Induktionsstrom induziert, der zu einer Kraft und zu langsamerem Folgen führt.



Abb. 2: An Schnur rotierender Hufeisenmagnet über Teelichtdöschen (Postkarte zur Windabschottung)

Dieser Versuch ist ein Modell des Tachometers, wie er früher in Autos verwendet wurde [2, S. 40] und heute noch in manchen Windgeschwindigkeitsmessern zu finden ist [3]. Ein Permanentmagnet ist mit dem Getriebe des Autos bzw. mit den sich im Wind drehenden Halbschalen verbunden und rotiert proportional zur Geschwindigkeit des Autos bzw. des Windes. Um den Permanentmagneten herum ist eine Aluminiumdose, in der Wirbelströme erzeugt werden. An der Aluminiumdose hängt der Zeiger des Tachometers. Nun möchte man natürlich nicht, dass der Zeiger permanent rotiert. Die Aluminiumdose ist deshalb an einer Feder befestigt. Je nach Drehgeschwindigkeit des Magneten gibt es eine andere Stellung, in der ein Kräftegleichgewicht zwischen Federkraft und geschwindigkeitsproportionaler Wirbelstromkraft besteht, und somit wird der Zeiger unterschiedlich weit ausgelenkt.

Dieser Versuch ist auch ein einfaches Modell eines Drehstrommotors. Man sieht das rotierende Magnetfeld und den Rotor, der sich dreht. Ein besseres Modell eines Drehstrommotors erhält man, indem man drei Spulen mit ca. 600 (oder 1200) Windungen um 120° verschoben um ein Aluminiumdöschen eines Teelichtes aufstellt und an die Spulen ca. 23 V Drehspannung anschließt (siehe Abb. 3). Auch hier

beginnt das Aluminiumdöschen zu rotieren und folgt dem sich drehenden Magnetfeld. Vertauscht man die Ströme zweier Spulen, erhält man die umgedrehte Drehrichtung.

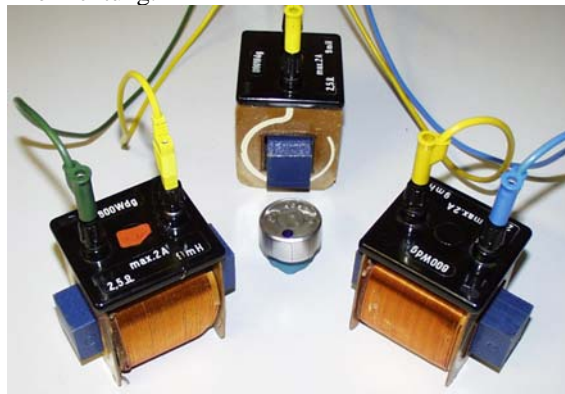


Abb. 3: Modell eines Drehstrommotors mit drei Spulen und einem Teelichtdöschen als Rotor

Bei richtigen Drehstrommotoren wird ein so genannter „Käfigläufer“ (siehe Abb. 4) verwendet, der im Gegensatz zum Aluminiumdöschen des Teelichtes einen massiven Boden hat, aber nur Wände aus einzelnen Stäben. Lehrmittelfirmen bieten auch solche Käfigläufer an. Aufgrund ihrer viel höheren Masse laufen sie jedoch schlechter als das Aluminiumdöschen. Es ist nicht nötig, sich die Stromrichtung in jedem einzelnen Stab des Käfigläufers zu überlegen. Die lenzsche Regel sagt uns schnell, dass die Kraft in Richtung des bewegten Magnetfelds sein wird.



Abb. 4: Ströme in zwei Stäben eines Käfigläufers

Sollte man in der Schule keinen Drehstromtransformator zur Verfügung haben, kann man sich auch behelfen. Eine Möglichkeit ist, einen Drehstromstecker zu nehmen und jeweils eine Phase und den Nullleiter mit einer Schuko Steckdose zu verbinden, so dass man drei Schuko Steckdosen mit phasenverschobenen Spannungen erhält. An jede dieser Schuko Steckdosen schließt man einen schulüblichen Stell-Transformator an, um somit drei phasenverschobene geringe Spannungen zu erhalten. Eine andere Möglichkeit ist die sogenannte „Steinmetzschtaltung“, bei der man mit Hilfe eines Kondensators aus einer Phase drei verschiedene Phasen erhält. Dies sollte dann jedoch als Blackbox verwendet werden, da es den Schülern nicht erklärt werden kann, wie hier drei verschiedene Phasen entstehen. Den Schülern ist zu zeigen, dass wirklich ein rotierendes Magnetfeld entsteht. Dazu gibt es drei Mög-

lichkeiten: 1. Man kann eine Kompassnadel zwischen die Spulen halten, die dann mit 50 Hz rotiert. Mit Hilfe eines Stroboskops kann gezeigt werden, dass es sich wirklich um 50 Hz handelt. Das wäre dann auch ein Modell eines Synchronmotors. 2. Eine andere Möglichkeit ist, sich zu überlegen, wann welche Spule gerade vom maximalen Strom durchflossen wird und damit z.B. gerade den maximalen Nordpol auf der Innenseite der Spule hat. Dann stellt man fest, dass dieser Nordpol im Kreis herumwandert. Jede einzelne Spule schaltet zwar nur zwischen Nord und Süd um, aber insgesamt entsteht der Eindruck eines Laufens. Genauso schalten bei manchen Leuchtreklamen die Lämpchen nur an und aus, aber insgesamt entsteht der Eindruck eines laufenden Textes. Fraglich bleibt dennoch, wie das Feld aussieht, wenn gerade keine Spule vom maximalen Strom durchflossen wird. 3. Hilfreich ist eine Animation, wie sie in Abbildung 5 gezeigt wird [4]. Zu sehen sind die drei phasenverschobenen Ströme und das Magnetfeld jeder einzelnen Spule an einem Punkt in der Mitte zwischen den drei Spulen. Werden diese drei Magnetfelder vektoriell addiert, entsteht ein Magnetfeld, das mit konstantem Betrag und konstanter Winkelgeschwindigkeit rotiert.

