

**Schriftliche Arbeit gemäß § 32 (5) OVP 2011 im Fach
Physik**

Prüfling:	Dr. Wieczorek, Daniel Johann
Ausbildungsschule:	Freiherr-vom-Stein-Gymnasium Leverkusen
Datum der Prüfung:	Montag, 06.03.2017
Unterrichtszeit:	10:55 – 11:40
Lerngruppe:	9e
Lerngruppengröße:	28
anwesender Fachlehrer:	Jörg Flothow

Thema der unterrichtspraktischen Prüfung:	Wovon hängt die Sekundärspannung beim Transformator ab? Vom Hochspannungstransformator zum Übersetzungsverhältnis der Spannungen im Schülerversuch
Bezeichnung der zugehörigen Unterrichtsreihe	Strom für zu Hause – “Erzeugung” und Übertragung elektrischer Energie

Prüfungsausschuss

Vorsitz:

Seminarausbilder:

(an der Ausbildung beteiligt)

Seminarausbilder:

(an der Ausbildung nicht beteiligt)

Inhaltsverzeichnis

1	Langfristige Planung des Unterrichtsvorhabens	3
1.1	Aufbau des Unterrichtsvorhabens	3
1.2	Kompetenzen	4
1.3	Sachanalyse	4
1.4	Lernvoraussetzungen und Lernausgangslage	5
1.5	Didaktische Überlegungen	6
1.6	Begründung der wesentlichen methodischen Entscheidungen	8
2	Planung der Unterrichtsstunde	9
2.1	Lernziele	9
2.2	Sachanalyse	9
2.3	Lernvoraussetzungen und Lernausgangslage	9
2.4	Didaktische Überlegungen	10
2.5	Begründung der wesentlichen methodischen Entscheidungen	12
3	Verlaufsplan	14
4	Literatur	15
5	Erklärung	16

1 Langfristige Planung des Unterrichtsvorhabens

1.1 Aufbau des Unterrichtsvorhabens

Datum	Thema	Kompetenzzuwachs
11.01.2017	Wie richtet sich die Nadel aus? Interpretieren und Erstellen von Feldlinienbildern im Schülerversuch	Feldlinienbild eines Stabmagneten und eines Leiters skizzieren können, Ausrichtung einer Kompassnadel anhand eines Feldlinienbilds vorhersagen können
18.01.2017	Wie sieht das Feldlinienbild einer Spule aus? Erstellen des Feldlinienbilds im Schülerversuch Wovon hängt die induzierte Spannung ab? Durch Bewegung eines Magneten in einer Spule zu einer vorläufigen Formulierung des Induktionsgesetzes im Schülerversuch	Versuch zur Vermessung des Magnetfelds einer Spule beschreiben und durchführen können, Feldlinienbild zeichnen können, Einfluss eines Eisenkerns beschreiben können Versuch zum Induktionsgesetz (durch Bewegung eines Magneten) beschreiben, durchführen und auswerten können
Unterrichtsausfall (25.01.2017: Zeugniskonferenz, 01.02.2017: Methodentag, 08.02.2017: Pädagogischer Tag)		
15.02.2017	Sicherheitsbelehrung (Halbjahresbeginn) Wie kann man Spannung induzieren, ohne Magnete zu bewegen? Von der Induktion mit Elektromagneten zur Notwendigkeit des Wechselstroms im Schülerversuch Wie kann man einen schwingenden Magnet bremsen? Einführung der Lenz'schen Regel im Lehrerversuch	Magnetfeldänderung bei ruhender Spule als Ursache der induzierten Spannung nennen können, Induktionsgesetz nennen können Versuch zur Lenz'schen Regel beschreiben und erklären können, Lenz'sche Regel nennen können
22.02.2017	Wieso leuchtet die Lampe, wenn man die Spule dreht? Erarbeitung der Funktionsweise eines Generators	Aufbau eines Generators beschreiben und skizzieren können, Erzeugung von Wechselspannung mit dem Induktionsgesetz erklären können, Wechselspannung skizzieren können
01.03.2017	Warum wird das Drehen an der Kurbel des Dynamot mit steigender Stromstärke schwerer? Wie überträgt man elektrische Energie mit einem Magnetfeld? Erarbeitung der Funktionsweise eines Transformators	Belasteten Generator qualitativ mit Hilfe der Lenz'schen Regel erklären können Transformator skizzieren und Funktionsweise erklären können
06.03.2017	Wovon hängt die Sekundärspannung beim Transformator ab? Vom Hochspannungstransformator zum Übersetzungsverhältnis im Schülerversuch	Versuch zum Übersetzungsverhältnis beschreiben, durchführen und auswerten können, ggf. $\frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2}$ nennen und anwenden können
08.03.2017	Warum schmilzt der Nagel? Vom Hochstromtransformator zum Übersetzungsverhältnis der Stromstärken im Lehrerversuch	Versuch zur Stromtransformation beschreiben können, $\frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1}$ herleiten, nennen und anwenden können
15.03.2017	Welche elektrischen Energieströme benötigen wir alltäglich, und wie werden sie erzeugt?	Größenordnung des Bedarfs an elektrischer Energie nennen können, "Erzeugungsmethoden" nennen und ökologisch beurteilen können
22.03.2017	Schriftliche Leistungsüberprüfung	

1.2 Kompetenzen

Konzeptbezogene Kompetenzen: Die Schülerinnen¹

- beschreiben den Aufbau von Systemen und erklären die Funktionsweise ihrer Komponenten (Kraftwerke, Energieversorgung; S6),
- beschreiben Energieflüsse in den oben genannten offenen Systemen (S7),
- beschreiben den Aufbau von Generator und Transformator und erklären ihre Funktionsweise mit der elektromagnetischen Induktion (W19).

Prozessbezogene Kompetenzen:

Die Schüler

- stellen Hypothesen auf, planen geeignete Untersuchungen und Experimente zur Überprüfung, führen sie unter Beachtung von Sicherheits- und Umweltaspekten durch und werten sie unter Rückbezug auf die Hypothesen aus (E8),
- beschreiben, veranschaulichen oder erklären physikalische Sachverhalte unter Verwendung der Fachsprache und mit Hilfe von geeigneten Modellen, Analogien und Darstellungen (E11),
- beschreiben, veranschaulichen und erklären physikalische Sachverhalte unter Verwendung der Fachsprache und Medien, ggfs. mit Hilfe von Modellen und Darstellungen (K4),
- dokumentieren und präsentieren den Verlauf und die Ergebnisse ihrer Arbeit sachgerecht, situationsgerecht und adressatenbezogen auch unter Nutzung elektronischer Medien (K5),
- beurteilen und bewerten an ausgewählten Beispielen empirische Ergebnisse und Modelle kritisch auch hinsichtlich ihrer Grenzen und Tragweiten (B1).

1.3 Sachanalyse

Bezeichnet $\Phi = \int_A B$ den magnetischen Fluss durch eine Leiterschleife $C = \partial A$, die den Rand der Integrationsfläche bildet, so gilt für die längs der Schleife induzierte Spannung $U_{ind} = -\dot{\Phi}$ (Induktionsgesetz). Für eine Spule mit n Windungen gilt entsprechend $U_{ind} = -n\dot{\Phi}$. In den Statorspulen eines Kraftwerksgenerators wird eine periodische Flussänderung typischerweise durch einen rotierenden Elektromagneten erreicht, sodass eine sinusförmige Wechselspannung induziert wird. Dasselbe Ergebnis kann erreicht werden, wenn eine Spule in einem homogenen Magnetfeld rotiert. Sobald ein Verbraucher angeschlossen wird, stellt sich aufgrund U_{ind} ein Strom ein, der so gerichtet ist, dass die resultierende Lorentzkraft auf den Rotor diesen bremst (Lenz'sche Regel).

Wird nun an eine Spule eine Wechselspannung angelegt, so fließt ein Wechselstrom², der seinerseits ein magnetisches Wechselfeld bedingt. Dieses kann in einer anderen Spule eine Wechselspannung induzieren; dies ist das Funktionsprinzip eines Transformators. Die Höhe

¹Dieser Text verwendet die von Nothbaum und Steins (2010) vorgeschlagene stochastische Genuswahl für eine geschlechtergerechte, aber dennoch gut lesbare und orthographisch korrekte Sprache, bei der das verwendete Genus durch einen Münzwurf gewählt wird.

²Die exakte Diskussion der Phasenbeziehungen und weitere Details der Wechselstromtechnik wie Dreiphasentransformatoren führt in einer auf Stufe 9 ausgerichteten didaktischen Sachanalyse zu weit.

der induzierten Spannung hängt dabei von der angelegten Spannung und den Windungszahlen der verwendeten Spulen ab – näheres findet sich in 2.2. Wird sekundärseitig ein Verbraucher angeschlossen, so bedingt der sich einstellende Strom ein magnetisches Wechselfeld, das seinerseits die Drosselwirkung der Primärspule schwächt (Lenz'sche Regel), sodass primärseitig ein größerer Strom fließt – auf diese Weise passt sich die Leistungsentnahme an den Verbraucher an.

