

Asynchroner Linearmotor

1. Versuchszweck

Der Versuch soll die praktische Anwendung von Drehstrom am Beispiel der Magnetschwebbahn demonstrieren. Er zeigt die prinzipielle Funktionsweise des Antriebes durch ein sog. magnetisches Wanderfeld aus Dreiphasen-Wechselstrom. Das eigentliche Schweben wird dabei nicht simuliert, da diese Funktionsweise durch Beobachtung und ggfls. andere Vorversuche bereits hinlänglich bekannt ist. Vielmehr wird hier ein Wagen durch das Wanderfeld an einer Aluminiumleiste entlang gezogen.

2. Die Magnetschwebbahn Transrapid

Der deutsche Transrapid, geplant als Hochgeschwindigkeitsbahn, ist ein ehrgeiziges Projekt, bei dem die sonst unvermeidlichen Reibungsverluste durch eine Schwebetechnik vermieden werden, bei der kein Kontakt mehr zum Untergrund besteht, die Bahn also „in der Luft schwebt“, genauer auf einem magnetischen Polster. Letztlich verbleibt damit nur noch der Luftwiderstand, der der Fahrt Widerstand entgegensetzt, und solange die Bahn nicht gleich in einer Vakuumröhre installiert wird, lässt sich der auch nicht so leicht verhindern. Immerhin ist so auch ein großer Verschleißfaktor beseitigt worden. Keine Reifen mehr, deren Gummi durch Abrieb aufgebraucht wird, und auch keine Stahlfelgen auf Schienen, die natürlich ebenfalls dem natürlichen Verschleiß unterliegen.

Doch nicht nur die Lagerung der Bahn sondern auch ihr Antrieb wird durch den Einsatz von leistungsfähigen Elektromagneten auf revolutionäre Weise modernisiert. Zum Antrieb nutzt man dabei ein durch Elektrosolen erzeugtes Magnetfeld, das entlang der Strecke wandert, man kann sagen es werden einfach nacheinander Elektrosolen ein- und ausgeschaltet und erzeugen so ein wanderndes Magnetfeld, das den Zug mit sich zieht. Die Geschwindigkeit der Bahn hängt von der Frequenz des Wanderfeldes ab. Diese Anordnung aus Fahrzeug und Fahrbahn bezeichnet man als sog. Linearmotor, weil dabei der Elektromotor eine geradlinige Bewegung erzeugt (eben entlang der Fahrbahn). Bei den sonst üblichen Elektromotoren wird ja eine Rotationsbewegung erzeugt. Folgt der Wagen dem Feld, läuft er synchron mit dem Wanderfeld und der Antrieb wird Synchroner Linearmotor bezeichnet. Ist das nicht der Fall, das Feld ist also z.B. schneller als der Wagen, dann spricht man von einem asynchronen Linearmotor.

Das Wanderfeld wird durch den Einsatz von sog. Drehstrom erzeugt. Dort folgen ja die drei Phasen nacheinander. Werden jetzt drei Spulen hintereinander gelegt, die der Reihe nach von den einzelnen Phasen angeregt werden, dann wandert das Feld von der ersten über die zweite bis zur dritten Spule. Mehrere solcher Spulenpakete hintereinander gelegt, erzeugen so ein praktisch endlos realisierbares Wanderfeld, denn die drei Phasen können ja für jedes Paket jeweils wieder eingesetzt werden.

3. Versuchsidee

Die eingestellten Projekte zum Bau einer Magnetschwebebahn, z.B. im Flughafen München, zeigen, dass der Bau und Betrieb sehr kostspielig ist. Auch im Versuch wäre eine nicht unerhebliche Installation nötig, die den Rahmen der Geräteausstattung einer durchschnittlichen Physiksammlung leicht sprengen würde. Doch es geht auch einfacher und anschaulicher:

Ein Drehstromtransformator, eine Fahrbahn mit Rollwagen und drei Spulen bilden hier die Grundausrüstung, um den Antrieb des Transrapid als Funktionsmodell nachzubilden.¹

Bei diesem Versuch kommt es denn auch mehr auf den Effekt an, als letztlich auf exakte Messungen und die Aufnahme von Kennlinien zur Herleitung von Gesetzen.