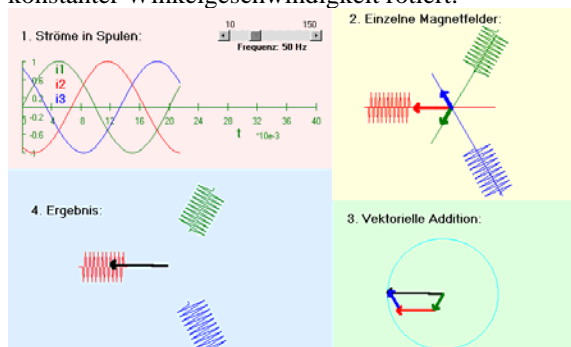


Abb. 5: Simulation des Magnetfeldes in der Mitte zwischen den drei Spulen

3. Transversale Linearmotore

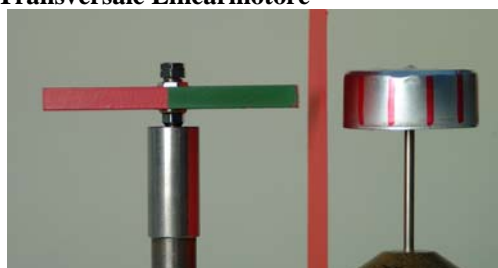


Abb. 6: Stabmagnet rotiert neben Teelicht (Postkarte zur Windabschottung)

Man kann auf die Idee kommen, die Spulen des Drehstrommotors nebeneinander zu stellen, um so einen Linearmotor zu erhalten. Dazu zunächst ein einfaches Modell: Auf einer Nadel liegt wieder das Aluminiumdöschen eines Teelichtes. Neben befindet sich ein kleiner Stabmagnet der in Rotation versetzt wird (siehe Abb. 6). Eine Postkarte zwischen Stabmagnet und Aluminiumdöschen oder ein Glasbecher über dem Teelicht macht wieder deut-

lich, dass der Effekt nicht am Luftzug liegen kann. Bewegt sich der Stabmagnet auf diese Weise am Aluminiumdöschen vorbei, bewegt sich das Aluminiumdöschen an der Begegnungsstelle in gleiche Richtung mit (Insgesamt kommt es also zu einer Bewegung mit entgegengesetzter Umlaufrichtung). Stellen wir uns nun das Aluminiumdöschen aufgeschnitten und zu einer langen Aluminiumschiene auseinander gezogen vor und stellen wir uns außerdem vor, der Stabmagnet wird durch Spulen mit Drehstrom ersetzt. Hält man die ein Wanderfeld erzeugenden Spulen fest und setzt Räder unter die Aluminiumschiene, bewegt sich diese Schiene. Hält man umgekehrt die Aluminiumschiene fest und befestigt unter den Spulen Räder, fährt dieses Fahrzeug an der Schiene entlang. So wurde es schon bei Schienenfahrzeugen realisiert. Beim Transrapid ist dagegen das Wanderfeld wie in der ersten Variante im Fahrweg fest eingebaut.

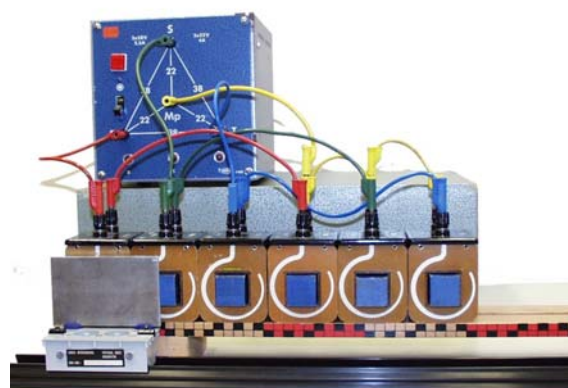


Abb. 7: Modell eines transversalen asynchronen Linearmotors mit Wanderfeld im Fahrweg

Ein einfaches Modell (siehe Abb. 7) erhält man, indem man sechs Spulen mit 300 Windungen an 23 V Drehspannung anschließt (je zwei in Reihe oder besser je zwei parallel) und vor die Spulen ein Wägelchen mit einer kleinen Aluminiumplatte stellt [5, S. 26]. Beim Einschalten der Spannung beginnt das Fahrzeug loszufahren. Der Aufbau ist sehr einfach und leicht nachbaubar. Es handelt sich dabei um einen transversalen asynchronen Linearmotor, da die Bewegungsrichtung des Wagens senkrecht zum Magnetfeld der einzelnen Spulen ist. Ein longitudinaler Linearmotor, bei dem die Bewegungsrichtung in die Feldrichtung der Spulen geht, ist der bekannte Polysolenoid-Motor [6 und 7, S. 93]. Bei diesem Motor geht eine Eisenstange durch die drei Spulen hindurch und der Wagen zieht sich an der Stange entlang vorwärts. Ein solcher longitudinaler Linearmotor ist für den Verkehr nicht geeignet, da der Wagen nur bis zur Befestigung der Eisenstange fahren kann.

