

Hannes Pahlke, StRef
Staatliches Studienseminar
für das Lehramt an Gymnasien Mainz

Oppenheim, 5. Oktober 2004

Entwurf der 1. Prüfungslehrprobe

Fach: Physik
Termin: 7. Oktober 2004, 2. Stunde
Uhrzeit: 8:40 - 9:25 Uhr
Schule: Gymnasium zu St. Katharinen Oppenheim
Klasse/Kurs: LK 12
Fachlehrer:
Raum: Ph S2 (=Raumnr. 134)

Prüfungsunterausschuss:

Vorsitz:
Fachleiter:

Thema: Einführung der elektromagnetischen Induktion

1 Lernziele

Die Schülerinnen und Schüler¹ sollen...

- die Entdeckung der Induktion durch Faraday in den wissenschaftsgeschichtlichen Kontext einordnen können,
- das Phänomen der Spannung, die in einem senkrecht zu einem Magnetfeld bewegten Leiter auftritt, durch die Lorentzkraft auf die bewegten Ladungen erklären können,
- die Formel $U = l v B$ aus der Gleichsetzung von elektrischer Kraft und Lorentzkraft herleiten können,
- einen Versuchsaufbau beschreiben können, mittels dessen diese aus Überlegungen gewonnene Formel durch Messungen verifiziert werden kann,
- diese Messungen gegebenenfalls selbständig durchführen beziehungsweise auswerten können,
- das Induktionsgesetz für einen im Magnetfeld bewegten Leiter eigenständig formulieren können und
- dieses Gesetz und die Formel $U = l v B$ auf künftige Problem- und Aufgabenstellungen anwenden können.

¹Im Folgenden nur noch „Schüler“.

2 Geplanter Unterrichtsverlauf

LS	INHALT	METHODEN/ MEDIEN
1 (5')	Einstieg/Problemstellung: Wie kann man mit Magneten Spannung erzeugen? Faraday und sein Vorsatz „ <i>Convert magnetism into electricity.</i> “ Ideen sammeln, wie mittels eines Magneten Spannung erzeugt werden kann.	SV, gUg / OH
2 (5')	Erarbeitung (Phänomen): Umsetzung der Schülervorschläge: In einer durch ein Magnetfeld bewegten Leiterschaukel wird eine Spannung induziert	Demonstrations- experiment
3 (5')	Sicherung (Phänomen): An der Tafel werden Aufbau und Ergebnis des Experiments skizziert.	TA
4 (5')	Erarbeitung (Erklärungsmodell): Aufstellen einer Theorie, die die auftretende Spannung durch die Lorentzkraft auf die im Leiter bewegten Ladungen erklärt. Infolge dieser Theorie kann die Formel $U_{Ind} = Blv$ für die induzierte Spannung abgeleitet werden.	PA, SV / OH
5 (5')	Erarbeitung (Hinführung zum Experiment): Überlegungen zum Versuchsaufbau und zur Durchführung der Messungen „ <i>Wie können wir diesen Zusammenhang und damit unser Erklärungsmodell überprüfen?</i> “ Erklärungen zum Versuchsaufbau	gUg LV
6 (13')	Erarbeitung (Messung): Überprüfung des Zusammenhangs $U_{Ind} = Blv$ durch gezielte Variation aller drei Parameter. Ergebnisse vorhersagen lassen und durch Messungen überprüfen. Ggf. Messergebnisse durch Ergebnisse von im Vorfeld durchgeführten Messungen ergänzen	Demonstrations- experiment / AB OH
7 (5')	Sicherung: Das Erklärungsmodell wird durch die Messungen bestätigt „ <i>Wer kann das Ergebnis der Stunde nochmals in eigenen Worten zusammenfassen?</i> “ Wird ein gerader Leiter der Länge l mit der Geschwindigkeit v senkrecht zu einem Magnetfeld bewegt, so bewirkt die Lorentzkraft eine Spannung $U = lvB$ (Induktionsspannung) zwischen den Enden des Leiters	gUg TA
8 (2')	Hausaufgabenstellung: A 1 S. 231	TA

3 Bemerkungen zur Lerngruppe

Der Leistungskurs Physik der Jahrgangsstufe 12 ist mir schon aus dem vergangenen Jahr bekannt. Ich habe damals über mehrere Wochen in dem Kurs unterrichtet und im Anschluss dort die erste benotete Lehrprobe absolviert. Darüber hinaus kenne ich einige Schüler bereits aus dem angeleiteten Unterricht im Fach Geschichte der 10. Klasse, in der ich eine unbenotete Lehrprobe abgelegt habe. Somit ist den Schülern das Ereignis einer Lehrprobe nicht unbekannt und ich selbst sollte die Lerngruppe in ihrem Verhalten und ihren Fähigkeiten einschätzen können.

