

## Unterrichtseinheiten für den Physikunter- richt im allgemeinbildenden Schulwesen

Jede der den Lehrern zur Erprobung übergebenen Unterrichtseinheit (UE) zum Feldenergiekonzept hat die Form und den Umfang von Referendarsentwürfen /197/. Dahinter verbirgt sich ein pragmatischer Grund: eine zügige und inhaltlich umfangreiche Umsetzung des Feldenergiekonzepts in die Schulpraxis. Die UE in ihrer kompletten Form wiederzugeben, würde den Rahmen dieser Schrift bei weitem sprengen. Deshalb wird eine dem Umfang nach reduzierte Form vorgestellt, die - das Wesentliche betreffend - inhaltlich keine Kürzungen erfahren hat. Es sind die Formulierungen zum Eingangswissen für jede UE, inhaltliche Redundanzen, Zielfragenvorgaben sowie Vorschläge zu Versuchsvarianten herausgelassen worden. Experimente zu vielen Teilthemen sind dem Lehrer ohnehin vertraut, so daß in den UE hierauf nur mit wenigen Wort stichpunktartig eingegangen wird. So z.B. ist die experimentelle Erarbeitung der Proportionalität zwischen der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  und dem Quotienten aus der elektrischen Ladungsmenge "Q" und dem Quadrat des Kugelradius  $r$  -  $Q/r \cdot r$  - dem Lehrer bekannt. Diese Versuchsbeschreibung und diese Beziehung sind Bestandteile der Oberstufenliteratur, siehe /62/. In Erinnerung wird gebracht, daß die in den Abschnitten 2.2 und 2.3 herausgearbeiteten Grundansätze und Grundpositionen dem Feldenergiekonzept zugrunde liegen. Das Feld ist eine Realität, es gehört zu den

Phänomenen und speichert bzw. transportiert Energie. Bevor das Feldenergiekonzept in den einzelnen UE in seiner Vielfalt dargestellt wird, sollen die zu behandelnden Felder hinsichtlich ihres Einsatzes im Unterricht nach Klassenstufen und nach Behandlungsart - phänomenologisch (p), meßtechnisch (t), mathematisch (m) - strukturiert werden. Das Feldenergiekonzept ist methodisch so angelegt, daß in jeder Klassenstufe ohne Vorkenntnisse desselben damit begonnen werden kann. Im Bild 6 auf der Seite 68 ist die zugehörige Matrix angegeben. Die darin erscheinenden Buchstaben "p, t und m" geben die oben eingeführte Behandlungsart der Felder wieder. Die Matrix ist nach dem Handlungsprinzip "vom Leichten zum Schweren" strukturiert. Ein waagerechter Strich in der Matrix bedeutet, daß die Behandlung des betreffenden Feldes in dieser Klassenstufe nicht sinnvoll erscheint. Wird das "m" in Klammern gesetzt, so reduziert sich die mathematische Behandlung des Feldes auf das sogenannte Potential bzw. auf die sogenannte potentielle Energie. In den folgenden UE werden die einzelnen Felder thematisiert. Mit und am Phänomen werden die Begriffe Feld, Feldlinienbild, Wechselwirkung, Kraft, Energiezufuhr, Energiespeicherung, Energiefreisetzung, Felderzeugung, Feldvergrößerung, Feldreduzierung, Feldvernichtung, Feldkomprimierung, Probekörper, System, Prozess und andere sekundäre Begriffe eingeführt, bevor einige davon mathematisiert werden.

Die UE sind wie folgt gegliedert:

- a) Versuchsdurchführung
- b) Beobachtungs - und ggf. Mathematisierungsphase
- c) Lernzielformulierung

Bild 6 Strukturierung des Feldkonzepts nach Klassenstufen

		K L A S S E N S T U F E N						
F E L D T Y P	7	8	9	10	11	12	13	
Magnetisches Feld								
- statisches	p	p	p	p	p	p	p	
- Gleichstrom	p	p	p	pt	pt	pt	pt	
- Wechselstrom	-	p	pt	ptm	ptm	ptm	ptm	
Elektrisches Feld								
- homogenes	-	pt	pt	ptm	ptm	ptm	ptm	
- inhomogenes	-	p	p	p	p	p	p	
- radiales	-	p	p	pt	ptm	ptm	ptm	
Gravitatives Feld								
- homogenes	-	p	p	p(m)	p(m)	p(m)	p(m)	
- radiales	-	p	p	p	p(m)	pm	pm	
Elektromagne- tisches Feld								
- systemgebun- denes	-	-	p	p	p	pm	pm	
- freies	-	-	-	p	p	pm	pm	
Kern - Feld	-	-	-	p	p	p	p(m)	
Glukonen - Feld	-		-	-	-	p	p	