Auch hier stellt sich wieder die Frage, wie das Magnetfeld im Detail aussieht. Beim Drehstrommotor war es wichtig, dass es drei Spulen und drei Winkel von 120° sind. Beides ist hier nicht mehr gegeben. Auch hier hilft eine Simulation zum Verständnis

(siehe Abb. 8) [4]. In ihr sind wieder die drei phasenverschobenen Ströme zu sehen, sowie die y-Komponenten der Magnetfelder der einzelnen Spulen. Zwischen je zwei Spulen ist nun das Magnetfeld der beiden Spulen zu addieren. Dies führt überraschenderweise zu einem scheinbar wandernden Magnetfeld.

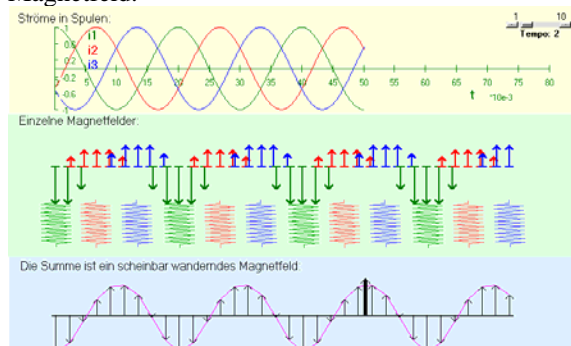


Abb. 8: Animation zur Entstehung des Wanderfeldes

Da actio gleich reactio und somit die Kräfte auf die Spulen und auf die Aluminiumplatte gleich groß sind, liegt es nahe, die Aluminiumplatte fest zu halten und Räder unter die Spulen zu bauen (siehe Abb. 9) [5, S. 27]. Hierfür wurden kleine Phywe-Spulen mit 400 Windungen verwendet, die für Schülerübungen gedacht sind, sowie die Dreiecksschaltung beim Drehstromtransformator (40 V). Kann man mit Hilfe eines Kreuzschalters zwei Ströme vertauschen, erhält man ein schönes Spielzeug, bei dem der Wagen hin- und herfährt. Im Vergleich zum vorhergehenden Versuch ist das Fahrzeug hier deutlich schwerer, aber der Weg wesentlich einfacher. Ein weiterer Nachteil ist, dass drei Zuleitungen zum Wagen nötig sind.

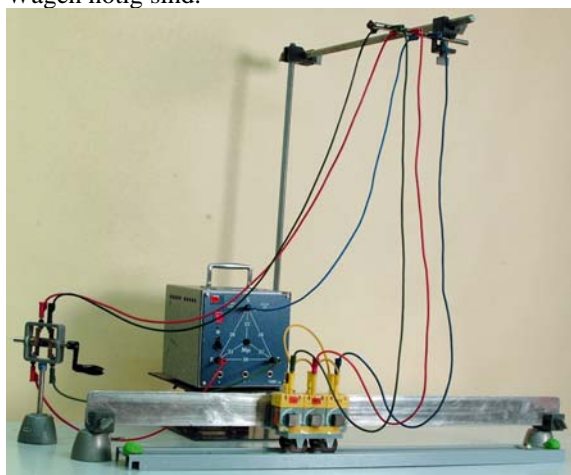


Abb. 9: Modell eines transversalen asynchronen Linearmotors mit Wanderfeld im Fahrzeug

4. Der Transrapid

Was Schüler sehr interessiert, ist der Transrapid. Auch bei ihm wird mit Hilfe von Drehstrom im Fahrweg ein wanderndes Magnetfeld erzeugt. Dennoch handelt es sich hier nicht um einen Induktionsmotor, sondern um einen Synchronmotor [5; 8]. Der Transrapid greift von oben um die Schiene her-

um unter die Schiene (siehe Abb. 10). Unter der Schiene befinden sich im Fahrzeug Gleichstrom-Elektromagnete, die sich an das Statorblechpaket des Fahrweges heranziehen, wobei auf elektronischem Wege unterhalb der Schiene ein Abstand von 10 mm geregelt wird. So schwebt der Transrapid oben 15 cm über der Schiene und kann auch über Hindernisse hinwegschweben. Die Tragmagnete bewegen sich nun außerdem mit gleicher Geschwindigkeit (synchron) mit dem Wanderfeld mit. Es liegt also eine Kopplung von Schweben und Antrieb vor. Beides geschieht durch die Elektromagnete im Fahrzeug.

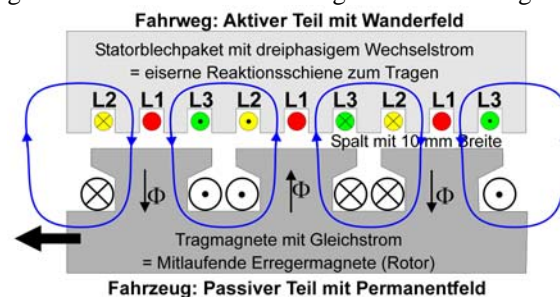


Abb. 10: Aufbau des Transrapids: eine synchroner Linearmotor mit Kopplung von Schweben und Antrieb

Die Elektromagnete werden von einem Gleichstrom aus den Bordbatterien des Transrapids gespeist. Ihre Energie reicht aus, den Transrapid ca. eine Stunde schweben zu lassen. Diese Bordbatterien werden mit Hilfe eines Lineargenerators im Fahrzeug gespeist. Da der Transrapid synchron, also mit gleicher Geschwindigkeit, mit dem Wanderfeld mitfährt, dürfte der Lineargenerator eigentlich kein bewegtes Magnetfeld sehen und keine Spannung erzeugen. Er funktioniert deshalb nur auf Grund der Unregelmäßigkeiten, die im Wanderfeld vorhanden sind.