Nach meiner aktuellen Beobachtung ist der Kurs unverändert stark für den Unterricht motiviert und an physikalischen Sachverhalten interessiert. Aufgefallen ist mir die inzwischen hohe Selbständigkeit bei der Planung, Durchführung und Auswertung von physikalischen Messungen. Die hierzu notwendige fachspezifische Methodenkompetenz ist durch den Fachlehrer erfolgreich eingeübt worden. Versuche mit dazugehörigen, auch langwierigen Messungen führen die Schüler bereitwillig und aus eigenem Erkenntnisinteresse heraus aus. Sie fragen gezielt nach weiterführenden Zusammenhängen und drängen darauf, ihr Wissen in Übungsaufgaben anzuwenden und zu vertiefen. Der Lehrer ist häufig gefordert, auf die Nachfragen der Schüler wegen unklarer Sachverhalte einzugehen. Umgekehrt kommt es auch vor, dass Schüler Ratschläge zu geben vermögen, wie beispielsweise ein Versuchsaufbau optimiert werden kann.

Zwischen dem Fachlehrer und den Schülern des Kurses besteht ein sehr freundschaftliches Verhältnis, man arbeitet gerne zusammen. Auch mir bereitet der Unterricht im Leistungskurs Physik viel Freude, wenngleich die Schüler mir gegenüber ein stärker distanzierteres Verhalten zeigen. Aber dies mag ungewollt auch meine Erscheinung aus dem umgekehrten Blickwinkel sein. Die Schüler lassen sich in jedem Fall geduldig auf das jeweils durch den Lehrer gewählte Vorgehen ein. Hierzu ist es auch nicht unbedingt erforderlich, im Vorfeld etwa durch eine herausfordernde Aufgabenstellung zu motivieren. (Vgl. Kap. 5.)

Unabhängig von der insgesamt hohen Motivation der Schüler zeigt sich ihr Leistungsvermögen recht differenziert: Zuverlässige und fleißige Mitarbeit sowohl bei praktischen Aufgaben wie im Unterrichtsgespräch zeigen die Schülerinnen A, B und C. D, E und F sind bisweilen etwas zögerlicher mit Meldungen, beteiligen sich nach Aufforderung aber immer bereitwillig und auf gutem Niveau. G und H gehören sicher zu den besseren Schülern, I liefert häufig unkonventionelle Beiträge. Bei schwierigeren Fragestellungen fühlt sich zusätzlich J angesprochen, dessen wertvolle Beiträge seine hohe mathematisch-naturwissenschaftliche Kompetenz widerspiegeln. Insbesondere wenn es um Berechnungen geht, kann man sich auf ihn verlassen. K tut sich manchmal etwas schwerer mit Physik, aber auch wenn er auf Schwierigkeiten stößt, kann das seinem Interesse und seiner Motivation für

das Fach wenig anhaben.

Im Hinblick auf die Lehrprobe bin ich mit dem Handicap konfrontiert, dass L wegen ihrer Teilnahme am USA-Austausch im Unterricht fehlen wird. Sie gehört in vieler Hinsicht zu den herausragendsten Schülerinnen: Durch ihr uneingeschränktes Engagement und ihre schnelle Auffassungsgabe zu jedem beliebigen Zeitpunkt ist sie oft eine große Stütze des Unterrichts. Bei schwieriger und vielleicht auch unklarer Argumentation durch den Lehrer vermag sie noch als letzte zu folgen. Ihre Beiträge, die häufig der Klarstellung dienen, werden in dieser Stunde fehlen.

4 Didaktische Entscheidungen

Vor etwa drei Wochen habe ich mit dem angeleiteten Unterricht im Leistungskurs Physik begonnen. Zuvor hatte der Kurs die Bausteine „Elektrische Wechselwirkung I und II“ des Lehrplans behandelt. In meinem Unterricht wurden dann die Bausteine „Magnetische Wechselwirkung“ und „Teilchen in Feldern“ erarbeitet [1]. Praktisch wurden also die Eigenschaften von Magnetfeldern besprochen, die Lorentzkraft eingeführt und über die Lorentzkraft auf bewegte Ladungen in Magnetfeldern die magnetische Flussdichte \vec{B} als Größe für das Magnetfeld eingeführt. Der Halleffekt wurde untersucht und mittels einer Hallsonde wurden unterschiedliche Magnetfelder von Spulen und Permanentmagneten gemessen und im Fall der Helmholtzspulenordnung optimiert. Die Flugbahn von Elektronen, die in einer Brownschen Röhre durch ein elektrisches Feld abgelenkt werden, wurde ebenso berechnet wie die Kreisbahn von Elektronen in einem homogenen Magnetfeld. Das so begonnene Themengebiet soll in den Stunden vor der Lehrprobe durch die Behandlung von praktischen Anwendungen wie Teilchenbeschleunigern abgeschlossen werden.