3.2.1 Unterrichtseinheiten (UE) für die Sekundarstufe I  
(Klassenstufe sieben bis einschließlich Klassenstufe zehn)

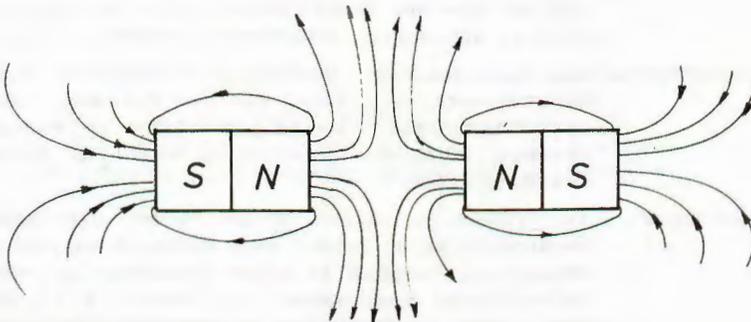
UE I/1: Statische magnetische Felder von Dauermagneten

Versuch 1: Sichtbarmachung von Magnetfeldern mit Eisenfeilspänen



Beobachtung/ Lernziel: Der Raum um Magnete lässt sich veranschaulichen. Man nennt ihn das magnetische Feld. Die Darstellung des Feldes heißt Feldlinienbild

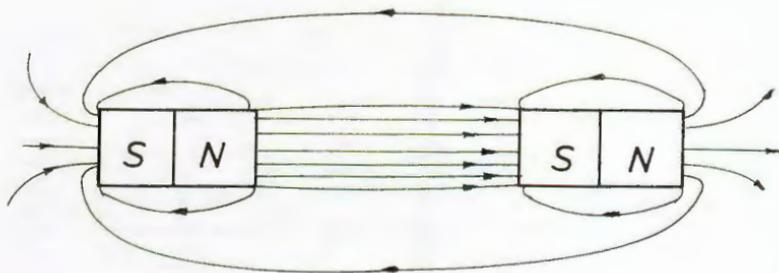
Versuch 2: Beide Magnete werden aufeinander zu bewegt.



Beobachtung: Die Feldlinienbilder beider Magnete ändern sich; insbesondere zwischen beiden Magneten.

**Lernziel:** Aus dem gemeinsamen Feld zwischen dem Magneten heraus wirken Kräfte auf die beiden Magnete, so daß eine Abstoßung beider Magnete erscheint.

**Versuch 3:** Beide Magnete werden mit unterschiedlicher Polarität aufeinander zubewegt.



**Beobachtung:** Die Felder ändern sich erneut. Das Feld zwischen den Magneten wird bis zu deren Berührung abgebaut.

**Lernziel:** Aus dem gemeinsamen Feld heraus zwischen den Magneten wirken anziehende Kräfte auf die Magnete, so daß eine Anziehung beider Magnete erscheint.

**Versuch 4:** Wiederholung des Versuches 3 mit dem Unterschied, daß der eine der beiden Magneten ein gegenüber dem anderen wesentlich schwächeres Magnetfeld hat.

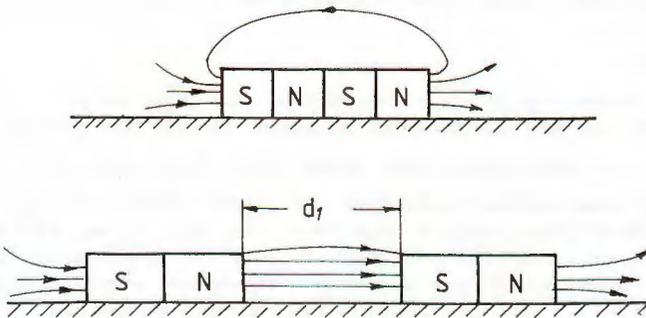
**Beobachtung:** Das Feld des sog. "schwächeren" Magneten ändert sich wesentlich stärker als das des sog. "stärkeren" Magneten; dieser wird kaum in Bewegung versetzt, während jener eine merklich größere Bewegung erfährt.