5. Linearmotore im Unterrichtsprojekt

Im Unterricht zur lenzschen Regel habe ich den Drehstrommotor gezeigt und viele andere Anwendungen erwähnt. Dann fragte ich die Schüler, ob sie in einem Projekt intensiver eine dieser vielen Anwendungen bzw. einen der vielen Aspekte genauer behandeln wollen [1]. Die Schüler waren davon begeistert und es wurde unter anderem entschieden, einen Linearmotor zu bauen, wobei der Transrapid als Vorbild bezüglich des Wanderfeldes dienen sollte. In der Literatur war allerdings bis dahin kein Versuch eines transversalen asynchronen Linearmotors zu finden, der mit geringen Spannungen auskommt. Im Projekt stand aber eine regelbare Drehstromquelle zur Verfügung. Den Schülern wurden keine Vorgaben gemacht, außer dass sie nicht selbst die Spannung einschalten dürfen.

In einer Projektgruppe wurden die Spulen (600 Windungen) so hingestellt, dass die Eisenkerne nach oben zeigen, und wurden dann mit einer Glasplatte abgedeckt (siehe Abb. 11). Ein von den Schülern gebautes schweres Aluminiumfahrzeug bewegte sich nicht. Die Schüler verwendeten dann Aluminiumfo-

lie und experimentierten mit deren Länge und Dicke. Hier war eine Kraft erkennbar. Wichtig war schließlich die Erkenntnis, dass die Spulen gleicher Phase nicht parallel geschaltet werden dürfen, da sich sonst die Stromstärken in der Sicherung addieren und diese herausfliegt. Wurden die Spulen in Reihe geschaltet, funktionierte der Versuchsaufbau bei einer Spannung von 230 V: Die Aluminiumplatte des Modells wird vom Magnetfeld über die Glasplatte gezogen.



Abb. 11: Linearer Motor einer Schülergruppe in einem Unterrichtsprojekt

In einer anderen Gruppe wurden anschließend die Spulen um 90° gedreht und eine lange Aluminiumplatte auf Rollen gestellt (siehe Abb. 12). Schon bei einer Spannung von nur 50 V fährt dieses lange Fahrzeug an den Spulen vorbei. Der oben gezeigte Aufbau (Abb. 7 in Abschnitt 3) ist lediglich eine Variation dieser Idee der Schüler. Um mit geringen Spannungen von 23 V auskommen zu können, wurde das Fahrzeug kleiner und damit leichter gewählt und bei den Spulen nur 300 Windungen verwendet.



Abb. 12: Linearer Motor einer anderen Schülergruppe im Unterrichtsprojekt

6. Der Spaltpolmotor

Im Haushalt werden die meisten Geräte an ein einphasiges Netz angeschlossen. Nur selten werden drei Phasen verwendet. Nimmt man beim obigen Modell des Drehstrommotors jedoch eine Spule weg, sieht man, dass das Aluminiumdöschen weiterhin rotiert. Es reichen also bereits zwei Phasen. Im Haushalt ist es also nur nötig, aus dem einphasigen Netz eine zweite Phase oder ein zweites Feld zu erzeugen.

Beim Spaltpolmotor wird um die Hälfte des Eisenkerns ein weiterer Leiter gewickelt, in dem dann ein Induktionsstrom induziert wird. Dessen Feld hemmt den Auf- und Abbau des Feldes der Spule auf dieser Seite. Insgesamt ergibt sich auf dieser Seite der Spule ein Magnetfeld, das phasenverschoben zur anderen Seite der Spule ist.



Abb. 13: Modell eines Spaltpolmotors

Ein Modell lässt sich bauen, indem man eine Spule (600 Windungen) statt mit einem geblättern Eisenkern mit Stahlnägeln füllt [9]. Hier kann man um die Hälfte der Nägel einen zusätzlichen Draht wickeln (siehe Abb. 13). Eine Simulation [4] zeigt zwei Teile einer Spule, die jeweils ein Magnetfeld mit einer geringen Phasenverschiebung haben (siehe Abb. 14). Die Summe dieser beiden Magnetfelder ist ein elliptisch rotierendes Magnetfeld.

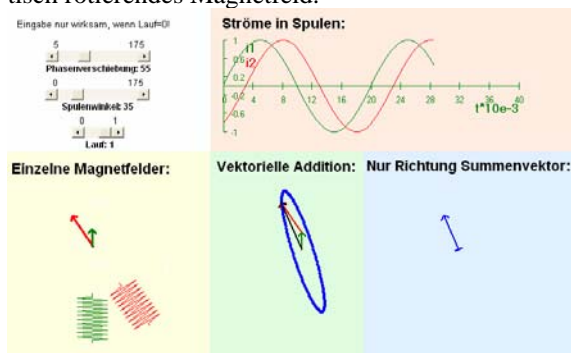


Abb. 14: Simulation des Magnetfeldes im Spaltpolmotor

Solche Spaltpolmotore wurden früher in Schallplattenspielern verwendet und finden sich heute als Laugenpumpenmotor in der Waschmaschine. Sie haben einen schlechten Wirkungsgrad, aber praktisch keinen Verschleiß, da keine Polwender und Schleifkontakte nötig sind. Die Abbildung 15 zeigt ein Foto eines Stators eines Laugenpumpenmotors einer Waschmaschine mit den zusätzlichen Kupferwicklungen (Rotor aus Aluminium entfernt).