Das durch den Transformator ermöglichte "Hochspannen" ist für die effiziente Energieübertragung über weite Strecken wesentlich, da gemäß $P = UI$ für einen Energiestrom P ein umso kleinerer elektrischer Strom I erforderlich ist, je höher die Spannung U ist. Behandelt man die Stromleitungen als Ohm'sche Verbraucher, so ergibt sich für die Verlustleistung $P_V \sim U^{-2}$.

1.4 Lernvoraussetzungen und Lernausgangslage

Der Autor unterrichtet die Lerngruppe seit Februar 2016 im Ausbildungsunterricht. Die Klasse ist ausgesprochen leistungsstark; zum Halbjahr gab es lediglich drei nicht mindestens befriedigende Leistungen. Die sachbezogene Aktivität ist in allen Phasen des Unterrichts vergleichsweise hoch, auch in Plenumsphasen kann stets mit zahlreichen Wortmeldungen gerechnet werden, die den Unterricht häufig ohne allzu starke Lenkung durch den Lehrer substanziell voranbringen. Sprachliche Probleme sind in dieser Lerngruppe nicht vorhanden, vielmehr sind viele Schüler in der Lage, ihre Gedanken für diese Klassenstufe ungewöhnlich präzise zu formulieren. Hinzu kommt im Bereich der Elektrik ein ausgeprägtes Sach- und Fachinteresse, was sich mitunter auch durch relativ weitschweifige, aber dennoch fachbezogene Fragen äußert, auf die nicht immer während der Unterrichtszeit eingegangen werden kann. Die Lerngruppe hat eine hohe Affinität zu Schülerexperimenten, die daher so häufig eingesetzt werden, wie es mit Blick auf den angestrebten Kompetenzzuwachs sinnvoll ist. Gleichwohl könnten 3 von 8 Bankgruppen in Experimentierphasen aus Sicht des Autors noch planvoller vorgehen, weswegen insbesondere in der zu zeigenden Prüfungsstunde ein Fokus auf die Planung eines Experiments gelegt wird. Üblicherweise arbeitet der Autor in Arbeitsphasen mit dem Fachlehrer im Team, sodass bei Lernschwierigkeiten die Schülerinnen zügig beraten werden können.

In Bezug auf die fachlichen Voraussetzungen für die Unterrichtsreihe ist davon auszugehen, dass alle Schülerinnen Spannung als Ursache des elektrischen Stroms kennen und durch den häufigen Einsatz des Dynamot auch elektrischen Strom vom elektrischen Energiestrom abgrenzen können. Aus internen Gründen wurde in dieser Klasse die Behandlung des Magnetismus in Jahrgangsstufe 6 vernachlässigt, sodass die Reihe notwendig mit einer Wiederholung einiger elementarer Fakten beginnen muss.

1.5 Didaktische Überlegungen

Der Teilkontext “Strom für zu Hause – “Erzeugung” und Übertragung elektrischer Energie” ist im Kernlehrplan dem Inhaltsfeld “Energie, Leistung und Wirkungsgrad” zuzuordnen und entstammt dem Rahmenkontext “Elektrische Anlagen zur Energieübetragung”, der auf dem Standardwerk “Neue Wege im Elektrikunterricht” beruht (Muckenfuss und Walz, 1997).³

Das von Muckenfuß (2006, S. 328ff) didaktisch begründete Konzept der Kontextorientierung basiert auf zwei Zielsetzungen: Einerseits soll Wissenschaftsverständigkeit durch den “Erwerb *zentraler Begriffe, grundlegender Konzepte, Theorien und Modelle[n] aus Naturwissenschaft und Technik, in denen heute Weltdeutung versucht wird*” (Hervorhebung im Original, ebd., S. 328) im Hinblick auf die damit verbundene Verantwortung des Individuums in einer demokratischen Gesellschaft gefördert werden. Insbesondere soll dazu die methodische Unterrichtsgestaltung nicht ausschließlich an einem – für sich allein genommen wissenschaftstheoretisch auch absurden – “Normalverfahren” wie etwa von Mottes orientiert sein, um auch die Qualität naturwissenschaftlichen Wissens beurteilen zu können. Andererseits sollen im kontextorientierten Unterricht “*lebenspraktisch relevante Inhalte (partiell) [erschlossen werden]*” (Hervorhebung im Original, ebd., S. 328), wobei dies für Muckenfuß keine rein motivationspsychologisch begründete Forderung ist, sondern vielmehr auch Klafkis Forderung nach der Behandlung epochaltypischer Schlüsselprobleme nachkommt. Insofern handelt es sich um keine reine Lern-, sondern um eine Bildungstheorie, die ihrer Anlage nach auch Fragen nach übergeordneten, von Fachinhalten losgelösten Erziehungszielen, insbesondere der Orientierung und Entscheidungsfähigkeit in einer stark von Wissenschaft und Technik bestimmten Welt, beantworten soll.

Eine Besonderheit des gesamten Elektrikunterrichts ist, dass die Schülerinnen ausschließlich mit Geräten konfrontiert werden, deren bloße Existenz entscheidend auf den im Unterricht zu vermittelnden fachlichen Inhalten beruht, sodass die Entwicklung der Grundbegriffe aus Begegnungen mit Alltagsphänomenen heraus grundsätzlich nicht möglich ist. Fachlich gesehen hat der Unterricht daher mitteilenden Charakter, und im Sinne der Transparenz hat der Autor dies den Schülern gegenüber stets offen kommuniziert. Zugleich bietet die Theoriegeladenheit aber auch die Chance, prozessbezogene Kompetenzen im Bereich Erkenntnisgewinnung und Kommunikation durch den notwendigen Umgang mit Modellen und fachsprachlichen Begriffen zu fördern. Die Sinnstiftung durch den Kontext und die Legitimation der Inhalte rührt daher, dass die Übertragung elektrischer Energie die Lebensgestaltung der Schülerinnen in für sie kaum vorstellbarem Ausmaß beeinflusst: die Schüler haben in der Einführungsstunde des Kontexts zahlreiche Beispiele für elektrische Anlagen nennen können, waren aber kaum in der Lage, sich in die Lage eines Menschen zu versetzen, der nicht über diese Möglichkeiten verfügt. Die Frage nach der “Erzeugung”

³Der inhaltliche Aufbau des Unterrichtsvorhabens entspricht dieser Quelle, ist aber gleichzeitig durch die Sachstruktur so stark determiniert, dass auf weitere Verweise verzichtet wird. Ähnliche Ideen finden sich auch bei Berge und Lichtenstern (2007) und Volkmer (2007).

elektrischer Energie und dem verschwenderischen Umgang mit ihr berührt zudem ethische Fragen im Bereich des verantwortungsvollen individuellen wie gesamtgesellschaftlichen Umgangs mit technischen Errungenschaften und die Abschätzung der Folgen für die Umwelt.

Die Unterrichtsreihe beginnt mit einer Übersicht über die wichtigsten Bestandteile des öffentlichen Stromnetzes, um den Schülern eine Orientierung im Rahmenkontext zu ermöglichen; der Fokus liegt auf dem Generator und dem Transformator. Der Sinn von Hochspannungsleitungen ist bereits aus der vorhergehenden Unterrichtsreihe bekannt, da die Schülerinnen anhand einer brennenden Kabeltrommel erkannt haben, dass die Verlustleistung entscheidend von der Spannung abhängt.

Bei der Wiederholung des Magnetismus wird besonderer Wert auf den gedanklichen Schritt vom Verhalten einer Magnethenkel in der Umgebung des Magneten zum Feldlinienbild als Modell des Magnetfelds gelegt. Die als Phänomen bereits bekannte Induktion wird halbquantitativ untersucht, indem mit Spulen mit verschiedener Windungszahl gearbeitet und die Orientierung und Geschwindigkeit des bewegten Magneten variiert wird. Das gleiche Ergebnis kann durch Bewegung einer Spule auf dem Kern eines Elektromagneten erreicht werden; hier ergibt sich allerdings zusätzlich die Möglichkeit, durch das Ein- und Ausschalten des Elektromagneten eine Spannung zu induzieren und damit bereits auf qualitativer Ebene die Funktionsweise eines Transformators zu entdecken. Zusätzlich wird hierdurch die Frage nach Wechselstrom aufgeworfen.

In den behandelten Beispielen findet durch die Induktion keine nennenswerte Energieübertragung statt. Der Standardversuch zur Demonstration der Lenz'schen Regel, bei dem ein schwingender Magnet durch eine kurzgeschlossene Spule gebremst wird, ermöglicht auch eine immanente Wiederholung des Energieerhaltungssatzes: Dem Magneten muss ständig Energie zugeführt werden, da anderenfalls die Spule nicht zur Quelle elektrischer Energie werden kann.⁴ Zusätzlich wird auch die Spannung als Ursache des Stroms wiederholt.