Als nächster Pflichtbaustein des Lehrplans schließt sich nun der Block „Elektromagnetische Wechselwirkung I“ an. An seinem Anfang steht die Einführung der elektromagnetischen Induktion. Zwei Wege bieten sich hier didaktisch an:

1.) Bringt man einen Magneten in eine Spule ein, so wird während des Einbringens eine Spannung induziert, die sich nachweisen lässt. Die zeitliche Veränderung eines Magnetfeldes bewirkt demnach in einer von den Feldlinien durchsetzten Drahtschleife ein elektrisches Feld. Die dadurch hervorgerufene Spannung U_{Ind} ist der Änderung der magnetischen Flussdichte proportional, wie sich in entsprechenden Versuchen zeigen lässt:

$$U_{Ind} \sim \dot{B}. \quad (1)$$

Mit weiterführenden Versuchen lässt sich zeigen, dass bei zeitlich unverändertem Magnetfeld auch die Änderung der von den magnetischen Feldlinien durchsetzten Schleifenfläche für eine proportionale Induktionsspannung

sorgt:

$$U_{Ind} \sim \dot{A}. \quad (2)$$

Führt man den magnetischen Fluss Φ als Produkt aus Fläche A und der senkrecht durchsetzenden Flussdichte B ein, so lässt sich zusammenfassend schreiben

$$U_{Ind} = \dot{\Phi}. \quad (3)$$

Das Lehrbuch *Metzler Physik* beschreitet in der Einführung diesen Weg [4]. 2.) Die Alternative besteht darin, die Induktion anhand eines durch ein Magnetfeld bewegten Leiters zu demonstrieren. Wird ein gerader Leiter senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld bewegt, so lässt sich zwischen seinen Enden eine Spannung U_{Ind} abgreifen, die der Länge l des Leiters im Magnetfeld, der magnetischen Flussdichte B und der Geschwindigkeit v proportional ist, wie sich in entsprechenden Versuchen zeigen lässt:

$$U_{Ind} = l v B. \quad (4)$$

Dabei ist zu beachten, dass sich das Voltmeter mit seinen Zuleitungen außerhalb des Magnetfeldes befinden muss. Der – allerdings strittige – „Vorteil“ dieser Methode besteht darin, dass sich die induzierte Spannung mittels der Lorentzkraft auf die im Leiter bewegten Ladungen erklären und der rechnerische Zusammenhang (Gleichung 4) aus diesem Modell ableiten lässt. Dieser Weg erscheint eingängig und elegant: Die Schüler können eine Vorhersage aufgrund ihres bisherigen Wissens treffen und in der Messung bestätigt finden. Das in diesem Kurs eingeführte Physiklehrbuch *Dorn · Bader* beschreitet diesen Weg [2], der wohl auch den in der Schule üblichen Zugang zum Thema der Induktion darstellt. (Vgl. [3, 6, 9].)

Ideal wäre es vielleicht, beide Wege offen zu haben und den Schülern im Einstieg die Entscheidung zu überlassen. Allein die für die nicht einfachen Messungen benötigten Aufbauten zwingen den Lehrer dazu, sich im Vorfeld festzulegen.

Die Induktion wurde im Jahr 1831 durch FARADAY entdeckt, der in Umkehrung des von ØRSTED entdeckten Magnetfelds eines stromdurchflossenen Leiters durch den Einfluss von Magneten Elektrizität zu erzeugen versuchte. Wie der erhaltene Aufbau seines Experiments beweist, hat FARADAY damals nicht die Spannung in einem bewegten Leiter nachgewiesen, sondern die durch ein zeitlich verändertes Magnetfeld induzierte Spannung in einer Spulenwicklung (Transformatorprinzip) [5, S. 122].