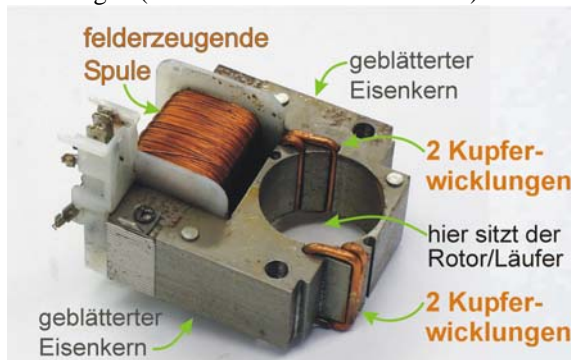


Abb. 15: Ein Spaltpolmotor: Der Laugenpumpenmotor einer Waschmaschine

Ein einfacheres Modell eines Spaltpolmotors erhält man, indem man einfach vor die Hälfte der Spule (600 Windungen) eine zusätzliche Aluminiumplatte stellt [9, S. 35], in der Wirbelströme erzeugt werden (siehe Abb. 16). Ein solcher Versuch wurde an der Universität Würzburg in einem Schaukasten präsentiert. Die Studenten waren davon sehr fasziniert und konnten sich nicht erklären, wie es eine einzige Spule schafft, ein Teelicht, das nicht ferromagnetisch ist, zum Rotieren zu bringen. Verschiedene falsche Theorien wurden generiert. Die Schüler dagegen, die gelernt hatten, dass ein Läufer einem sich bewegenden Magnetfeld folgt, hatten mit diesem Versuch nicht solche Probleme.



Abb. 16: Ein einfacheres Modell eines Spaltpolmotors

Ein weiteres, realitätsnäheres Modell eines Spaltpolmotors erhält man, indem man zwei Spulen mit 600 Windungen an die gleiche Wechselspannung von ca. 20 V anschließt [9, S. 34]. Vor die eine Spule stellt man eine weitere Spule mit wenigen Windungen, die kurz geschlossen ist und in der ein Wirbelstrom induziert wird (siehe Abb. 17).



Abb. 17: Ein weiteres Modell eines Spaltpolmotors

7. Kondensatormotore

In der Technik erhält man die Phasenverschiebung auch, indem man einen Kondensator einsetzt. Das Aluminiumdöschen dreht sich auch dann, wenn man zwei Spulen (600 Windungen) an die gleiche Wechselspannung anschließt und vor die eine Spule einen Kondensator (100 μF) schaltet. Dass es hier zu einer Phasenverschiebung kommt, ist jedoch mit Schulmitteln nicht erklärbar.

In der Oberstufe wird jedoch behandelt, dass in einer R-C-Reihenschaltung eine Phasenverschiebung von 90° zwischen der Spannung am Widerstand und der am Kondensator vorliegt. Dies wird in einem weiteren Modell genutzt (siehe Abb. 18): Ein Kondensator (ca. 1 F) und ein Schiebewiderstand (ca. 2 Ω) werden in Reihe geschaltet und an eine Spannung von ca. 5 V angeschlossen (Achtung! Hohe Ströme!). Die Spannung am Kondensator wird abgenommen und auf eine Spule (600 Windungen) gegeben; die Spannung am Widerstand wird ebenso abgenommen und auf eine andere Spule gegeben (600 Windungen). Am Oszilloskop ist zu sehen, dass diese beiden Spulen eine Phasenverschiebung von 90° haben. Die Spulen werden in einem Winkel von 90° aufgestellt und ein Aluminium-Teelicht, das vor die Spulen gestellt wird, rotiert.

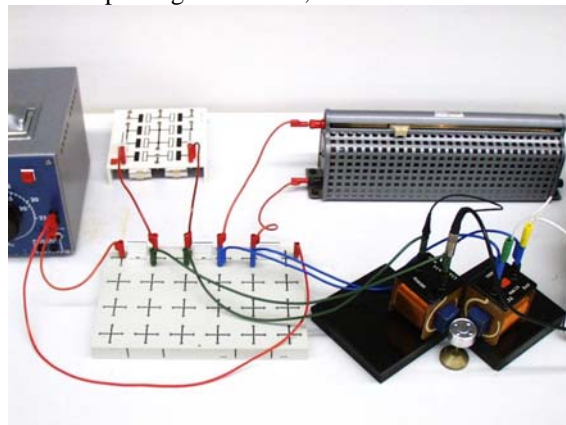


Abb. 18: Ein „Motor“ mit einem Kondensator: Die Spannungen aus einem R-C-Kreis (rot) werden auf zwei Spulen gegeben (grüne und blaue Kabel)

Hiermit kann gezeigt werden, dass auch mit einem Kondensator eine Phasenverschiebung erzeugt und ein Induktionsmotor gebaut werden kann. Wenngleich dieser Aufbau technisch nicht relevant ist, da die meiste Leistung im Widerstand verbraucht wird (dort hohe Ströme) und in Wirklichkeit ja eine Parallelschaltung von Kondensator und Spule bzw. von Widerstand und Spule vorliegt. Eine Simulation (siehe Abb. 19) zeigt, dass bei einer Phasenverschiebung von 90° und einem Spulenwinkel von 90° wieder ein Magnetfeld entsteht, das kreisförmig (also mit konstantem Betrag und konstanter Winkelgeschwindigkeit) rotiert [4].