Das Feldlinienbild ermöglicht eine ikonisch-dynamische Deutung des im eingeführten Schulbuch lediglich sprachlich vorliegenden Induktionsgesetzes: Wenn sich die Zahl der Feldlinien ändert, die eine Spule durchstoßen, dann wird in der Spule eine Spannung induziert. Diese Formulierung ist anschlussfähig für die Behandlung des Themas in der Oberstufe und ermöglicht den Schülern die selbsttätige Erklärung des Generators. Hierzu wird im Unterricht zunächst mit dem großen Generator eine Lampe betrieben und die Schüler erklären rein qualitativ, dass eine Spannung induziert wird, weil sich die Rotorspulen in einem zeitlich und räumlich konstanten Magnetfeld bewegen. Zur halbquantitativen Erklärung dient die didaktische Reduktion einer einzelnen rotierenden Leiterschleife im homogenen Feld. Diese wird in Form einer Bilderfolge behandelt, die die Leiterschleife in verschiedenen Stellungen darstellt. Die Vorkenntnisse aus den Induktionsversuchen können hier gefestigt und zur Vorhersage der entstehenden Wechselspannung genutzt werden. Die-

⁴Die Behandlung der Lenz'schen Regel ist laut Kernlehrplan nicht obligatorisch, ermöglicht aufgrund des häufigen Einsatzes des Dynamot im vorherigen Unterricht eine qualitative Erklärung, warum die Kraft an der Kurbel mit wachsender Stromstärke größer wird.

ser Zugang liefert insbesondere einen Beitrag zur Ausschärfung von Erkenntniskompetenz, indem die Vorhersagekraft des zuvor behandelten Induktionsgesetzes explizit genutzt wird. Das schulinterne Curriculum sieht als Vertiefung noch vor, die Wechselspannung mit einem Oszilloskop “sichtbar” zu machen. Auf diese Weise kann auch demonstriert werden, dass die Wechselspannungsausgänge der Schülerinnennetzgeräte tatsächlich die gewünschten Eigenschaften aufweisen. Auf die Bedeutung des Scheitel- und Effektivwerts soll als didaktische Reduktion verzichtet werden, solange Schülerinnen nicht explizit danach fragen.

Nach Klärung der Erzeugerseite wird mit dem Transformator das wesentliche Element des Übertragungswegs thematisiert. Das Funktionsprinzip ist bereits qualitativ bekannt; neben der Übersetzung der Spannungen wird das gegenläufige Verhältnis der Ströme mit einem Schweißtransformator demonstriert und anhand des Energieerhaltungssatzes erklärt. Die Drosselwirkung der Primärspule und die damit verbundene Erklärung der angepassten Energieaufnahme ist nicht mehr Gegenstand des Kernlehrplans; sie könnte als Vertiefungsmöglichkeit in dieser Reihe behandelt werden, muss jedoch aufgrund der zahlreichen ganztägigen Unterrichtsausfälle ausgelassen werden. Aus demselben Grund kann der Wunsch des Autors, eine Exkursion in ein Kraftwerk als außerschulischen Lernort zu unternehmen, in diesem Durchgang nicht erfüllt werden.

1.6 Begründung der wesentlichen methodischen Entscheidungen

Die Ausführungen über den Theoriegehalt des Experimentiermaterials in 1.5 implizieren, dass die eigenständige Planung von Experimenten durch die Schüler erheblich erschwert ist. Die Schülerinnen erhalten jeweils nach einer Orientierung im Kontext, d.h. einer genauen Mitteilung, inwiefern konkret zu erreichende Lernziele zur Erklärung des Stromnetzes beitragen, dennoch die Gelegenheit, durch geeignete Versuche selbstständig Erfahrungen zu sammeln. Dabei darf es jedoch aus lernpsychologischer Sicht nicht bei einer naiv verstandenen Handlungsorientierung bleiben (Gold 2015, S. 54). Durch geeignete Aufträge zur genauen Beschreibung der Beobachtungen, zur Vernetzung mit dem bereits Gelernten und zur Erklärung von experimentellen Befunden wird eine hohe kognitive Aktivierung angestrebt. Auf diese Weise ist es zudem möglich, prozessbezogene Kompetenzen im Kommunikationsbereich besser zu fördern, als dies durch Lehrerversuche der Fall wäre. Bei der Durchführung der Experimente werden die Schülerinnen durch Hilfekarten und bei Bedarf durch beide Lehrkräfte unterstützt. Die sehr gute Ausstattung der Schule ermöglicht es, sich auf den Einsatz des Oszilloskops, des Generatormodells und berührungsgefährliche Spannungen als Demonstrationsversuche zu beschränken.

Die Sachstruktur des Themas erfordert mitunter mehrstufige Erklärungen, die mit einer hohen kognitiven Belastung für die Schülerinnen einhergehen. Zur Entlastung wird die von Tschentscher und Berger (2016) vorgeschlagene Erklärkette verwendet, die Aussagen in Wenn-dann-Form verknüpft und durch einen Weil-Satz ergänzt. Die einzelnen Elemente können ausgedruckt zur Verfügung gestellt und von den Schülern in eine angemessene Rei-

henfolge gebracht werden, die dann als Grundlage für selbstständig formulierte Erklärung dient und damit auch einen Beitrag zur Sprachförderung im Fach leistet.

2 Planung der Unterrichtsstunde

2.1 Lernziele

Durch das Lernarrangement soll erreicht werden, dass die Schüler

- einen Versuch zum Übersetzungsverhältnis des Transformators beschreiben, durchführen und auswerten können,
- die Beziehung $\frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2}$ nennen und anwenden können (Eventualziel).

Die Stunde setzt einen Schwerpunkt auf der bereits genannten prozessbezogenen Kompetenz E8 (insbesondere Ausschärfung der Planungskompetenz für Experimente).

2.2 Sachanalyse

Ein Transformator besteht aus zwei Spulen mit Windungszahlen n_1, n_2 , die sich auf einem geschlossenen Eisenkern befinden. Der Kern wird aus lackierten Blechen hergestellt, um Wirbelstromverluste zu vermeiden und dient als guter Leiter für den magnetischen Fluss. Da beide Spulen im idealen Transformator vom gleichen magnetischen Fluss durchsetzt werden, gilt nach dem Induktionsgesetz betragsmäßig $\dot{\Phi} = \frac{U_1}{n_1} = \frac{U_2}{n_2}$. U_1 entspricht nach der Maschenregel bis auf das Vorzeichen der angelegten Wechselspannung.

2.3 Lernvoraussetzungen und Lernausgangslage

Zum Erreichen der Stundenziele sind keine inhaltsbezogenen Kompetenzen erforderlich, die in dieser Reihe erworben wurden. Gleichwohl soll die Stunde in den Kontext eingeordnet und die Funktionsweise des Transformators erläutert werden. Die Schüler haben hierzu eigenständig einen erklärenden Text verfasst, sodass diese Voraussetzung als gegeben angenommen werden kann. Um das Experiment sinnvoll auswerten zu können, ist ein grundlegendes Begriffsverständnis von (anti-)proportionalen Zuordnungen hilfreich. Diese Verknüpfung mit den Inhalten des Mathematikunterrichts wurde während des Unterrichts immer wieder expliziert und mit den Schülerinnen eingeübt, etwa bei den Themen Lageenergie, Auftrieb, Hubleistung beim Dynamot und spezifischem Widerstand.

Aufgrund der Beobachtungen in vorhergehenden Experimentierphasen kann davon ausgegangen werden, dass die zum sachgerechten Umgang mit dem Experimentiermaterial erforderlichen psychomotorischen Fertigkeiten vorhanden sind.

2.4 Didaktische Überlegungen

Die Behandlung des Stundenthemas ist unmittelbar durch die bereits genannte, konzept-bezogene Kompetenzerwartung W19 legitimiert; die Ausführungen in 1.5 zur Bedeutung des Kontexts und der Stellung des Transformators im Kontext gelten insbesondere für die Prüfungsstunde. Berge und Lichtenstern (2007) legitimieren den Transformator als eigenständigen Lerngegenstand außerdem darüber, dass er wichtiger Bestandteil vieler Elektrogeräte ist, Elektromagnetismus und Induktion in einem Gerät vereint und zudem einen Beitrag zur Unterscheidung von Spannung und Stromstärke leisten kann.

Da im Unterricht ein Lehrerversuch mit berührungsgefährlicher Spannung gezeigt wird, führt der Autor zu Beginn des Prüfungstages eine Prüfung des Not-Aus-Schalters sowie der Fehlerstrom-Schutteinrichtung gemäß RISU I-11.9 durch.