Gegen die „Ableitung“ des Induktionsgesetzes mittels der Lorentzkraft lässt sich nun als weiterer Einwand vorbringen, dass das FARADAYsche Induktionsgesetz tatsächlich ein eigenständiges Naturgesetz ist, das als zweite MAXWELL-Gleichung axiomatischen Charakter besitzt:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (5)$$

Zum Nachweis dieses Gesetzes braucht es strenggenommen eine Leiterschleife, in der sich ein Magnetfeld zeitlich ändert. Die Änderung des magnetischen Flusses $\dot{\Phi} = \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ induziert ein elektrisches Feld \vec{E} , dass die Ladungsträger auf dem Integrationsweg entlang der Leiterschleife antreibt. Üblicherweise wird nun vereinfachend das geschlossene Linienintegral $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$ durch die Spannung U_{Ind} ersetzt, was im Hinblick auf die Dimension der Größe auch zutreffend ist. Allein die Größe Spannung wird regelmäßig als eine Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten auf einem Leiter definiert, wie sie aber bei einer Ringspannung mit einem stromdurchflossenen Spannungsmesser nicht gemessen werden kann [7]. Der Autor des Artikels im *Handbuch der experimentellen Physik*, der diesen Einwand bringt, geht noch weiter [7]: Aus einer grundlegenden Betrachtung folgt, dass ein gemessener elektrischer Strom genau zwei Ursachen besitzen kann, ein Ladungsgefälle oder eben ein zeitlich veränderndes Magnetfeld im Bereich einer Leiterschleife. Ersteres drückt sich in einer Potentialdifferenz $\varphi_1 - \varphi_2$ aus. Die elektromagnetische Induktion wird aber korrekt allein durch das Vektorpotential \vec{a} beschrieben, wie es 1861 von MAXWELL in die Theorie eingeführt wurde. Es gilt hier

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } \vec{a}. \quad (6)$$

Allgemein setzt sich somit die Feldstärke \vec{E} aus zwei Anteilen zusammen, nämlich aus $\vec{E}_\varphi = -\text{grad } \varphi$ aufgrund eines lokalen Ladungsgefälles und aus $\vec{E}_a = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{a}$ aufgrund der Magnetfeldänderung in einer geschlossenen Leiterschleife. „Niemals darf eine elektromagnetische Induktionsspannung interpretiert werden mit lokalen Ladungsanhäufungen“, so der Autor des renommierten Handbuchs für die Schulphysik [7, S. 140].

Weniger resolut fordert LAMBECK in einem Aufsatz, die „Ableitung“ des Induktionsgesetzes aus der Lorentzkraft nur „mit Vorsicht“ zu gebrauchen [8]. Wie das *Handbuch der experimentellen Physik* schlägt er ein Vorgehen vor, bei der über eine lange Feldspule eine Leiterschleife gelegt wird. In diese Leiterschleife werden zwei verschieden große Widerstände eingebaut, über denen jeweils die Spannung abgegriffen wird. Das erstaunliche Resultat ist nun, dass die durch eine Änderung des Magnetfeldes induzierten Spannungen entsprechend den Widerständen unterschiedlich groß ausfallen, obwohl sie doch auf den ersten Blick zwischen Punkten auf dem selben Potential abgegriffen werden.

Alle genannten Einwände halte ich für berechtigt. Gleichwohl werde ich in dieser Stunde den traditionellen Weg beschreiten und die Induktion durch eine Ladungsverschiebung in einem stabförmigen Leiter erklären. Dabei kann ich mich auf anerkannte Lehrbücher nicht nur für die Schule [4, 6] sondern auch für den universitären Bereich [10, 11] berufen. Beispielsweise erklärt der „*Gerthsen*“ das Zustandekommen der Induktionsspannung in Analogie zur Hallspannung [11, S. 380f.]: Hier wie dort erfolgt die Verschiebung der

Ladungsträger entlang des Leiters unter dem Einfluss der Lorentzkraft gerade so weit, bis die Lorentzkraft durch das von den Ladungen selbst erzeugte elektrische Gegenfeld \vec{E} kompensiert wird:

$$\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B} \quad (7)$$

Dass dieser Effekt bei einer in einem homogenen Magnetfeld bewegten geschlossenen Drahtschleife nicht auftritt, ist leicht einsichtig. Bei den im Unterricht eingesetzten Experimenten ist jedoch jeweils nur ein Teil der Drahtschleife in das homogene Feld eingetaucht. Die induzierte Spannung ist außerhalb messbar und entspricht genau dem durch das Modell vorhergesagten Wert.