**Lernziel:** Im Versuch 3 wurden beide Felder gleichmäßig verändert. Beide Felder sind zugleich Subjekt und Objekt. Sie stehen in einer gleichmäßigen Wechselbeziehung zueinander. Im Versuch 4 hingegen wird das Magnetfeld des stärkeren Partners kaum, das des "schwächeren" Partners sehr stark verändert. Hierbei handelt es sich im Gegensatz zu der Sachlage beim Versuch Nr.3 in guter Näherung um ein Subjekt-Objekt-Verhältnis.

## Lernziele:

1. Magnetfelder sind reale Erscheinungen der Natur, die wir zwar nicht direkt sehen, wohl aber mit Eisenfeilspänen "sichtbar" machen können
2. Magnetfelder werden durch Feldlinienbilder dargestellt
3. Werden Magnete mit ihren Feldern aufeinanderzubewegt, so ändern sich die Felder infolge der Wechselwirkung, nicht hingegen die Magnete.
4. Ist einer der beiden Wechselwirkungspartner im Vergleich zum anderen so "schwach", daß sein Feld das des anderen Partners nicht merklich beeinflusst, so handelt es sich beim betreffenden Magneten bzw. magnetisierbaren Körper um einen Probekörper. Das Feld des Probekörpers "stört" das Feld des "stärkeren" Partners in der Umgebung jener Stelle, an die der Probekörper befördert worden ist.
5. Die Störung des Feldes wird vernachlässigt.

Versuch 5 Versuch Nr. 3 wird variiert, in dem zwei zusammenhängende Magnete auseinandergezogen werden.



Beobachtung Zwischen beiden Magneten ist ein Magnetfeld erzeugt worden.

## Lernziele:

6. Dem System, das aus zwei zusammenhängenden Magneten und dem gemeinsamen Magnetfeld besteht, wird Energie zugeführt. Die Energie wird im erzeugten Magnetfeld zwischen den Magneten als magnetische Feldenergie gespeichert
7. Die dem System nach Versuch Nr.2 zugeführte Energie wird im komprimierten Magnetfeld zwischen den Magneten als magnetische Feldenergie gespeichert.
8. Bewegen sich die Magnete im Versuch Nr.5 nach ihrer Trennung selbständig aufeinander zu, so wird das zuvor erzeugte Magnetfeld abgebaut. Die hierbei freiwerdende magnetische Feldenergie wird in kinetische Energie der Magnete umgewandelt.

UE I/2            Statische gravitative Felder von Körpern

Versuch            Analogieexperimente

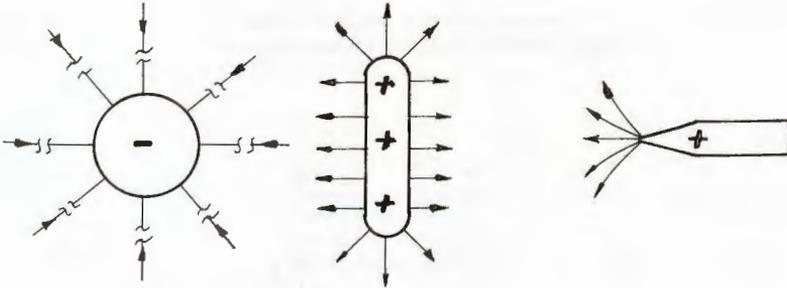
- a) Versuch Nr.5 aus der UE 1 wird wiederholt, wobei einer der beiden Stabmagnete festgehalten wird.
- b) Ein Körper (z.B. eine Kugel) wird um eine Strecke hochgehoben.