Anhand einer im Verlauf der Reihe immer wieder als Advance Organizer verwendeten Abbildung, die die wesentlichen Bestandteile des Stromnetzes zeigt, wird zu Beginn die Stunde in den Reihenkontext eingeordnet. Auf dem Pult befindet sich bereits ein Hochspannungstransformator mit Übersetzungsverhältnis 500:23000, der mit Netzspannung betrieben werden soll.⁵ Sekundärseitig sind Hörnerelektroden angeschlossen, zwischen denen im Betrieb aufgrund der anliegenden Hochspannung von etwa 10.5 kV eine Gasentladung in Form eines Lichtbogens stattfindet. Das grundlegende Funktionsprinzip des Transformators wurde von den Schülern bereits bei der Behandlung der Induktion mit Hilfe von Elektromagneten entdeckt und in der vorhergehenden Stunde noch einmal aufgegriffen, sodass es von einer ausgelosten Schülerin am Versuchsaufbau erläutert werden kann.⁶

Aus didaktischer Sicht wäre es sinnvoll, den Versuch in Betrieb zu nehmen und die Schüler den eindrucksvollen Effekt beschreiben und selbstständig auf die anliegende Hochspannung zurückführen zu lassen. Dieses Vorgehen ist nach RISU III-6.2 nicht zulässig: Die Schülerinnen sind zunächst über die versuchsspezifischen Gefährdungen und Schutzmaßnahmen zu unterrichten sowie darauf hinzuweisen, dass häusliche Experimente mit berührungsgefährlicher Spannung verboten sind. Insofern erübrigt sich die anschließende Befragung der Schüler zur Gewinnung einer Problemfrage. Die Durchführung ist dennoch didaktisch legitim, da der Begriff Hochspannung hier im Sinne des kumulativen Lernens mit einer audiovisuellen Erfahrung verknüpft werden kann, was insbesondere vor dem Hintergrund bedeutsam ist, dass selbst die taktile Erfahrbarkeit von Strom und Spannung am Dynamot nur durch mehrstufige gedankliche Prozesse mit den physikalischen Größen verknüpft werden kann. Zudem liefert der Versuch eine verbindliche Grundlage für die Bildung von Hypothesen.

Die Schüler haben durch Induktionsversuche selbst erfahren können, dass die Höhe der induzierten Spannung von der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfelds in der Spule und von der Windungszahl der Spule abhängig ist. Sie können daher selbst die begründete Hy-

⁵Im Anhang wird nachgewiesen, dass der Betrieb zulässig ist.

⁶Der Aufbau ist dabei natürlich vom Netz getrennt.

pothese bilden, dass letzteres auch beim Transformator der Fall ist, und könnten sogar den Zusammenhang $U_2 \sim n_2$ benennen. Zudem könnte die Vermutung geäußert werden, dass U_2 von U_1 abhängt, ggf. auch, dass U_2 mit U_1 wächst; dieses Verhalten wird durch den Demonstrationsversuch nahegelegt, da aus technischen Gründen U_1 mit einem Trenntransformator langsam auf 230V gesteigert wird. $U_2 \sim U_1$ erfordert den gedanklichen Schritt, dass eine Erhöhung von U_1 eine Erhöhung von I_1 nach sich zieht, was wiederum eine stärkere Magnetfeldänderung und damit eine größere induzierte Spannung U_2 bewirkt; ob die Schüler dies leisten, ist nicht vorhersehbar. Für die Durchführung des Schülerversuchs ist dies von untergeordneter Bedeutung. Der letzte Parameter, n_1 , kann von den Schülerinnen benannt werden, allerdings ist hier ein komplexerer gedanklicher Schritt für die Vorhersage von $U_2 \sim \frac{1}{n_1}$ erforderlich.

An dieser Stelle bietet sich die in der Elektrizitätslehre seltene Möglichkeit, die Schülerinnen selbst ein Experiment planen zu lassen und damit explizit prozessbezogene Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung zu fördern. Das Material ist dabei so gewählt, dass die Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden⁷ und die Aussage der Formel $\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$ erfasst werden kann. Es stehen ein Netzgerät mit 6V/12V (tatsächlich 6.5V/13V), Spulen mit $n = 8, 400, 2 \times 800, 1600$ und eine Messleitung für $n = 1, 2, 3, 4$ zur Verfügung. Die im Versuch zu erwartenden Abweichungen sind gerade so groß, sodass den Schülerinnen plausibel gemacht werden kann, dass es sich bei diesem Gesetz um eine Idealform handelt, die in der Realität durch Verluste nicht erreicht werden kann.

Um blinden Aktionismus während der Messphase zu verhindern, sollen die Gruppen sich beraten, wie die zuvor genannten Hypothesen zu überprüfen sind. Dazu erhalten sie die oben genannten Materialien und zusätzlich den Hinweis, dass aus Sicherheitsgründen primär nur $n_1 = 800$ und $n_1 = 1600$ verwendet werden dürfen. Erwartet werden können hier die Antworten, mit einer der beiden Möglichkeiten für n_1 zu beginnen und dann schrittweise n_2 zu variieren. Effizient wäre es zudem, bei jeder Anordnung zwischen den beiden Primärspannungen zu wechseln. Anschließend müsste die Untersuchung oder Teile der Untersuchung für das andere n_1 wiederholt werden. Die Messung soll erst nach einer kurzen Plenumsphase durchgeführt werden, in der ein bis zwei ausgewählte Gruppen ihre Ideen vorstellen. Durch dieses exemplarische Vorgehen sind keine negativen motivationalen Effekte im Sinne einer Beschneidung der Autonomie zu erwarten, da es nur wenige *planvolle* Möglichkeiten gibt, den Versuch durchzuführen und daher schnell Konvergenz erzielt werden sollte.

Auf Grundlage der Messergebnisse ergibt sich, dass U_2 näherungsweise proportional zu U_1 und n_2 sowie näherungsweise antiproportional zu n_1 ist. Als Auftrag zur Differenzierung soll überlegt werden, wie sich U_2 aus n_1, n_2, U_1 berechnen lässt. Ob die Schüler dies problemlos in eine Formel übersetzen können, kann nicht antizipiert werden. Daher wird von einer Lernschwierigkeit ausgegangen und ein geeigneter Hinweis zur Verfügung gestellt. Es erscheint naheliegend, auf die Proportionalität $U_2 = c \cdot U_1$ anzuspielen, da für viele der

⁷Genauer zur Auswahl des Materials findet sich im Anhang.

zur Verfügung stehenden Kombination die Konstante c als Verhältnis der Windungszahlen erkannt werden müsste. Der zugrundeliegende Gedankengang lässt zudem Raum für die Verbalisierung “Wenn n_2 2,3,4...-mal so groß ist wie n_1 , dann ist U_2 auch 2,3,4...-mal so groß wie U_1 ”.

Die Stunde kann nach dieser Phase sinnvoll mit der Hausaufgabe, sich auf die Präsentation der Ergebnisse vorzubereiten, beendet werden. Durch einen straffen Einstieg sollte dennoch genügend Zeit für eine Präsentation und Sicherung im Plenum vorhanden sein, wobei hier ein wesentliches Augenmerk auf der (Anti-)Proportionalität von U_2 und n_1, n_2, U_1 liegen sollte, da die Übersetzung in eine Formel einen weiteren Abstraktionsschritt darstellt. Trotz der inneren Differenzierung durch die relativ offen gestaltete Planung und Durchführung des Experiments wird als Zusatzangebot für Schnelle noch die Entwicklung einer Formel und die Berechnung der Sekundärspannung für das Demoexperiment gemacht, die aber schadlos in die nächste Stunde verlagert werden können.

2.5 Begründung der wesentlichen methodischen Entscheidungen

Die Verortung im Kontext erfolgt mit Hilfe einer Zeichnung, die die Elemente des öffentlichen Stromnetzes enthält; dieses Bild ist den Schülern als Advance Organizer vertraut und wird über den Beamer eingeblendet. Da der Einstieg im Sinne der Zieltransparenz insbesondere einen Ausblick auf das in dieser Stunde zu Lernende gibt, ist hier ein knapper Lehrervortrag das Mittel der Wahl. Die Erklärung der prinzipiellen Funktionsweise des Transformators war Gegenstand der letzten Stunde und ein für alle Schülerinnen zu erreichendes Lernziel, sodass hier ein ausgeloster Schüler die wesentliche Funktionsweise erklären kann.

Die Stunde folgt anschließend vom Grundaufbau her dem problemorientierten Unterricht nach Roth, dessen lernpsychologische Vorzüge von Bleichroth et al. (1999, S. 227ff) diskutiert werden.