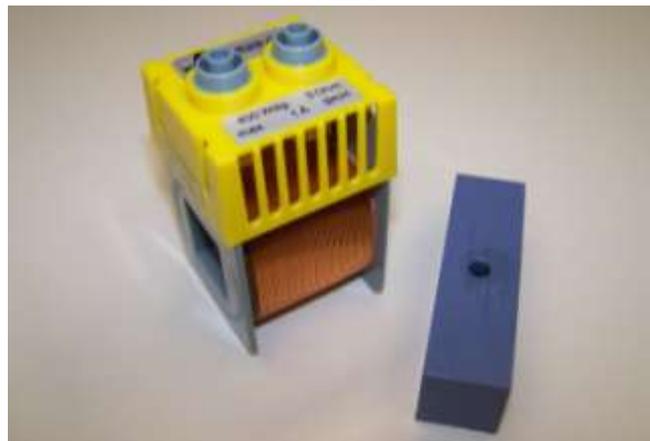
4. Grundlagen zum Versuch

Bekanntermaßen bildet sich um einen stromdurchflossenen Leiter ein magnetisches Feld aus; der Effekt wird durch die Leiterführung in einer Spule noch deutlich verstärkt und ergibt bei Anlegen einer Gleichspannung einen Elektromagneten, dessen Polarität sich gemäß der nachfolgenden einfachen Regel einstellt:

Liegen die gekrümmten Finger der rechten Hand so um eine Spule, daß die Finger in Richtung der sogenannten technischen Stromrichtung zeigen (also entlang der Wicklungen vom Pluspol der Spannungsquelle zum Minuspol²), dann zeigt der Daumen die Richtung der Feldlinien an, also definitionsgemäß vom magnetischen Südpol in Richtung zum magnetischen Nordpol der Spule.



Rechte-Faust-Regel³



Versuchsspule mit Eisenjoch

¹ Nach einer Idee von StR Thomas Wilhelm, Universität Würzburg, Physikalisches Institut, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Am Hubland, 97074 Würzburg

² Die technische Stromrichtung ist entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Elektronen im Leiter definiert. Wenn man jedoch auf die korrekte Flussrichtung Wert legt, kann auch die linke Hand analog benutzt werden. Diese Darstellung ist jedoch weniger verbreitet und stiftet vermutlich nur Verwirrung.

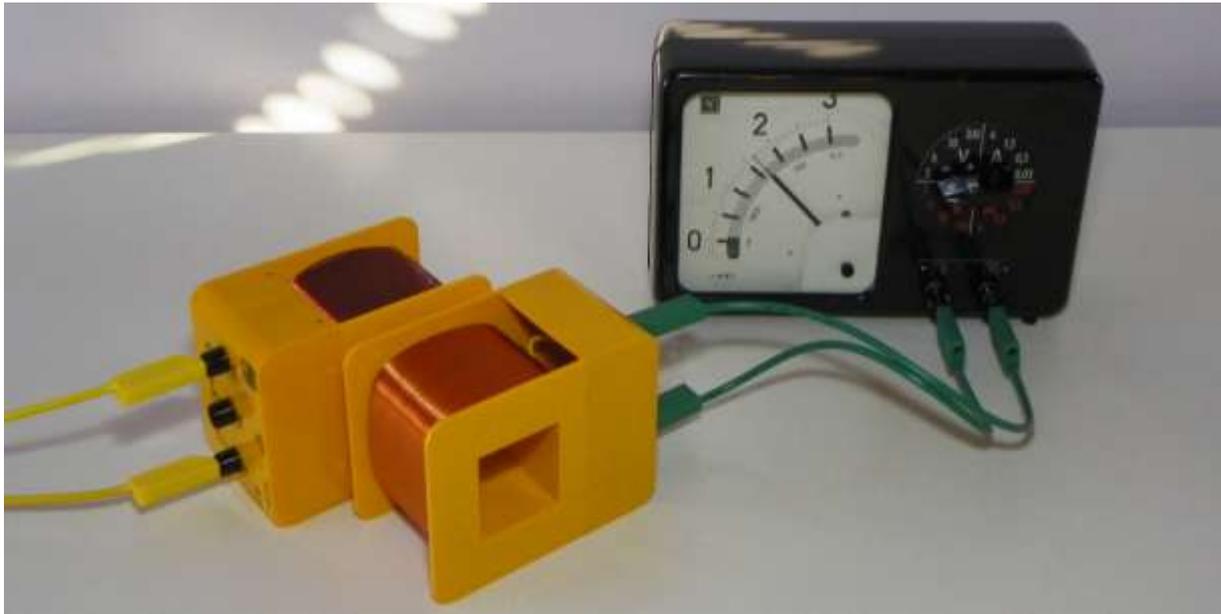
³ Quelle:

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rechte_Daumen_Regel.png&filetimestamp=20060228093152

Durch Einbringen eines ferromagnetischen Kerns in die Spule (Eisenjoch) kann die Stärke des Magnetfeldes der Spule noch wesentlich erhöht werden.