Die genannten Einwände erfolgen von einer hohen theoretischen Warte aus. In der Praxis der Schulphysik wird man jedoch kaum in die Verlegenheit kommen, sich vor dem Hintergrund der MAXWELLSchen Gleichungen rechtfertigen zu müssen. Hier kommt es darauf an, für die Schüler anschauliche Modellvorstellungen zu entwickeln: Es ist schlicht lerntechnisch hilfreich, mit einer Ladungsverschiebung zu argumentieren, auch wenn sie strenggenommen nicht für die Induktionsspannung verantwortlich ist. Gerade zu Beginn eines neuen Themenbereichs erscheint es mir im Hinblick auf die Lerngruppe wichtig, auf vertrautem Wissen aufbauen zu können. Von dem Ergebnis dieser Stunde ausgehend kann dann später die Verallgemeinerung erfolgen: Das Produkt aus l und v lässt sich anschließend leicht als zeitliche Änderung der Fläche A im Magnetfeld interpretieren.

5 Methodische Entscheidungen

Schon früher habe ich die These geäußert, dass dieser Leistungskurs Physik derart am fortschreitenden Wissenserwerb interessiert ist, dass es eigentlich keiner weiteren Motivation zu Stundenbeginn bedürfte. Nichtsdestotrotz habe ich mir Gedanken über einen motivierenden Einstieg in die Stunde gemacht. Allein eine problemorientierte Fragestellung aus dem Alltag liegt hier nicht nahe: Induktionsschleifen, Induktionsherde und Transformatoren sind zu komplex in ihrer Funktionsweise, als dass sie in einer ersten Stunde zum Thema vollständig erklärt werden könnten.² Erfolgversprechender erscheint mir daher der gewählte Einstieg über die historische Problemstellung, die die Schüler gewissermaßen dort abholt, wo sie sich befinden: Auf dem Kenntnisstand von FARADAY 1820 sollen sie versuchen, die Induktion nachzuerfinden.

²Am ehesten geeignet wäre vielleicht der Induktionsherd: Hier wird ein Strom im Topfboden durch ein magnetisches Wechselfeld induziert. Da in dieser Stunde jedoch die Induktion nicht durch ein sich änderndes Magnetfeld sondern durch einen sich bewegenden Leiter eingeführt werden soll, wäre eine Erklärung auch am Ende der Stunde noch nicht erschöpfend möglich. Gleiches gilt für Transformatoren und für Induktionsschleifen, die Teil eines elektrischen Schwingkreises sind.

Dabei sollte ihnen der Umstand zu Hilfe kommen, dass sie vermutlich schon in der 10. Klasse entsprechende Phänomene kennengelernt haben. Eine weitere Hilfe sollte dann sein, dass die entsprechenden Gerätschaften auf dem Pult bereitliegen, so dass der Aufbau durch die Schüler nicht schwerfallen dürfte.

Aufbau und Ergebnis der einführenden Experimente sollen kurz im Tafelanschrieb skizziert werden, um dann im Folgenden als Grundlage für die Erarbeitung zu dienen, in der die Schüler anhand einer Skizze auf vorbereiteten Arbeitsblättern selbst eine Theorie entwickeln sollen, die das beobachtete Phänomen zu erklären und gleichzeitig eine Vorhersage über den quantitativen Zusammenhang zu geben vermag. Den Schülern sollten dieser Schritt leicht fallen, da die Argumentation im Fall des bereits behandelten Halleffekts ganz ähnlich ist.

Der so gefundene Zusammenhang scheint verblüffend einfach. Jetzt ist der Kurs jedoch vor die Aufgabe gestellt, die Vorhersagen des Modells im Experiment zu überprüfen. Der Versuchsaufbau selbst ist nicht ganz einfach, so dass ich gegebenenfalls einige Erklärungen dazu geben muss.

Die Schüler würden von sich aus ohne weiteres drei Messreihen durchführen, um die Proportionalitäten $U \sim B$, $U \sim l$ und $U \sim v$ im Einzelnen zu überprüfen. Jedoch fehlt für ein solches Vorgehen in einer Einzelstunde die Zeit, und nicht an der Messung beteiligte Schüler wären währenddessen weitgehend unbeschäftigt. Daher plane ich die experimentelle Überprüfung zu verkürzen, indem die Induktionsspannung nur für ausgesuchte Parameter gemessen und mit dem zuvor errechneten Wert verglichen wird. Problematisch ist dabei, dass die Geschwindigkeit an diesem Aufbau nicht gezielt vorgewählt werden kann. In diesem Fall ist also keine Vorhersage des Ergebnisses vor der Messung möglich. Sofern nach den Messungen noch Zweifel an den Ergebnissen verbleiben sollten oder es zu unerwarteten Schwierigkeiten bei der Versuchsdurchführung oder zu Zeitverzug kommen sollte, werde ich die Auswertung von ausführlichen Messreihen bereithalten, die ich im Vorfeld mit dem Aufbau aufgenommen habe.