Der Physikraum verfügt lediglich über eine manuelle Leinwand, die im ausgefahrenen Zustand einen Großteil der Tafel verdeckt. Um einen mehrfachen Umbau in der Stunde zu vermeiden, wird der Beamer als Informationsträger genutzt. Üblicherweise lässt man im problemorientierten Unterricht das Tafelbild im Gang des Unterrichts entstehen, da es die wesentlichen Elemente des methodischen Vorgehens widerspiegelt und für Transparenz sorgt. In der obligatorischen Sicherheitsbelehrung müssen jedoch die Inhalte der Motivations- und Problemfindungsphase vorweggenommen werden, sodass im Anschluss an die Demonstration eine Folie mit Problemfrage und Aufbau eingeblendet wird. Dies ist vertretbar, da die Schülerinnen einen Transformator bereits zeichnen können und jegliche Verzögerung, die nicht mit einer kognitiven Aktivierung verbunden ist, vermieden werden sollte, um im Anschluss möglichst viel Zeit für die selbsttätige Auseinandersetzung mit dem Schülerexperiment zur Verfügung zu stellen. Die Schüler erhalten daher einen Ausdruck dieser Folie und werden aufgefordert, zunächst selbstständig möglichst präzise

Hypothesen zur Abhängigkeit von U_2 zu notieren und sich anschließend mit den Nachbarinnen auszutauschen. Der nicht verdeckte Teil der Tafel kann für eine grobe Übersicht des Stundenverlaufs genutzt werden.

Mit einer weiteren Folie werden die Schülerinnen dazu aufgefordert, selbstständig ein Experiment zu planen, mit dem die Hypothesen untersucht werden können. Der Inhalt dieser Folie ist retrospektiv irrelevant, sodass kein Ausdruck notwendig ist. Die Schüler erhalten zur Planung Zugriff auf das Experimentiermaterial, um eine höhere sachbezogene Aktivität zu erreichen. Auf diese Weise können sie ihren Mitschülern gegenüber ihre Planungen nicht nur verbal mitteilen, sondern aktiv das intendierte Vorgehen demonstrieren. Da die Betriebsspannung noch nicht freigegeben ist, müssen die Handlungsversuche zwingend planvoll, d.h. mit einer kognitiven Aktivierung verbunden sein – ein Vorgehen nach “Versuch und Irrtum” ist hier ausgeschlossen. Die Sozialform ist durch die Materialausstattung als Gruppenarbeit vorgegeben. In der folgenden Plenumsphase werden die Ideen kurz diskutiert und können von den Schülern am Pult erläutert werden. Dazu steht ein weiterer Satz des Experimentiermaterials zur Verfügung.

Die Planungsalternative der gemeinsamen Erprobung der Vorschläge als Demonstrationsversuch wird zurückgewiesen, da im Vergleich zum Schülerexperiment die sachbezogene Tätigkeit der Schüler hierunter leidet und negative motivationale Effekte resultieren können, indem die Ideen der Schülerinnen unnötigerweise vom Lehrer vereinnahmt werden. Diese negativen Effekte beurteilt der Autor im Hinblick auf Ziele des Physikunterrichts im Vergleich zu einer Verlagerung des Ergebnisvergleichs in die Folgestunde als schwerwiegender.

Die Durchführung des Versuchs wird durch ein Arbeitsblatt mit vorbereiteten Tabellen unterstützt, um die Zeit zum selbstständigen Anfertigen einzusparen. Dabei lassen diese Tabellen *alle möglichen* Kombinationen von n_1, n_2 und U_1 zu, sodass keine Einengung der Autonomie entsteht. Bei Bedarf werden die Gruppen während der Experimentierphase durch den Lehrer unterstützt. Durch das gewählte Arrangement und die teils subtilen Unterstützungsmaßnahmen erhalten die Schülerinnen somit die Möglichkeit, weitgehend selbstständig am Lerngegenstand ihre Kompetenzen im Bereich naturwissenschaftlichen Arbeitens auszuscharfen, ohne dabei überfordert zu werden. Dieses Vorgehen genügt wesentlichen Forderungen an die Einbettung von Experimenten in den Unterricht, wie sie in den PIKO-Briefen 6 und 7 formuliert werden (Mikelskis-Seifert und Duit, 2010).

In der abschließenden Sicherungsphase, die durch eine Schülerpräsentation erfolgen soll, erleichtern die vorgefertigten Tabellen den Vergleich der Ergebnisse. Die Präsentation erfolgt dabei zeitökonomisch über eine Dokumentenkamera. Neben der auf die Messergebnisse bezogenen Ergebnissicherung hat die Präsentation auch die Funktion, die Vorgehensweise beim Versuch zu reflektieren und diese somit stärker in der kognitiven Struktur der Lernenden zu verankern (in Anbindung an mögliche Messfehler). Diese Phase bietet den Schülerinnen außerdem die Gelegenheit, miteinander fachbezogen zu kommunizieren und fördert somit auch die entsprechenden Kompetenzen.

3 Verlaufsplan

Phase	Lernschritt/Unterrichtsinhalt (Impulse, Schlüsselfragen, geplantes Lehrerverhalten, erwartetes Schülerverhalten)	Lernorganisation (Sozialform, Medien)
Sicherheit: Am Morgen FI und Not-Aus überprüfen!		
Einstieg	L begrüßt den Kurs und stellt den Besuch vor	
Motivation	L verortet die Stunde im Kontext, lost S für Erklärung des Transformators aus	LV; Beamer
	S erklärt Aufbau und Funktionsweise eines Transformators	SV; Trafo
Sicherheitsbelehrung: Hochspannung, Not-Aus, Verbot häuslicher Versuche mit berührungsgefährlicher Spannung		
Problem	L führt den Hochspannungstransformator vor	Demo-Exp.; Trafo
	L benennt die Problemfrage “Wovon hängt die Sekundärspannung des Transformators ab?”, blendet Folie mit Problemfrage und Aufbauskizze ein	LV; Beamer
Lösung	L fordert S auf, eine Kopie der Folie zu nehmen und in EA/PA Hypothesen zu dieser Frage zu bilden	EA/PA; AB
	S benennen und diskutieren Hypothesen, L notiert und ergänzt ggf.	SV/UG; Beamer
	L stellt Randbedingungen des zu planenden Experiments vor	LV; Beamer
	L fordert S auf, das Experimentiermaterial zu nehmen und in GA ein Experiment zur Überprüfung der Hypothesen zu entwickeln	GA; AB, Exp.-Material
	S stellen ihre Ideen am Pult vor und diskutieren, L unterstützt ggf.	SV/UG; Exp.-Material
Sicherheit vor Einschalten der Steckdosenstromkreise beachten: Nur $n_1 = 800$ und $n_1 = 1600$!		
Tun&Ausf.	S führen die geplanten Messungen durch und werten die Ergebnisse aus, L unterstützt ggf.	GA/S-Exp.; AB, Exp.-Material
	S entwickeln ggf. eine Formel und wenden diese an	
Mögliches Stundenende mit HA: Sich auf eine Präsentation der Ergebnisse vorbereiten		
	S präsentieren ihre Ergebnisse, diskutieren darüber, L unterstützt ggf. Wichtiges Ergebnis: (näherungsweise gilt) $U_2 \sim n_2$, $U_2 \sim U_1$, $U_2 \sim 1/n_1$, Formel zweitrangig	SV/UG; Dokumentenkamera

4 Literatur

- Berge, O.E. & Lichtenstern, H. (2007). Unterrichten über den Transformator. Didaktische Aspekte eines problematischen Themas. *Naturwissenschaften im Unterricht: Physik 102*, 11–17.
- Bleichroth, W., Dahncke, H., Jung, W., Kuhn, W., Merzyn, G. & Weltner, K. (1999). *Fachdidaktik Physik* (2. Aufl.). Köln: Aulis Verlag.
- Bruening, L. & Saum, T. (2009). *Erfolgreich unterrichten durch Kooperatives Lernen. Strategien zur Schüleraktivierung. Band 1* (5. Aufl.). Essen: Verlag Neue Deutsche Schule.
- Deci, E.L. & Ryan, R.M. (2008). Self-Determination Theory: A Macrotheory of Human Motivation, Development, and Health. *Canadian Psychology* 49, 182–185.
- Gold, A. (2015). *Guter Unterricht. Was wir wirklich darüber wissen* (1. Aufl.). Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (2011). *Emission von UV-Strahlung beim Elektroschweißen*
- Mikelskis-Seifert, S. & Duit, R. (2010). *PIKO-Brief Nr. 6: Naturwissenschaftliches Arbeiten*. Von der Website <http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf>, abgerufen am 16.02.2017
- Mikelskis-Seifert, S. & Duit, R. (2010). *PIKO-Brief Nr. 7: Das Experiment im Physikunterricht*. Von der Website <http://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf>, abgerufen am 16.02.2017
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.). *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Physik*.
- Muckenfuß, H. (2006). *Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts*. (1. Aufl.). Berlin: Cornelsen Verlag.
- Muckenfuß, H. & Walz, A. (1997). *Neue Wege im Elektrikunterricht. Vom Tun über die Vorstellung zum Begriff* (2. Aufl.). Köln: Aulis Verlag.
- Nothbaum, N. & Steins, G. (2010). Nicht sexistischer Sprachgebrauch: die stochastische Genuswahl. In Steins, G. (Hrsg.): *Handbuch Psychologie und Geschlechterforschung*. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften.
- Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG) Vom 5. April 2006 (ABL EU Nr. L 114, S. 38) zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 22. Oktober 2008 (ABl. L 311, S. 1)
- Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht an allgemeinbildenden Schulen in Nordrhein-Westfalen (RISU-NRW). RdErl. des Ministeriums für Schule und Weiterbildung v. 23. 5. 2014 – 523-6.08.01.16-116424
- Röntgenverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 30. April 2003 (BGBl. I S. 604), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 11. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2010) geändert worden ist
- Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), die durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114) geändert worden ist