Durch Anlegen einer Wechselspannung an die Spule wird ebenfalls ein Magnetfeld erzeugt, allerdings wechselt dies periodisch (und zwar 50mal pro Sekunde beim Netzstrom) seine Polarität.

Ein weiterer Effekt dieser Anordnung: Das wechselnde Magnetfeld kann in einem weiteren Leiter, einer zweiten Spule z.B., eine Spannung induzieren.



Das Magnetfeld wirkt nämlich auf die freien Ladungsträger (die Elektronen im Metallgitter des Spulendrahtes). Diese Kraft, beschleunigt sie und ihr Strom bewirkt eine Spannung an den Spulenden. Das Prinzip wird u.a. im Transformator angewandt.

Auch in einer Metallplatte, an den Polen der Spule vorbeibewegt oder angehalten, werden die Elektronen durch das Magnetfeld bewegt und in dieser Platte Ströme induziert (sogenannte Wirbelströme, weil die Metallplatte ja ein elektrischer Leiter ist). Und überall wo Ströme fließen, bildet sich wieder ein Magnetfeld. Gemäß der Lenz'schen Regel versucht dies jedoch immer die Ursache seiner Entstehung zu hemmen⁴. Das entstehende Magnetfeld ist also dem verursachenden Magnetfeld entgegengesetzt. Und die Metallplatte wird entweder in Ihrer Bewegung gehemmt (Wirbelstrombremse) oder von der Spule wegbewegt.

Eine einzelne Spule zeigt jedoch nur einen geringen Effekt auf eine vor ihr befindliche Metallplatte. Benötigt werden wenigstens zwei Spulen deren Wechselspannung aufgrund unterschiedlicher Phasenlage zueinander verschoben

⁴ Genauer gesagt, ist es der Induktionsstrom. Dieser ist nach Lenz stets so gerichtet, das er die Ursache seiner Entstehung zu hemmen sucht. Das magnetische Feld ist dann letztlich die Folge des Induktionsstromes.

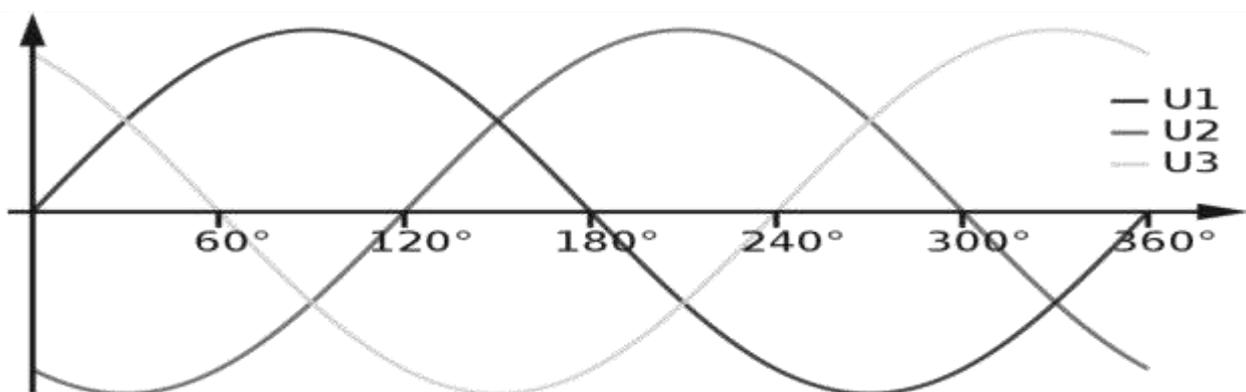
sind - so, das sich ein sogenanntes Wanderfeld einstellt. D.h. für kurze Zeit ist z.B. der magnetische Nordpol zunächst bei der ersten, danach gleich bei der zweiten Spule und so weiter.



Dann kann eine Metallplatte von diesem Wanderfeld „mitgezogen“ werden. Eine praktische Anwendung stellt der klassische Wechselstromzähler⁵ jedes Haushalts dar.