## Lernziele:

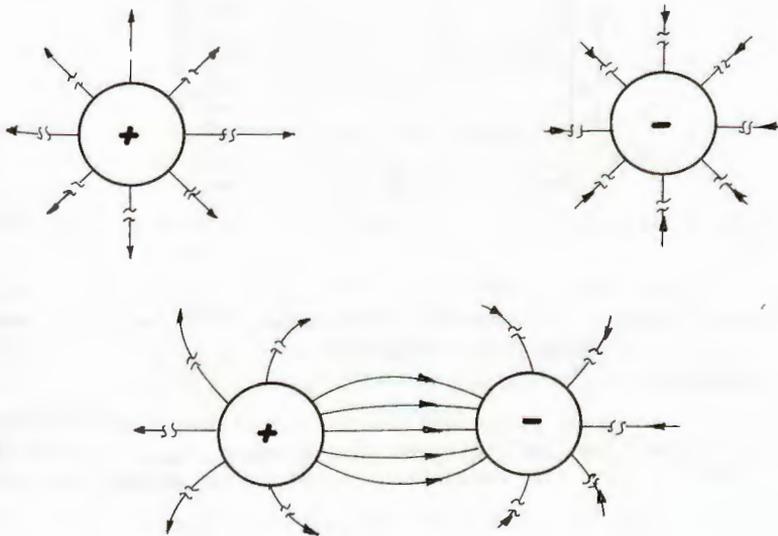
1. Die Kugel stellt einen Probekörper im Gravitationsfeld der Erde dar, das ebenso real existent ist wie das Magnetfeld.
2. Das Gravitationsfeld der Kugel stört das Erdfeld.
3. Wird dem System Kugel-Erde mit ihren Gravitations- bzw. Schwerefeldern Energie zugeführt, so wird diese im resultierenden Gravitationsfeld von Erde und Kugel (vorwiegend in der Höhe, um die die Kugel angehoben worden ist) als gravitative Feldenergie gespeichert.
4. Fällt die Kugel zu Boden, so wird das zuvor veränderte resultierende Gravitationsfeld auf seine ursprüngliche Form reduziert und in kinetische Energie der Kugel umgewandelt.
5. Die Schwerkraft - bzw. Gravitationskraft wirkt aus dem resultierenden Feld auf die Kugel, die einen Probekörper im Gravitationsfeld der Erde darstellt.

UE I/3 Statische elektrische Felder von unterschiedlich geladenen Platten, Kugeln und Spitzen

Versuch 1: Sichtbarmachung elektrischer Felder z.B. durch Grießkörner im Öl.



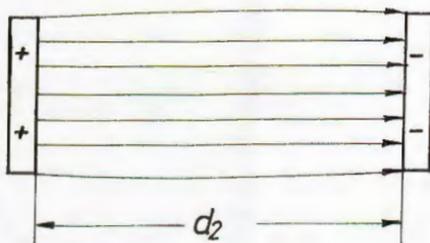
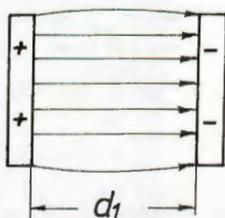
Versuch 2: Aufeinander Zubewegung zweier unterschiedlich geladener Kugeln.



## Lernziele:

1. Die elektrischen Felder ändern sich, nicht die aufgeladenen Kugeln (Keine Berührung)
2. Die Grießkörner im Versuch 1 stellen Probekörper im elektrischen Feld dar, das eine vernachlässigbare Störung durch die elektrischen Felder der Körner erfährt.

Versuch 3: Ein aufgeladener Plattenkondensator wird durch Energiezufuhr auseinandergezogen.



Beobachtung: Das bestehende elektrische Feld zwischen den Platten wird vergrößert.

## Lernziele:

1. Die dem System, bestehend aus den aufgeladenen Platten und dem dazwischen befindlichen elektrischen Feld, zugeführte Energie wird als zusätzliche elektrische Feldenergie im

(nahezu) homogenen elektrischen Feld gespeichert Die Platten und die darauf befindlichen elektrischen Ladungen haben sich nicht verändert.

2. Die dem Kondensator aus der elektrischen Energiequelle zugeführte Energie wird im elektrischen Feld gespeichert, das sich während des Aufladevorgangs bildet.
3. Wird der Kondensator z.B. über eine Glühlampe entladen, so wird das Feld abgebaut.  
Die freiwerdende elektrische Feldenergie wird in der Lampe in Lichtenergie umgewandelt.

Versuch 4: Quantitative Wiederholung des Versuches Nr.3 mit angeschlossenem statischen Spannungsmesser

Beobachtung: Beim Trennen der Platten steigt die Spannung an.

Lernziel: Die Spannung ändert sich proportional zum Plattenabstand.

UE I/4 Elektromagnetische Induktionsvorgänge

Versuch 1: Erzeugung von Magnetfeldern mittels Gleichstrom

Teil I: Erzeugung eines Magnetfeldes mittels Gleichstrom durch einen geradlinigen Leiter; Sichtbarmachung des Feldes durch Eisenfeilspäne und der Richtung mit der Kompaßnadel.

Teil II: Wie Teil I, aber : der zunächst gerade Leiter wird zu einer Leiterschleife mit unterschiedlicher Windungzahl geformt.