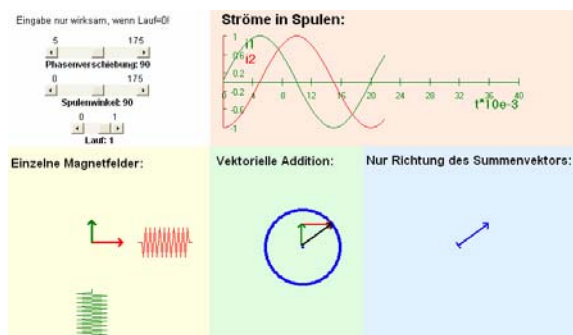


Abb. 19: Simulation zum Magnetfeld beim R-C-Kreis-Motor

8. Wechselstromzähler

Einen anderen Induktionsmotor hat jeder im Haushalt: den Wechselstromzähler. Im Modellversuch wird eine Spule, die so genannte Stromspule, in den Stromkreis hineingeschaltet, während eine zweite Spule anderer Induktivität, die so genannte Spannungsspule, direkt an die Spannung angeschlossen wird (siehe Abb. 20) [10]. Die beiden Spulen werden nebeneinander gestellt und davor wird wieder ein Aluminiumteelicht gestellt, das wieder rotiert.

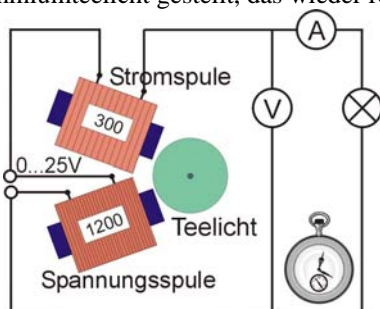


Abb. 20: Schaltung eines Modells eines Wechselstromzählers

Im oben genannten Unterrichtsprojekt sollte eine Schülergruppe einen solchen Wechselstromzähler aufbauen und überprüfen, ob die Anzahl der Umdrehungen pro Minute proportional zur verbrauchten Leistung ist. Reale Wechselstromzähler besitzen noch einen Permanentmagneten, der eine geschwindigkeitsproportionale bremsende Kraft erzeugt. Auf diesen Permanentmagneten wurde im Projekt verzichtet. Die Schüler hatten beim Aufbauen dennoch große Probleme mit der Feinmotorik und haben viele Teelichter zerdrückt (siehe Abb. 21).



Abb. 21: Modell eines Wechselstromzählers, von Schülern gebaut

Ungeschickt war bei den Schülern, dass sie die Anzahl der Umdrehungen in zehn Sekunden zählten und dies auf eine Minute hochrechneten, was einen großen Messfehler ergibt. Besser wäre gewesen, die Anzahl der Umdrehungen in fünf Minuten zu messen und auf eine Minute herunterzurechnen. Trotz vieler Probleme in dieser Projektgruppe konnte ein Diagramm „Leistung - Umdrehungen pro Minute“ erstellt werden (siehe Abb. 22). Die Schüler legten allerdings keine mittlere Ausgleichsgerade durch alle Messwerte, sondern zeichneten eine Linie exakt durch jeden Messpunkt. Für die zweite Messreihe wurde eine neue Linie gezeichnet. Außerdem wurde die Linie an zwei Stellen verbreitert, so dass jeder Punkt noch auf der Linie liegt. Dies zeigt, dass es im Physikunterricht nicht gelungen ist, den Schülern etwas über Messwerterfassung und Messwertauswertung einschließlich Messfehler beizubringen. Auch die Beschriftung der Achsen ist ungeschickt (Umdrehungen pro Minute, aber Leistung in Watt).

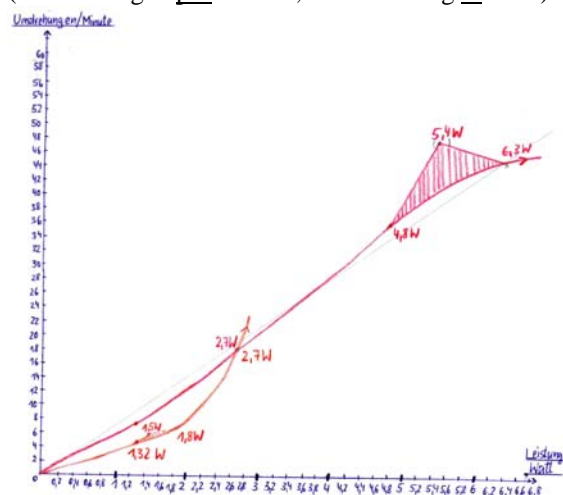


Abb. 22: Diagramm „Leistung – Anzahl Umdrehungen pro Minute“ einer Schülergruppe im Projekt

9. Schwebende und rotierende Platten

Die Schüler einer Projektgruppe zum Linearmotor waren gegen Ende der Projektzeit enttäuscht, dass ihr Linearmotor nicht schwebte. Ein bekannter Versuch, bei dem eine Aluminiumplatte auf Grund von Induktion schwebt, benutzt vier Spulen (600 Windungen) und vier U-Kerne [11; 12], wobei jeweils zwei Spulen in Reihe geschaltet sind (230 V) und die vier aneinander liegenden Schenkel den gleichen Magnetpol besitzen (siehe Abb. 23).