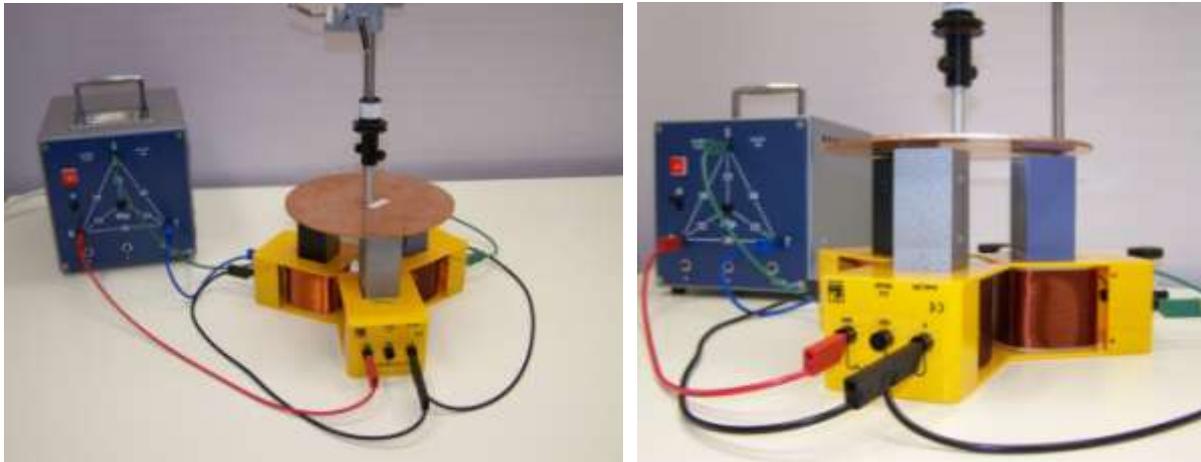
5. Versuchsvorbereitung

Dreiphasenwechselstrom erfüllt in idealer Weise die geforderte Bedingung: Die Phasen der drei Spannungen sind zueinander jeweils um 120° versetzt und drei Spulen hintereinander angeordnet und beschaltet, erzeugen ein entsprechendes Wanderfeld.



⁵ „Wechselstromzähler“ ist ein fürchterliches aber umgangssprachlich verbreitetes Wort für etwas, was es so gar nicht gibt. Strom kann man nicht zählen – also gibt es auch keinen Stromzähler! Er ermittelt die elektrische Arbeit, zählt also faktisch deren Menge in einer Stunde [in kWh].

Greift man die Idee des Wechselstromzählers nochmal auf, so kann folgender Aufbau mit drei Spulen und einer drehbar gelagerten Metallscheibe (hier: Kupfer mit Durchmesser: 200mm und 3mm Stärke (Immerhin knapp 900g!) einen ersten Hinweis auf die zugrunde liegende Versuchsidee liefern.



Die Scheibe wird durch das Wanderfeld mitgezogen – und dreht sich in Folge. Natürlich ist das Wanderfeld der Spulen wegen der 50Hz Netzfrequenz schneller als die Scheibe – und da sich diese Scheibe nicht synchron mit dem Feld bewegt, wird ein derartiger Antrieb, wie bereits erwähnt, **ASYNCHRONER MOTOR** genannt.

Der nächste Gedankenschritt legt nahe, die Scheibe durch eine Platte zu ersetzen, die an den drei, dann nebeneinander liegenden Spulen, entlang gezogen werden würde. Dabei würde die erste Spule mit der Spannung L1, die zweite mit L2 und die dritte Spule mit L3 versorgt werden. Und damit nach drei Spulen die Bahn nicht bereits wieder zu Ende ist, würde ein weiteres Spulentrio in gleicher Weise dahinter geschaltet und danach noch ein Trio und so fort ... bis alle Spulen gleicher Windung der Sammlung verbaut sind.

Um den Gegebenheiten der meisten Sammlungen (d.h. relativ wenig vorhandenes Material) gerecht zu werden, wird die Idee jetzt einfach umgedreht: Die Platte bleibt statisch, die Spulen werden bewegt. Dann genügen drei Spulen auf einem Fahrwagen, die entlang einer Metallleiste – zweckmäßigerweise in einer Schiene – gezogen werden.

Das ist die Idee dieser Versuchsanordnung.

6. Versuchsmaterial

Je nach Verfügbarkeit und Ausstattung der Physiksammlung sind folgende Geräte für die Durchführung des Experiments erforderlich. Dabei unterscheiden sich die Lehrmittel unterschiedlicher Hersteller nur unwesentlich.

1) Drehstromtrenntransformator

Typ: z.B. Leybold-Didactic 52129

(alternativ, wie auf Seite 5 zu sehen Phywe 07480.96 oder ähnliche)



Buchsenanordnung RECHTS verwenden, links stehen „nur“ 6/10V zur Verfügung (Leistung wäre damit aber zu gering!)