- Tschentscher, C. & Berger, R. (2016). Wie kann man gute Erklärungen mit Lernenden trainieren? Ein Blick auf das sachgerechte Erklären. *Naturwissenschaften im Unterricht: Physik 152*, 15–21.
- Volkmer, M. (2007). Vom Generator zum Transformator. Kann man mit einer Versuchsanordnung die Funktion beider Geräte erklären? *Naturwissenschaften im Unterricht: Physik 102*, 22–24.
- Wisniewski, B. (2013). *Psychologie für die Lehrerbildung* (1. Aufl.). Bad Heilbrunn: Verlag Julius Klinkhardt.

5 Erklärung

Ich versichere, dass ich die Schriftliche Arbeit eigenständig verfasst, keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Schriftlichen Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Das Gleiche gilt auch für beigegebene Zeichnungen, Kartenskizzen und Darstellungen. Anfang und Ende von wörtlichen Textübernahmen habe ich durch An- und Abführungszeichen, sinngemäße Übernahmen durch direkten Verweis auf die Verfasserin oder den Verfasser gekennzeichnet.

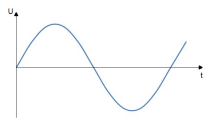
Ort, Datum

Unterschrift

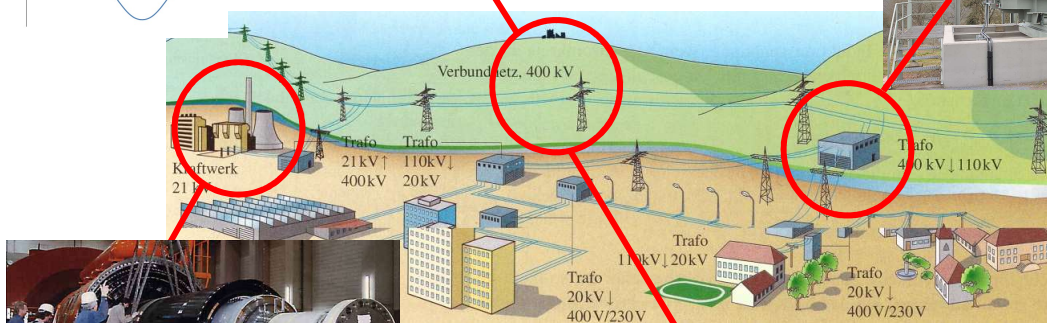
Anhang

- Folien für die Bildschirmpräsentation
- Arbeitsblatt
- Hilfekarte
- mögliche Schülerlösungen
- Detaillierte Sicherheitsbetrachtung zum Betrieb der Funkenstrecke mit dem Hochspannungstransformator
- Detaillierte Begründung der Planung des Schülerversuchs unter Sicherheitsaspekten
- Gefährdungsbeurteilungen

Das öffentliche Stromnetz



Wechselspannung

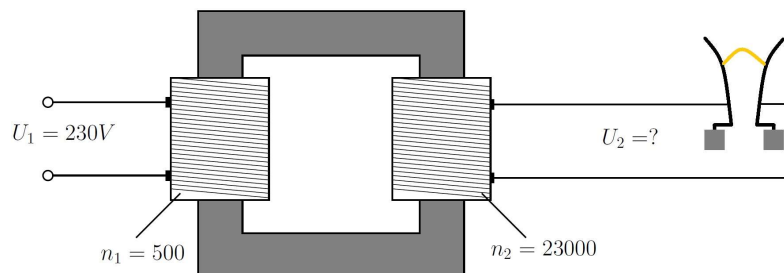


Hochspannung zur Vermeidung von Übertragungsverlusten, $P_v \sim 1/U^2$

Trafo: <http://www.nh24.de/index.php/panorama/22-allgemein/81914-eam-news-neuer-transformator-in-kirchheim>, Generator: <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB124-03.htm>
Stromnetz: Fokus Physik 7-9

Wovon hängt die Sekundärspannung beim Transformator ab?

Versuch:



Beobachtung: Zwischen den Hörner-Blitzableitern entsteht ein Lichtbogen, der hochsteigt.
 U_2 muss viel größer als $U_1=230V$ sein.

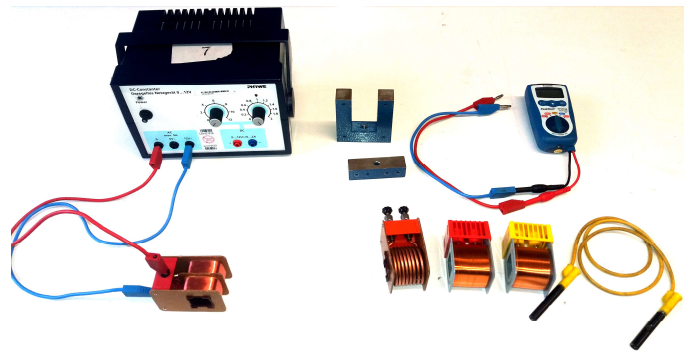
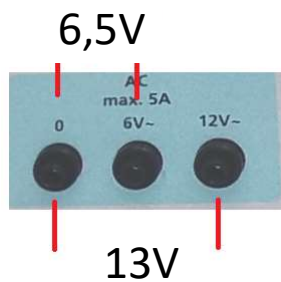
Hypothesen:

Plant einen Versuch, um eure Hypothesen zu überprüfen.

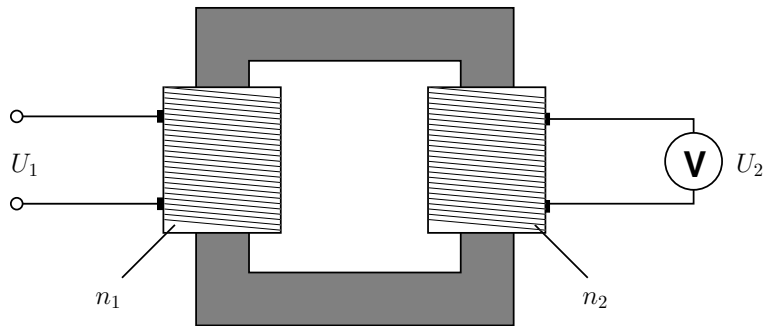
Vorgabe: Beide Wechselspannungsausgänge am Netzgerät dürfen verwendet werden (6,5V / 13V). Am Netzgerät darf **NUR** die Spule mit 800/1600 Windungen angeschlossen werden!

Tipp:

Eine Spule mit ganz wenigen Windungen könnt ihr aus dem langen Kabel bauen.



Wovon hängt die Sekundärspannung beim Transformator ab?



Material: Netzgerät, Primärspule mit 800/1600 Windungen, Sekundärspulen mit 8, 400, 1600 Windungen, lange Messleitung, Voltmeter (auf AC stehen lassen!)

Geplantes Vorgehen:

Messwerte:

$n_1 = 800$	$U_1 = 6.5V$	$U_1 = 13V$
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		

$n_1 = 1600$	$U_1 = 6.5V$	$U_1 = 13V$
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		
$n_2 =$		

Ergebnis:

Für Schnelle: Kannst du eine Formel angeben, mit der man U_2 (näherungsweise) ausrechnen kann? Berechne hiermit die Sekundärspannung beim Demonstrationsversuch ($U_1 = 230V, n_1 = 500, n_2 = 23000$).

Hilfekarte

- Lass dich von den vielen Messwerten nicht verwirren. Was passiert näherungsweise mit U_2 , wenn du
 - U_1 verdoppelst,
 - n_2 vervierfachst (von 400 auf 1600) oder 50 mal so groß wählst (von 8 auf 400),
 - n_1 verdoppelst?
- Wenn n_2 doppelt/dreimal/viermal... so groß wie n_1 ist, dann ... ?