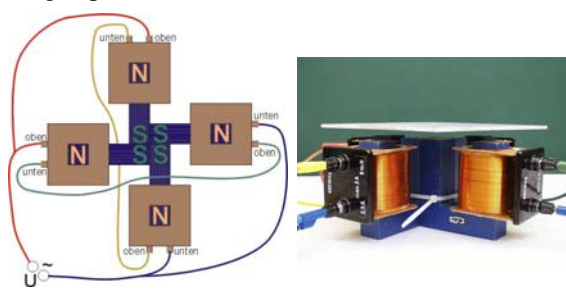


Abb. 23: Schaltung und Foto von stabil schwebenden Aluminiumplatten

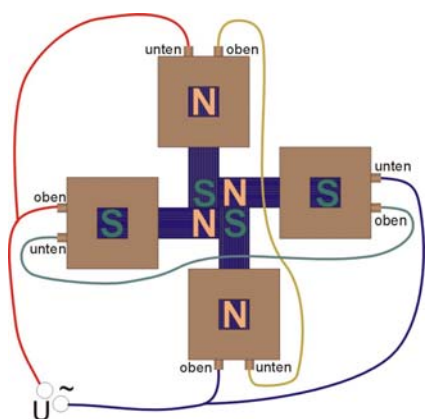


Abb. 24: Schaltung eines vierpoligen Asynchronmotors

Hier handelt es sich jedoch nicht um einen Induktionsmotor, was das Thema des Projektes war. Ich gab den Schülern deshalb eine leichte Abänderung dieses Versuchsaufbaus, bei dem nun ein Spulenpaar entgegengesetzt gepolt ist, so dass die aneinander liegenden Schenkel verschiedene Magnetpole haben, aber mit einem Kabelbinder fest verbunden sind (siehe Abb. 24). Der Nachteil dieses Aufbaus ist, dass die Platten nicht mehr stabil schweben, sondern man in der Mitte einen Führungsstab (z.B. eine Stricknadel) braucht (siehe Abb. 25). Die Platten beginnen auch nicht von selbst zu rotieren. Wirft man sie allerdings an, kommt es zu einer Rotationsbewegung. Betrachten wir dazu den Nordpol, der sich in Abb. 24 an dem Schenkel der oberen Spule befindet. Eine Hundertstel Sekunde später ist an der linken und rechten Spule ein Nordpol, die allerdings gleich weit entfernt sind. Hat sich allerdings die Aluminiumplatte in dieser Zeit weitergedreht (z.B. gegen den Uhrzeigersinn), ist aus Sicht eines mitbewegten Beobachters der eine Nordpol näher als der andere (im Beispiel der linke); es sieht so aus, als hätte sich das Magnetfeld weitergedreht (im Beispiel gegen den Uhrzeigersinn). Das bewegte Magnetfeld führt nun wieder zu einem Wirbelstrom und einer Kraft in die Bewegungsrichtung des Feldes.

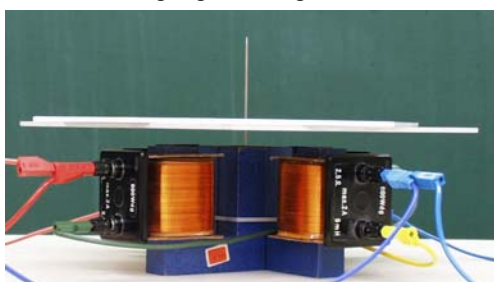


Abb. 25: Foto des vierpoligen Asynchronmotors

Die Schüler stellten fest, dass die Aluminiumplatten heiß werden und konnten dies mit der Wärmewirkung des Induktionsstromes erklären. Ein Schüler fragte, ob man nicht damit auch kochen könne, so dass ich etwas über Induktionskochstellen [13] erzählen konnte. Besonders fasziniert hat die Schüler ihre Entdeckung, dass ein leichtes Anwerfen der

Platten in die eine Richtung dazu führt, dass die Platten wieder zur Ruhe kommen, während das gleiche Anwerfen in die andere Richtung zu einer zunächst scheinbar stetigen Beschleunigung führt und die Platten immer schneller werden. Die theoretische Grenzgeschwindigkeit liegt bei diesem vierpoligen Magnetfeld aber bei 25 Hz. Warum es diese Richtungsabhängigkeit gibt, konnte ich im Projekt nicht spontan erklären. Die Schüler freuten sich hier sehr, etwas herausgefunden zu haben, was der Lehrer zunächst nicht erklären konnte. Die Erklärung liegt wohl darin, dass der Aufbau nicht symmetrisch ist. Stellt man in die Mitte ein Stück Holz oder Hart-PVC und die vier Hufeisenmagnete symmetrisch um dieses Mittelstück, ist dieser Richtungseffekt nicht mehr vorhanden.

10. Zusammenfassung

Induktionsmotore (= Asynchronmotore) sind die heute am meisten genutzten Motore - nicht die Stromwendermotore, die traditionellerweise im Physikunterricht behandelt werden. Asynchronmotore sind nämlich verschleißarm, geräuscharm und haben keine Funkstörung.

Es sollte in diesem Beitrag gezeigt werden, dass es möglich ist, auch im Physikunterricht Asynchronmotore zu behandeln. Dazu wurden einfache Erklärungen sowie einfache Experimente gezeigt. Die Simulationen helfen beim Verständnis der Magnetfelder.

11. Weiterführende Literaturhinweise

In [14] sind die meisten hier dargestellten Versuche mit Induktionsmotoren (außer den Linearmotoren) aufgenommen. Darüber hinaus sind noch viele weitere Freihandversuche aufgeführt. Man findet jeweils den Gerätebedarf, Versuchsbeschreibung, Fotos, physikalisch-technische Betrachtungen, didaktische Überlegungen und Schülerreaktionen.

In [5] sind die zwei Versuche zu transversalen asynchronen Linearmotoren dargestellt (Abb. 7 + 9). Man findet jeweils den Gerätebedarf, Versuchsbeschreibung, Fotos und Informationen über den Transrapid.