Betrieb am aktuellen Drehstromnetz mit $U = 230/400V$ liefert statt der aufgedruckten Spannungen:

Dreieckspannungen

(L1-L2, L2-L3 und L3-L1):

46,0 V bei $I_{max.} = 2,3 A$

Sternspannungen

(L1-N, L2-N und L3-N):

26,6 V bei $I_{max.} = 4,0 A$

Wenn kein Drehstromtransformator zur Verfügung steht, dafür aber wenigstens drei Stelltransformatoren, dann kann ein Drehstromstecker auf drei Schutzkontaktsteckdosen geführt werden, die jeweils mit einem Stelltrafo verbunden sind. Damit stehen an deren Ausgang ebenfalls drei phasenverschobene Spannungen gemäß der Anforderung zur Verfügung.

Weiterer Vorteil: Die Spannungen lassen sich noch einstellen und so spulenschonender anpassen!



2) Fahrbahn und Wagen

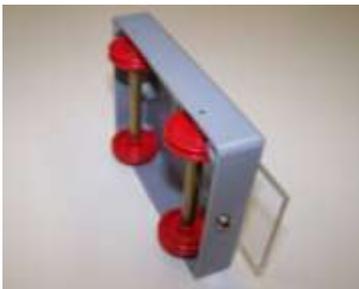
Typ: z.B. Cornelsen Experimenta (Gambke-Physik) bzw. Eigenbau

Fahrwagen # 43289 von Fahrschiene

Cornelsen Experimenta:

z.B. auch: # 47001 von Cornelsen Experimenta, allerdings hier nur 1m lang erhältlich.

Entweder verlängern oder gleich selber bauen:



Vorteil: Er passt auf ein einfaches Alu-U-Profil mit Abstand 60mm

Hier tut es auch ein U-Profil mit einer Breite (d.h. Schienenabstand) von 60mm, je länger, je besser
Hier: 175cm

3) Aluminiumblechleiste Typ: Eigenbau



Dieses Blech wird hochkant entlang der Schiene installiert, idealerweise sollte es also die Länge der Schiene haben.

Abmessungen:

$L_{(\text{Schiene})} \times 30\text{-}60\text{mm} \times \text{mind. } 5\text{mm}$

Hier: passend zur Schiene 175cm

Hinweis: Im Baumarkt gibt es meist Aluminiumprofile zu kaufen. Diese Profile sind oft jedoch Legierungen u.a. mit Siliziumzusatz und zeigen im Versuch nicht die erwünschten Eigenschaften im Hinblick auf die magnetische Induktion. Daher sollte man sich eventuell über einen Schlosser oder per Versand entsprechendes Material besorgen. Hier wurde eine Aluminiumleiste der Legierung AlCuMgPb über den Versandweg erworben.⁶

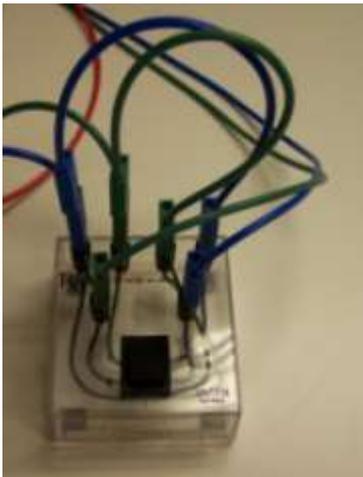
4) Elektropulsen Typ: Phywe 07829.01 (gelb)



Drei Stück benötigt; je:
400 Windungen
3 Ohm, 3 mH, max. 1 A

Zusätzlich 3 I-Kerne
20 x 20 mm und ca. 70mm lang

5) Umschalter (optional) Typ: z.B. ELWE 8495900



Möchte man den Wagen hin- und her fahren lassen, müssen wenigstens zwei Phasen umgepolt werden. Ein 2-poliger Umschalter ist dafür ideal geeignet.

Die Beschaltung erfolgt in der Weise, dass zwei Phasen (hier L2 und L3) beim Schalten vertauscht werden. Vgl. rote Leitung L1 geht unverändert zur Spulenanordnung, grüne und blaue Leitung wird je nach Schalterstellung getauscht.