Anschließend an das Experiment soll das Ergebnis kurz diskutiert werden. Dabei sollte deutlich werden, dass sich das Modell durch die erfolgreiche Vorhersage als nützlich erwiesen hat. Gegebenenfalls können an dieser Stelle aber auch die Grenzen des Modells zur Sprache kommen. (Vgl. Kap. 4.)

Die Hausaufgabe, eine Aufgabe aus dem eingeführten Lehrbuch, verlangt von den Schülern nicht nur, die gefundene Formel auf ein praktisches Problem anzuwenden, sondern fordert auch weiteres Nachdenken bezüglich der Allgemeingültigkeit des gefundenen Zusammenhangs ein. Dass die Schüler das Rechnen mit den Formeln üben, ist gerade im Hinblick auf die in einer Woche bevorstehende Kursarbeit für sie wichtig.

Literatur

- [1] MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND WEITERBILDUNG RHEINLAND PFALZ (HG.): *Lehrplan Physik. Grund- und Leistungsfach. Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe)*. Worms o.J.
- [2] FRANZ BADER (HG.): *Dorn·Bader. Physik Sek II*. Gymnasium Gesamtband. Hannover 2000. [Eingeführtes Lehrbuch].
- [3] FRANZ BADER/FRIEDRICH DORN (HG.): *Dorn·Bader. Physik-Oberstufe Gesamtband 12/13*. Hannover 1986.
- [4] JOACHIM GREHN (HG.): *Metzler Physik*. Gesamtband. Hannover 21992.
- [5] WALTER GREULICH (HG.): *Lexikon der Physik*: in sechs Bänden. Band. 3. Heidelberg 1999.
- [6] KLAUS JUPE/MARGRIT LUDWIG (HG.): *Kursthemenn Physik. Elektrodynamik*. Frankfurt 1996.
- [7] WILFRIED KUHN (HG.): *Handbuch der experimentellen Physik. Sekundarbereich II* Bd. 5/I: *Elektrizitätslehre*. Köln 1998.
- [8] MARTIN LAMBECK: *Lorentzkraft und Induktionsgesetz*. – In: *Praxis der Naturwissenschaften. Physik*. **33** (1984), S. 257-260.
- [9] RUDOLF LEHN: *Elektromagnetische Induktion*. 29.9.2002. [Unterrichtskript]. <http://www.sfz-bw.de/unterricht/ph/LK12ElektromagnetischeInduktion.pdf>.
- [10] PAUL A. TIPLER: *Physik*. Heidelberg u. a. 1992.
- [11] HELMUT VOGEL: *Gerthsen Physik*. Berlin, Heidelberg ¹⁹1997.

A Einstiegsfolie

„Convert magnetism into electricity“

1820 erregte ØRSTED mit seiner Flugschrift Aufsehen. Er teilte mit, der Strom bewege Magnetnadeln. Die Gelehrten Europas faszinierte diese für viele unerwartete Verbindung von Elektrizität und Magnetismus. FARADAY wollte diesen Effekt umkehren und schrieb in sein Notizbuch: „Convert magnetism into electricity“.

1831 gelang es ihm, mit Magneten Spannung zu „induzieren“. Eine Parlamentskommission fragte ihn, wozu man das brauchen könne. Er sagte: „Das weiß ich nicht, wohl aber, dass Sie Steuern darauf nehmen werden“.


Wie kann man mit Magneten Spannung erzeugen?

Aus: FRANZ BADER/FRIEDRICH DORN (HG.): Dorn · Bader. Physik-Oberstufe Gesamtband 12/13. Hannover 1986. S. 116.

B Geplantes Tafelbild

ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION

Versuch:



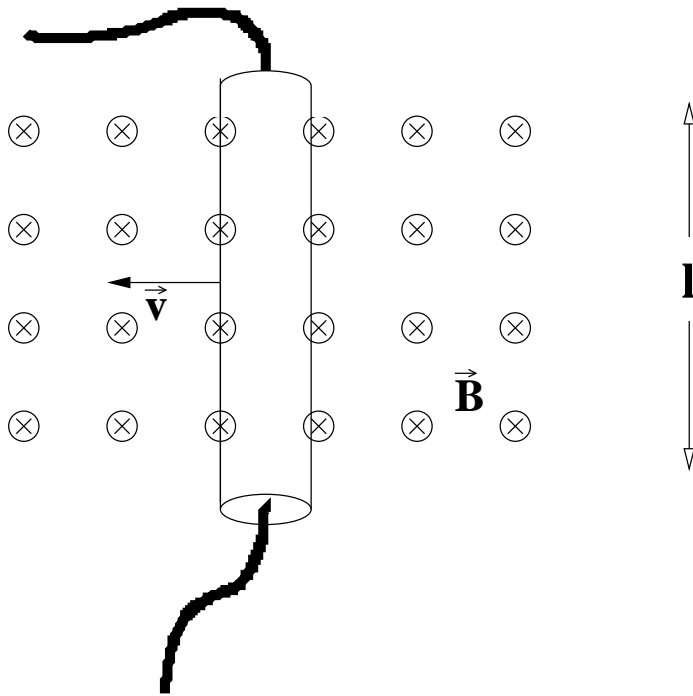
Beobachtung: Induktionsspannung je nach Bewegungs- u. Magnetfeldrichtung