Mögliche Schülerlösungen:

Experimentelles Vorgehen:

- n_1, U_1 konstant halten, n_2 variieren, U_2 messen; Messung für anderes U_2 wiederholen, dann auch für anderes n_1
- Proportionalität $U_2 \sim n_2$ durch Vervielfachen von n_2 überprüfen
- Bei gegebenem Aufbau des Transformators jeweils U_1 variieren, um den Aufwand geringer zu halten

Messwerte:

$n_1 = 800$	$U_1 = 6.5V$	$U_1 = 13V$
$n_2 = 1$	0.006	0.013
$n_2 = 2$	0.013	0.029
$n_2 = 3$	0.021	0.044
$n_2 = 4$	0.028	0.060
$n_2 = 8$	0.059	0.121
$n_2 = 400$	3.04	6.18
$n_2 = 1600$	12.2	24.5

$n_1 = 1600$	$U_1 = 6.5V$	$U_1 = 13V$
$n_2 = 1$	0.002	0.006
$n_2 = 2$	0.006	0.014
$n_2 = 3$	0.009	0.021
$n_2 = 4$	0.013	0.029
$n_2 = 8$	0.028	0.060
$n_2 = 400$	1.524	3.07
$n_2 = 1600$	6.13	12.45

Ergebnis:

- Wenn man U_1 verdoppelt, dann verdoppelt sich auch U_2
- ergänzend: U_1 und U_2 sind proportional
- Wenn man n_2 verdoppelt, verdreifach,... dann verdoppelt, verdreifacht, ... sich auch U_2
- ergänzend: U_2 und n_2 sind proportional
- Wenn man n_1 verdoppelt, dann halbiert sich U_2
- ergänzend: U_2 und n_1 sind antiproportional
- Wenn n_2 doppelt, dreimal, ... so groß ist wie n_1 , dann ist auch U_2 doppelt, dreimal, ... so groß wie U_1 .
- Pro Windung der Sekundärspule kann man $U_W = \frac{U_1}{n_1}$ rechnen
- $\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$ oder äquivalent

Sekundärspannung beim Einstiegsversuch: $U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1 = \frac{23000}{500} \cdot 230V = 10580V$

Detaillierte Sicherheitsbetrachtung zum Betrieb der Funkenstrecke mit dem Hochspannungstransformator

Die Inbetriebnahme des Hochspannungstransformators mit Funkenstrecke ist aus Perspektive des Strahlenschutzes zulässig, da in einer Gasentladung sowohl Elektronen als auch Ionen beschleunigt werden und daher das wesentliche Definitionskriterium eines Störstrahlers gem. § 2 Abs. 18 RÖV nicht erfüllt ist. Diese Ansicht wird auch von Dezernat 55 der Bezirksregierung Köln geteilt (fernmündlich am 16.02.2017, Ansprechpartner Tepe). Gleichzeitig handelt es sich aufgrund der entstehenden Ionisierungskaskade nicht um einen anzeigepflichtigen Ionenbeschleuniger nach § 12 StrlSchV, da ab Beginn der Gasentladung durch den hohen Innenwiderstand der Spule keine Beschleunigungsspannung über 5 kV erreicht wird.

Die Emission von UV-Strahlung ist aufgrund der kurzen Betriebsdauer irrelevant: Bei einem Schweißlichtbogen ist bei einer Stromstärke $I = 200A$ in $60cm$ Entfernung eine effektive Bestrahlungsstärke von etwa $10W/m^2$ zu erwarten (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung; Emission von UV-Strahlung beim Elektroschweißen). Wegen $I_1 \leq 16A$ und $n_2 = 46n_1$ ist $I_2 < 40mA$, also die effektive Bestrahlungsstärke kleiner als $2mW/m^2$. Der nach Richtlinie 2006/25/EG zulässige Expositionsgrenzwert $H_{eff} = 30 J$ würde somit erst nach über 4 Stunden Betrieb überschritten.

Ebenfalls ist aufgrund der kurzen Betriebsdauer keine relevante Erwärmung der Hörnerelektroden zu erwarten.

Detaillierte Begründung der Planung des Schülerversuchs unter Sicherheitsaspekten

Da Schüler nach RISU III-6.2 nur mit nicht berührungsgefährlicher Spannung experimentieren dürfen, müssen die Planungsmöglichkeiten für den Versuch beschränkt werden. Am 12V-Ausgang des Schülernetzgeräts liegen tatsächlich etwa 13V an, sodass auch bei $n_2 = 2n_1$ die geforderte Begrenzung auf 25V nicht automatisch sichergestellt ist. Der Autor hat sich durch eine Messung mit einem geeichten Voltmeter davon überzeugt, dass diese für die Übersetzung 800:1600 nicht überschritten wird. Es stehen 8 Sätze Spulen mit $n = 8, 400, 2 \times 800, 1600$ zur Verfügung. Zusätzlich können $n = 1, \dots, 5$ mit einer Messleitung realisiert werden. Bei der Durchführung des Oerstedt-Versuchs zeigte sich, dass einigen Schülern nicht bewusst ist, dass die isolierten Messleitungen der Schülerübungskästen ebenfalls "Kabel" oder "Drähte" sind, sodass möglicherweise nicht naheliegend ist, eine Spule mit niedriger Windungszahl aus einer Messleitung herzustellen. Aus diesem Grund wird zu dem Arbeitsauftrag der Tipp "eine Spule mit ganz wenigen Windungen kannst du aus einer Messleitung herstellen" gegeben.

Aus Sicherheitsgründen muss also die Spule mit 2×800 Windungen als Primärspule vorgegeben werden, sodass hier eine Variationsmöglichkeit für n_1 verbleibt. Für U_1 können die beiden Festspannungsausgänge verwendet werden.

Nach RISU I-11.3 dürfen die Steckdosenstromkreise der Schülerexperimentierstände erst dann eingeschaltet werden, wenn sich die Lehrkraft vergewissert hat, dass keine Gefährdungen bestehen. Um die Durchführung des Versuchs nicht unnötig zu verzögern, wird folgendermaßen vorgegangen: Die Spule mit 2×800 Windungen soll unmittelbar von den Schülern mit der gewünschten Windungszahl an den gewünschten Ausgangs des Netzgeräts angeschlossen werden. Nachdem der Autor sich hiervon überzeugt hat, dürfen die Steckdosenstromkreise aktiviert werden. Durch die vorherige Anweisung, keine andere Primärspule zu verwenden, ist der Sicherheit genüge getan.

Eine noch bessere Version des Experiments – hierbei werden die Buchsen der Schülerarbeitstische vom Lehrerpult aus mit 3V und 6V beschaltet, sodass auch die Übersetzung 400:1600 möglich wäre – scheitert am Aktionismus einiger Schülergruppen: Sobald auch nur ein Transformatorkern im Betrieb geöffnet wird, beeinflusst dies unmittelbar die Messwerte *aller* Schülergruppen, da keine hinreichend stabilen Netzgeräte zur Speisung zur Verfügung stehen (alle Primärspulen wären in dieser Version parallel an ein Netzgerät angeschlossen). Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass vor dem Öffnen des Transformatorkern die Primärspule jedes Mal von der Quelle getrennt wird, wird von diesem Aufbau abgesehen.

Mit dem vorhandenen Material ist daher unter Sicherheits- und Machbarkeitsaspekten nur die gewählte Version des Schülerexperiments im Unterricht einsetzbar.

Dokumentation zur Gefährdungsbeurteilung für Experimente mit elektrischer Energie

Schule / Dienststelle: Freiherr-vom-Stein-Gymnasium, Morsbroicher Str. 77, 51375 Leverkusen

Unterrichtsfach / Fachbereich: Physik

Klassenstufe: 9

Experiment: Hochspannungstransformator mit Hörnerelektroden, Übersetzungsverhältnis
500:23000, Primärspannung 230V~/50Hz

Wer führt das Experiment durch?

☒ Lehrkraft

☐ Schülerinnen / Schüler

Sind Gefährdungen durch elektrische Energie vorhanden?

☐ **Nicht berührungsgefährliche Spannung**, da die folgenden Punkte erfüllt sind:

- Sicherheitstransformator mit Begrenzung auf $U \leq 25 \text{ V AC} / 60 \text{ V DC}$ oder netzunabhängige Versorgung mit mindestens gleicher Sicherheit: Akku, Batterie, Generator, Solarzelle, ...
 $U \leq 25 \text{ V AC} / 60 \text{ V DC}$
- In der Experimentieranordnung befinden sich **keine** Spulen, Transformatoren oder andere Bauteile, die **berührungsgefährliche Spannungen** erzeugen

In diesem Fall ist eine nur **sehr geringfügige Gefährdung durch elektrische Energie** vorhanden. Schülerexperimente sind in allen Klassenstufen erlaubt.