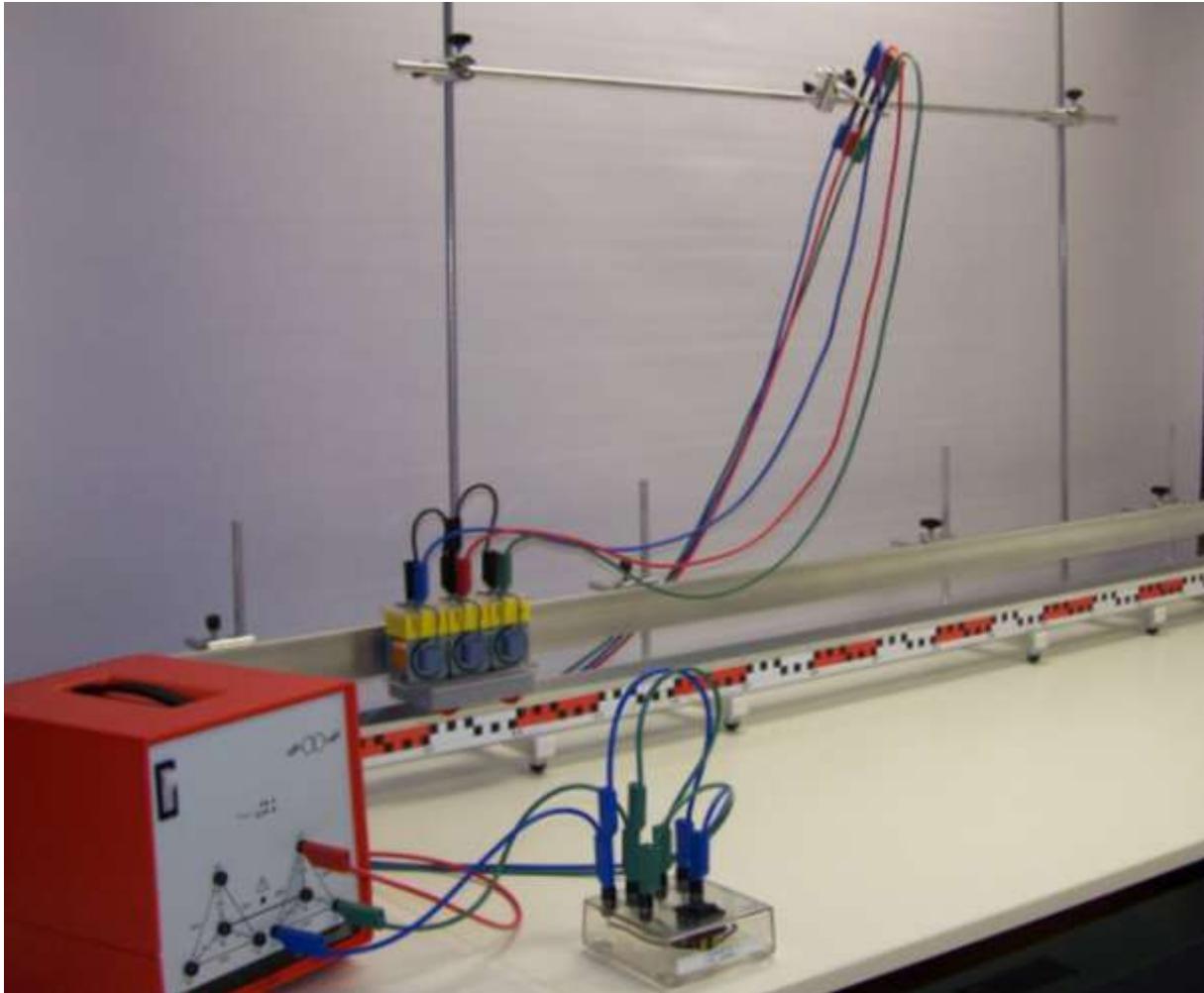
Alt.: Zweipoliger Wechselschalter

Zusätzlich: Messleitungen und Stativmaterial

⁶ Im Internet unter www.alu-verkauf.de relativ günstig zu beziehen. Hier wird auch gleich die gewünschte Länge zugesägt. P.S. Auch die verwendete Schiene, ein U-Profil von 40x60mm stammt von hier. Hier kommt es auf's Material nicht so an, es tut also auch AlMgSi0,5 – wie angeboten. Zusammen mit 10mm Alustangen in entsprechender Anzahl und Länge kann man sich hier mit den nötigen Teilen für den Versuch eindecken.