Wird ein gerader Leiter der Länge l mit der Geschwindigkeit \vec{v} senkrecht zu einem Magnetfeld bewegt, so bewirkt die Lorentzkraft eine Spannung $U = l \cdot v \cdot B$ zwischen den Enden des Leiters

C Arbeitsblatt I/Folienbild

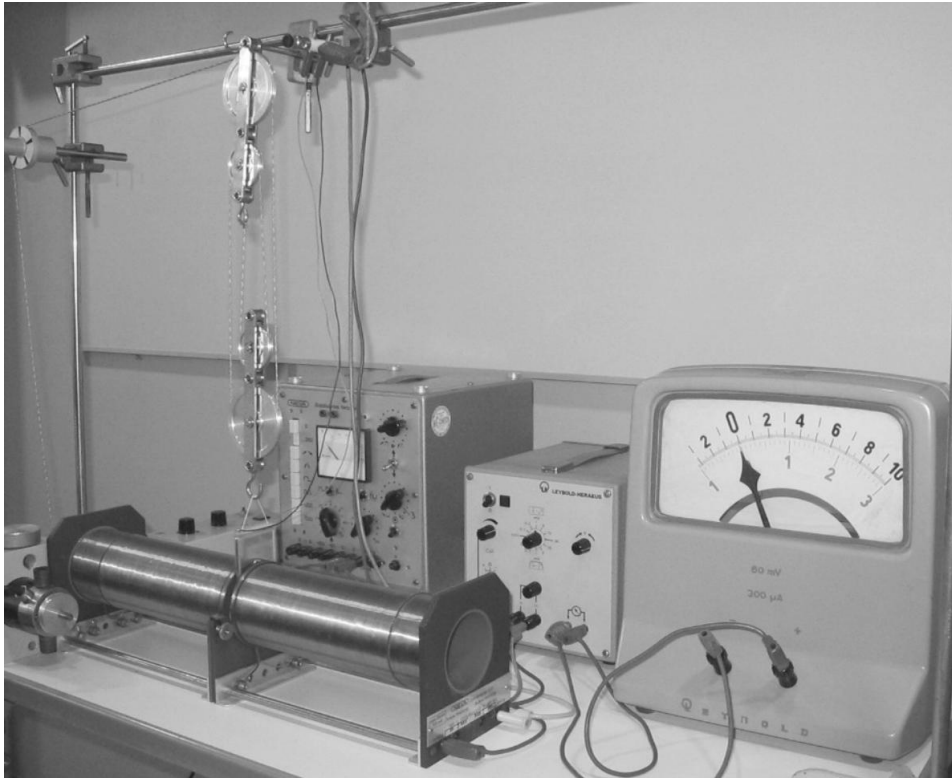
Versuchen Sie, mittels Überlegungen und einer Skizze eine Erklärung für die auftretende Spannung zu finden!

Wovon hängt die Spannung ab?



D Arbeitsblatt II/Folienbild

MESSUNG DER INDUKTIONSSPANNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON l , v , B



Berechnen Sie die Induktionsspannung U für verschiedene Kombinationen aus B , l und v . Folgende Einschränkungen sind zu beachten:

B : 1 bis 4 mT

l : 5 m (100 Windungen) oder 25 m (500 Windungen)