In [4] findet man zu allen oben erwähnten Versuchen Gerätebedarf, Versuchsbeschreibung, Fotos, Videos, Simulationen und Internetlinks. Die Schulbücher „Dorn.Bader Physik 11“ und „Dorn.Bader Physik 12/13“ [7] wurden auf dieser CD-ROM in Bewegung umgesetzt. Die hypertextgesteuerte CD enthält darüber hinaus viele weitere interaktive Simulationen, aber auch Messprogramme, Arbeitsanleitungen, Arbeitsblätter, Versuchsanleitungen und Internetlinks. Die Simulationen orientieren sich genau an dem Schulbuch, so dass sich hier praktisch die Abbildungen des Buches bewegen.

In [1; 15; 16] findet man detaillierte Berichte über das erwähnte Unterrichtsprojekt zu Induktionsmotoren.

12. Filme auf der Tagungs-CD

Auf der Tagungs-CD befinden sich vier avi-Filme von den erwähnten Simulationen zum Drehstrommotor (Abb. 5), zum Linearmotor (Abb. 8), zum Spaltpolmotor (Abb. 14) und zum „R-C-Motor“ (Abb. 19). Im Gegensatz zu den Originalsimulationen [4] haben die Filme den Nachteil, dass man nichts einstellen kann, man keinen Einfluss auf die Ablaufgeschwindigkeit hat, sie recht kurz sind und etwas ruckhaft ablaufen. Der Vorteil der Filme ist aber, dass sie unabhängig von dem Software-Tool PAKMA und unabhängig vom Betriebssystem laufen. Sie zeigen beispielhaft, welche Hilfen und Möglichkeiten sich mit bewegten bildhaften Darstellungen ergeben [17].

13. Literatur

- [1] WILHELM, T. (2007): Projekt “Induktionsmotor”. In: Kircher, E., Girwidz, R.; Häußler, P. (Hrsg.): Physikdidaktik Theorie und Praxis, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002, ISBN 978-3-540-34089-8, S. 338 - 354, 69,95 €
- [2] SCHULDT, C. (1988): Der Asynchronmotor. Ein Unterrichtsmodell für die 12. Jahrgangsstufe. In: Naturwissenschaften im Unterricht - Physik/Chemie 36, Nr. 32, 37 – 42
- [3] DIETRICH, R.; WILHELM, T.; GIRWIDZ, R. (2007): Induktive und magnetische Sensoren im Physikunterricht. In: NORDMEIER, V.; OBERLÄNDER, A. (Red.): Didaktik der Physik - Regensburg 2007, Lehmanns Media – LOB.de, Berlin
- [4] PAKMA 2002, Schroedel-Verlag, Hannover, ISBN 3-507-10729-5, Preis: 11,95 €
- [5] WILHELM, T. (2002): Der asynchrone Linearmotor - einfachst nachgebaut. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 51, Nr. 2, S. 25 - 29
- [6] BERGE, O.E. (1973): Der Linearmotor mit longitudinalem Magnetfeld. In: Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie, Nr.1, S. 12 - 14
- [7] BADER, F. (2000): Dorn Bader Physik 12/13 Gymnasium Sek II. Hannover, Schroedel Verlag
- [8] UHLENBROCK, M.; NORDMEIER, V.; SCHLICHTING, H. J. (2000): Die Magnetschnellbahn Transrapid im Experiment. In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU) 53, Nr. 4, 220 – 226
- [9] MARHENKE, E. (1996): Der Spaltpolmotor. In: Naturwissenschaft im Unterricht - Physik 7, Nr. 32, 32 (78) - 35 (81)
- [10] MARHENKE, E. (1996): Modell eines Wechselstromzählers. In: Naturwissenschaft im Unterricht - Physik 7, Nr. 35, 12 (192) - 16 (196)
- [11] WILKE, H.-J. (1994): Die elektromagnetische Induktion in Experimenten. Wirbelströme in magnetischen Wechselfeldern (Teil 6). In: Physik in der Schule 32, Nr. 10, S. 341 - 345
- [12] WILKE, H.-J. (1995): Rotierende und schwebende Wirbelstromscheiben in magnetischen Wech-

selfeldern. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik 44, Nr. 3, 35 - 42

- [13] MARHENKE, E. (1996): Die Induktionskochstelle. Anwendung von Wirbelströmen in der Haushaltstechnik. In: Naturwissenschaft im Unterricht - Physik 7, Nr. 32, 25 (71) - 27 (73)
- [14] WILHELM, T. (2002): Beispiele für Freihandversuche zu ausgewählten Themen des Physikunterrichts am Gymnasium (Physik), Beiträge zur Gymnasialpädagogik 26, herausgegeben von der Referendarvertretung im Bayerischen Philologenverband, München, 103 Seiten, bestellbar über: www.bpv.de/publikationen (ganz unten) oder bei: Bayerischer Philologenverband, Impplerstr. 25a, 81371 München, 9 € für Nichtmitglieder
- [15] WILHELM, T. (2002): Projekt “Induktionsmotor”. In: Kircher, E., Schneider, W. (Hrsg.): Physikdidaktik in der Praxis, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002, ISBN 978-3-540-41937-2, S. 181 – 196, 34,95 €
- [16] WILHELM, T. (2001): Projekt: Faszination Induktion. In: Ludwig, M. (Hrsg.): Projekte im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht, Verlag Franzbecker, Hildesheim, Berlin, 2001, ISBN 3-88120-330-3, S. 53 – 80, 18,80 €
- [17] WILHELM, T. (2005): Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 46, Logos-Verlag, Berlin, 2005, ISBN 3-8325-1046-X

14. Adresse

StR Dr. Thomas Wilhelm, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Physikalisches Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Tel. 0931/888-5788,

www.physik.uni-wuerzburg.de/~wilhelm
wilhelm@physik.uni-wuerzburg.de