7. Versuchsaufbau

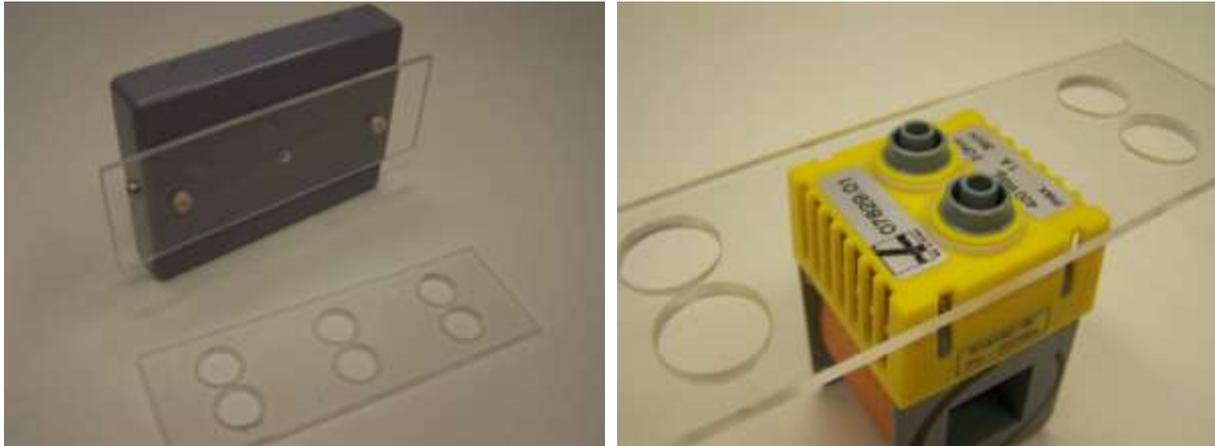
Die Geräte werden wie nachfolgend abgebildet aufgestellt und zueinander ausgerichtet:



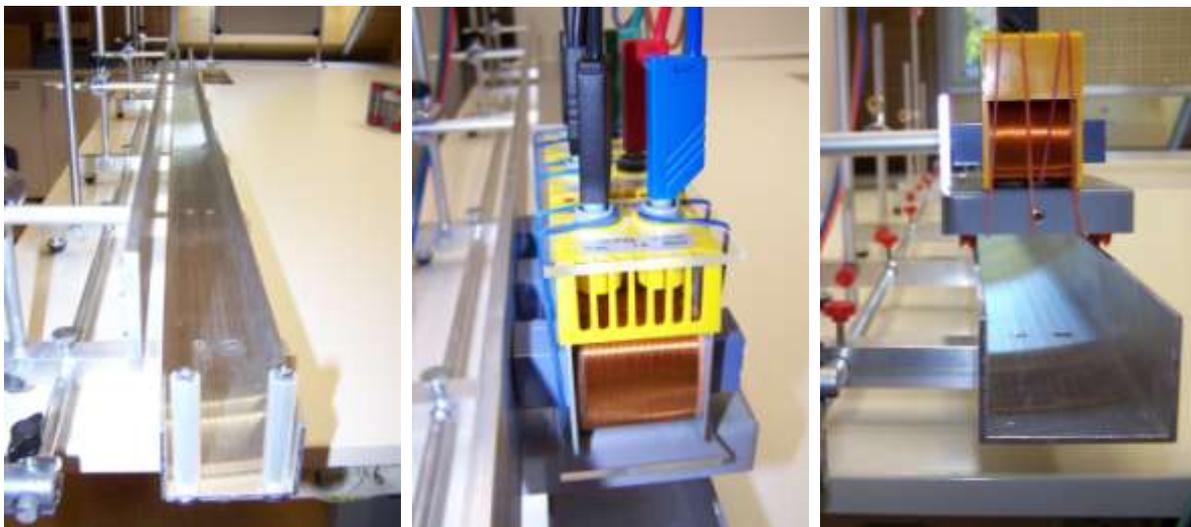
Die Spulen können mit Gummibändern auf dem Fahrwagen befestigt werden – eine kleine Acrylglasplatte oben und unten hilft zur genauen Ausrichtung. Die Bohrungen für die 4mm-Anschluß-Stecker fixieren den ganzen Aufbau und sind mit relativ wenig Aufwand herzustellen.

Passende bereits zugeschnittene Acrylglasplatten gibt es im Elektroversandhandel⁷ - hier müssen dann nur noch die Löcher gebohrt werden. 6x jeweils 16mm Durchmesser in 19mm-Abstand je Spule zueinander (also quer zur Acrylglasplatte) und Abstand der Spulen ca. 48mm (längs zur Platte). Die Befestigung der unteren Platte am Cornelsen-Experimenta-Wagen kann durch kurze Kunststoffschrauben (M4x10) erfolgen. Dazu genügen zwei Bohrungen im Abstand der Gewindebohrungen des Fahrwagens (hier: 94mm).