v : ca. 0,2 bis 1 cm/s; jedoch nicht gezielt einstellbar

l in m	v in cm/s	B in mT	$U = l v B$ in mV	U_{Messung} in mV

E Messergebnisse aus Vorversuchen

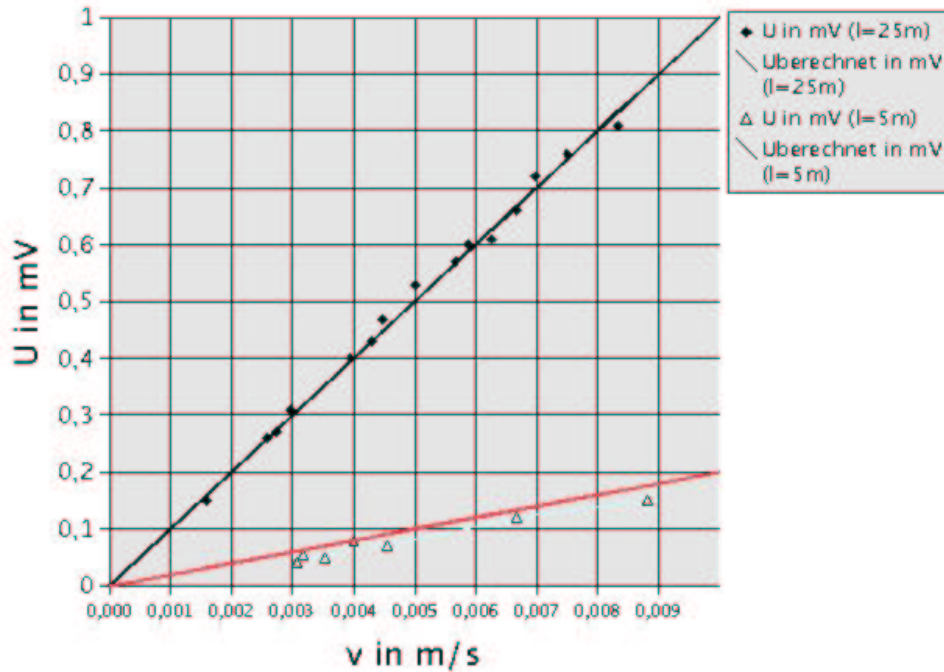


Abbildung 1: Die Abhängigkeit der induzierten Spannung von der Geschwindigkeit der Leiterschleife relativ zum Magnetfeld für unterschiedliche Leiterlängen (500 Windungen entsprechend 25 m und 100 Windungen entsprechend 5 m). Ergebnisse einer Messung mit dem vorbereiteten Versuchsaufbau. Zum Vergleich dargestellt der sich nach der Formel ergebende Zusammenhang (Durchgezogene Kurven). Das Magnetfeld war jeweils $B = 4 \text{ mT}$.

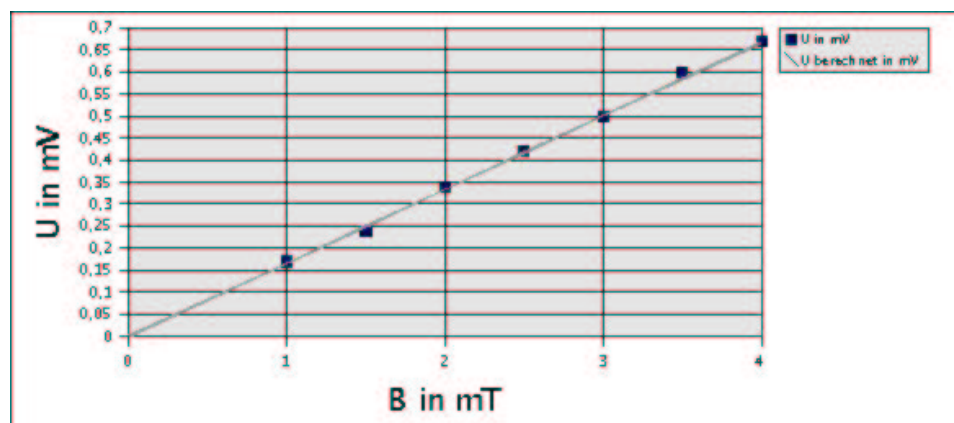


Abbildung 2: Die Abhängigkeit der induzierten Spannung vom Magnetfeld. Ergebnisse einer Messung mit dem vorbereiteten Versuchsaufbau und Darstellung der mit der hergeleiteten Formel errechneten Induktionsspannung. Die Parameter waren $v = 0,0067 \text{ m/s}$, $l = 25 \text{ m}$.

F Hausaufgaben

- Ein Eisenbahnzug fährt mit 40 m/s über eine waagrechte Strecke. Zwischen den isolierten Schienen (Spurweite 1435 mm) liegt ein Spannungsmesser. Was zeigt er an, wenn die Vertikalkomponente des Erdmagnetfeldes $B_v = 0,43 \cdot 10^{-4} \text{T}$ beträgt? Spielt die Zahl der Achsen eine Rolle?
 - Was zeigt ein mitfahrender Spannungsmesser an? Könnte man mit diesem Effekt einen Wagen beleuchten?

Aus: [2, S. 231]