☐ **Berührungsgefährliche Spannung mit Schutz durch SELV/PELV-Systeme**, da die folgenden Punkte erfüllt sind:

- Sicherheitstransformator $U \leq 50 \text{ V AC} / 120 \text{ V DC}$ oder netzunabhängige Versorgung mit mindestens gleicher Sicherheit: Akku, Batterie, Generator, Solarzelle, ...
 $U \leq 50 \text{ V AC} / 120 \text{ V DC}$
- Basisschutz der gesamten Experimentieranordnung, d. h., die gesamte Schaltung muss vollständig isoliert sein, sodass es keine berührungsgefährlichen Teile gibt
- In der Experimentieranordnung befinden sich **keine** Spulen, Transformatoren oder andere Bauteile, die **berührungsgefährliche Spannungen** oberhalb **50 V AC / 120 V DC** erzeugen

In diesem Fall ist eine **Gefährdung durch elektrische Energie** vorhanden. Schutzmaßnahmen sind notwendig. Schülerexperimente sind ab der Oberstufe erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann. Lehrerexperimente sind in allen Klassenstufen erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann. Lehrkräfte müssen ein abgeschlossenes Lehramtsstudium des Faches Physik oder vergleichbarer Ausbildungsgänge besitzen.

☒ **Berührungsgefährliche Spannung ohne Schutz durch SELV/PELV-Systeme**

In diesem Fall ist eine **erhebliche Gefährdung durch elektrische Energie** gegeben.

Weitreichende Schutzmaßnahmen sind notwendig. Schülerexperimente sind unter unmittelbarer Aufsicht des Lehrers ab der Oberstufe erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann.

Lehrerexperimente sind in allen Klassenstufen erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann. Lehrkräfte müssen ein abgeschlossenes Lehramtsstudium des Faches Physik oder vergleichbarer Ausbildungsgänge besitzen.

Bemerkung: In diese Kategorie sollten auch Experimente mit Bandgeneratoren / Hochspannungsnetzgeräten eingeordnet werden, auch wenn diese (gerade noch) nicht berührungsgefährliche Spannungen erzeugen

Sind weitere Gefährdungen vorhanden (z. B. mechanische, thermische, optische)?

Bildung von Ozon

Entstehung kurzweiliger elektromagnetischer Strahlung (aber: kein Störstrahler gem. § 2 Abs. 18 RöV, da nicht ausschließlich Elektronen beschleunigt werden)

Tätigkeitsbeschränkungen?

- ☒ Tätigkeitsverbot für Lehrkräfte, die kein abgeschlossenes Lehramtsstudium des Faches Physik oder vergleichbarer Ausbildungsgänge besitzen
- ☒ Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 10

Substitutionsprüfung für Experimente mit berührungsgefährlicher Spannung?

- ☒ Lernziel kann nur mit berührungsgefährlicher Spannung erreicht werden
- ☒ Lernziel kann mit Schutz durch SELV/PELV-Systeme nicht erreicht werden
- ☐ Lernziel kann mit Schutz durch SELV/PELV-Systeme erreicht werden, es soll aber dennoch ohne Schutz durch SELV/PELV-Systeme durchgeführt werden.

Begründung:

- ☐ Lernziel kann mit nicht berührungsgefährlicher Spannung erreicht werden, es soll aber dennoch mit berührungsgefährlicher Spannung durchgeführt werden.

Begründung:

Welche Sicherheitsmaßnahmen werden durchgeführt?

- ☒ Sicherheitsunterweisung vor Inbetriebnahme (RISU III-6.2.4)
- ☒ Sichtprüfung der Experimentierleitungen (RISU III-6.5)
- ☒ Funktion des Not-Aus-Schalters vor Beginn des Experiments überprüfen (RISU III-6.7)
- ☒ Funktion des Fehlerstrom-Schutzschalters vor Beginn des Experiments überprüfen (RISU III-6.7)
- ☒ Begrenzung der Betriebsdauer auf wenige Sekunden

10.02.2017



Datum, Unterschrift

Dokumentation zur Gefährdungsbeurteilung für Experimente mit elektrischer Energie

Schule / Dienststelle: Freiherr-vom-Stein-Gymnasium, Morsbroicher Str. 77, 51375 Leverkusen

Unterrichtsfach / Fachbereich: Physik

Klassenstufe: 9

Experiment: Transformator mit Übersetzungsverhältnis 800:1 bis 800:1600, Primär 6.5V~/13V~

Wer führt das Experiment durch?

☐ Lehrkraft

☒ Schülerinnen / Schüler

Sind Gefährdungen durch elektrische Energie vorhanden?

☒ **Nicht berührungsgefährliche Spannung**, da die folgenden Punkte erfüllt sind:

- Sicherheitstransformator mit Begrenzung auf $U \leq 25 \text{ V AC} / 60 \text{ V DC}$ oder netzunabhängige Versorgung mit mindestens gleicher Sicherheit: Akku, Batterie, Generator, Solarzelle, ...
 $U \leq 25 \text{ V AC} / 60 \text{ V DC}$
- In der Experimentieranordnung befinden sich **keine** Spulen, Transformatoren oder andere Bauteile, die **berührungsgefährliche Spannungen** erzeugen

In diesem Fall ist eine nur **sehr geringfügige Gefährdung durch elektrische Energie** vorhanden. Schülerexperimente sind in allen Klassenstufen erlaubt.

☐ **Berührungsgefährliche Spannung mit Schutz durch SELV/PELV-Systeme**, da die folgenden Punkte erfüllt sind:

- Sicherheitstransformator $U \leq 50 \text{ V AC} / 120 \text{ V DC}$ oder netzunabhängige Versorgung mit mindestens gleicher Sicherheit: Akku, Batterie, Generator, Solarzelle, ...
 $U \leq 50 \text{ V AC} / 120 \text{ V DC}$
- Basisschutz der gesamten Experimentieranordnung, d. h., die gesamte Schaltung muss vollständig isoliert sein, sodass es keine berührungsgefährlichen Teile gibt
- In der Experimentieranordnung befinden sich **keine** Spulen, Transformatoren oder andere Bauteile, die **berührungsgefährliche Spannungen** oberhalb **50 V AC / 120 V DC** erzeugen

In diesem Fall ist eine **Gefährdung durch elektrische Energie** vorhanden. Schutzmaßnahmen sind notwendig. Schülerexperimente sind ab der Oberstufe erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann. Lehrerexperimente sind in allen Klassenstufen erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann. Lehrkräfte müssen ein abgeschlossenes Lehramtsstudium des Faches Physik oder vergleichbarer Ausbildungsgänge besitzen.

☐ **Berührungsgefährliche Spannung ohne Schutz durch SELV/PELV-Systeme**

In diesem Fall ist eine **erhebliche Gefährdung durch elektrische Energie** gegeben.

Weitreichende Schutzmaßnahmen sind notwendig. Schülerexperimente sind unter unmittelbarer Aufsicht des Lehrers ab der Oberstufe erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann.

Lehrerexperimente sind in allen Klassenstufen erlaubt, wenn das Lernziel sonst nicht erreicht werden kann. Lehrkräfte müssen ein abgeschlossenes Lehramtsstudium des Faches Physik oder vergleichbarer Ausbildungsgänge besitzen.

Bemerkung: In diese Kategorie sollten auch Experimente mit Bandgeneratoren / Hochspannungsnetzgeräten eingeordnet werden, auch wenn diese (gerade noch) nicht berührungsgefährliche Spannungen erzeugen

Sind weitere Gefährdungen vorhanden (z. B. mechanische, thermische, optische)?

Tätigkeitsbeschränkungen?

- ☐ Tätigkeitsverbot für Lehrkräfte, die kein abgeschlossenes Lehramtsstudium des Faches Physik oder vergleichbarer Ausbildungsgänge besitzen
- ☐ Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 10

Substitutionsprüfung für Experimente mit berührungsgefährlicher Spannung?

- ☐ Lernziel kann nur mit berührungsgefährlicher Spannung erreicht werden
- ☐ Lernziel kann mit Schutz durch SELV/PELV-Systeme nicht erreicht werden
- ☐ Lernziel kann mit Schutz durch SELV/PELV-Systeme erreicht werden, es soll aber dennoch ohne Schutz durch SELV/PELV-Systeme durchgeführt werden.

Begründung:

- ☐ Lernziel kann mit nicht berührungsgefährlicher Spannung erreicht werden, es soll aber dennoch mit berührungsgefährlicher Spannung durchgeführt werden.

Begründung:

Welche Sicherheitsmaßnahmen werden durchgeführt?

- ☒ Sicherheitsunterweisung vor Planung des Experiments (ausschließliche Verwendung von $n_1=800$ und $n_1=1600$, sodass aufgrund von Verlusten maximal 25V sekundär erreicht werden).
- ☒ Inbetriebnahme der Steckdosenstromkreise der Schülerexperimentierstände erst nachdem überprüft wurde, ob die korrekte Windungszahl primär angeschlossen ist.

Weitere Sicherheitsmaßnahmen:

10.02.2017



Datum, Unterschrift