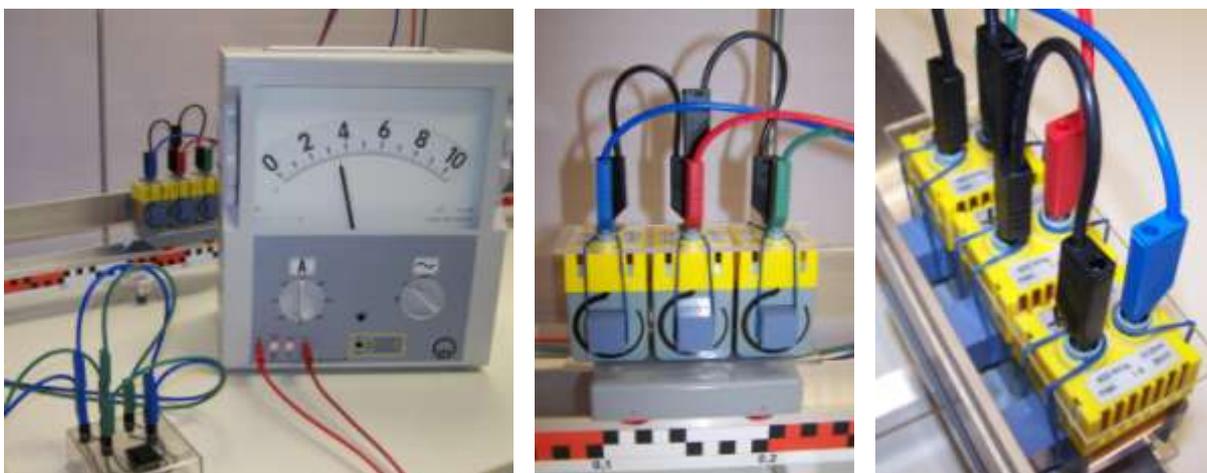
⁷ Hier: Conrad Elektronik in Hirschau unter der Artikel-Nummer: 530735 (Plexiglas, klar 150x50mm)



Die Aluminiumleiste muss auf Höhe der Eisenkerne der Spulen angeordnet werden, dabei ist ein möglichst kleiner Luftspalt zwischen den Kernen und der Schiene einzuhalten – beide dürfen sich jedoch auf ganzer Länge nicht berühren!



Die Beschaltung der Spulen erfolgt in Sternschaltung; dabei ist zu beachten, daß die Spulen lt. Herstellerangaben „nur“ max. 1A vertragen. Eine Messung im Aufbau zeigt jedoch, daß hier fast das Vierfache auftritt. Die Spulen werden denn auch sehr schnell warm – d.h. wiederum: ein- bis zweimal hin und herfahren, danach ABSCHALTEN und Spulen auskühlen lassen!



Die Leitungen zu den Spulen sollten sinnvollerweise den Wagen auf der ganzen Länge nicht behindern und dazu von oben kommend abgehängt werden. Ein Schleifen auf dem Tisch behindert zu sehr. Mit entsprechenden Stativstangen ist das leicht zu realisieren – unter Umständen kann am höchsten Punkt der Anordnung noch einmal mit weiteren Leitungen verlängert werden.

Zum Hin- und herfahren des Wagen kann ein 2poliger Umschalter benutzt werden wie auf Seite 7 beschrieben.



8. Versuchsdurchführung

Der Versuch kann gut vorbereitet werden und benötigt zur Vorführung nur wenige Handgriffe: Event. muss der korrekte Sitz der Spulen, ihrer Kerne und des Wagens in der Schiene noch einmal kurz kontrolliert werden.

Dann kann der Strom eingeschaltet werden und der Wagen sollte sich in Bewegung setzen. Zum Ende der Schiene kann mit dem Schalter die Rückfahrt gestartet werden.

Wie gesagt: Nicht zulange laufen lassen! Die Spulen werden hierbei überlastet und könnten zerstört werden! Und billig sind die ja nicht gerade.

9. Versuchsauswertung

Der Versuch wird – ausnahmsweise – nicht quantitativ ausgewertet, es handelt sich ja wie gesagt lediglich um ein Funktionsmodell und eine Anwendung diverser Regeln und Sätze der Physik, speziell:

- Lenz'sche Regel