Teil III: Erhöhung der Stromstärke und Sichtbarmachung des Feldes.

Teil IV: Verwendung einer Spule und Sichtbarmachung des Feldes.

Teil V: Wiederholung von Teil IV und Stärkung des Feldes durch zusätzliches Einbringen eines Eisenjochs.

Lernziele:

1. Es können Magnetfelder erzeugt werden, wenn ein elektrischer Strom fließt.
2. Außer den Dauermagneten gibt es Elektromagnete.

3. Das Magnetfeld eines Elektromagneten ist umso stärker, je größer die Stromstärke ist.
4. Das Magnetfeld wird verstärkt, wenn ein Eisenjoch in die Spule gebracht wird.

#### Versuch 2: Leiterschaukel im Magnetfeld

Beobachtung: Beim Einschalten des Gleichstroms wird der im Magnetfeld befindliche Leiter aus dem Feld herausgedrängt.

#### Lernziele:

1. Die im Leiter fließenden Elektronen bilden den elektrischen Strom, der ein ringförmiges Magnetfeld um den Leiter bewirkt.
2. Das äußere Magnetfeld und das ringförmige Leitermagnetfeld resultieren zu einem Gesamtmagnetfeld.
3. Mit der gewählten Richtung des äußeren Magnetfeldes und der vorgegebenen Richtung des Stromes findet auf der einen Seite des Leiters eine Feldverdichtung und auf der anderen Seite eine Feldschwächung statt.
4. Verdichtete Felder enthalten mehr Energie als weniger komprimierte.
5. Die Leiterschaukel bewegt sich in den energieärmeren Raumbereich des Gesamtmagnetfeldes hinein.
6. Aus dem Gesamtfeld heraus wirkt die Kraft auf den sich bewegenden Leiter ein.

#### Versuch 3: Bewegung eines Leiters im Magnetfeld

Durchführung: Eine Leiterschleife, an deren Enden ein Spannungsmesser angeschlossen ist, wird in das ruhende und statische Magnetfeld eines Dauermagneten hineinbewegt.

Beobachtung: Während des Bewegungsvorgangs zeigt der Spannungsmesser einen Zahlenwert ungleich Null an.

#### Lernziele:

1. Gegenüber dem ruhenden Magnetfeld des Dauermagneten stellen die im Leiter befindlichen Elektronen bewegte Ladungen dar, die ihrerseits während ihrer Bewegung ein Magnetfeld erzeugen.

2. Dieses durch die bewegten Ladungen erzeugte Magnetfeld ist dem statischen Magnetfeld überlagert. Hierdurch entstehen Teilräume des resultierenden Magnetfeldes mit Feldverdichtung von höherer Energie und solche von geringerem Energieinhalt.
3. Aufgrund der unterschiedlichen Energiedichte an verschiedenen Orten im Gesamtmagnetfeld werden die freibeweglichen Elektronen zum einen Leiterende hinbewegt, wodurch an den Leiterenden eine Spannung gemessen werden kann.
4. Die auf diese Weise meßbare Spannung heißt "Induktionsspannung".

#### Versuch 4: Bewegung eines Magneten bei ruhendem Leiter

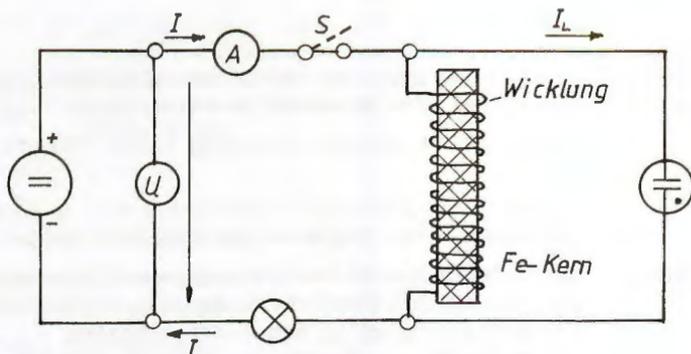
- Durchführung:
- a) Leiterschleife fest; Bewegung des Dauermagneten
  - b) Leiterschleife fest; Bewegung des Dauermagneten mit gegenüber a) umgekehrter Polung
  - c) Bewegung von Magnet und Leiterschleife
  - d) Verwendung eines stärkeren Magneten
  - e) Verwendung einer Spule statt einer Leiterschleife

#### Lernziele:

1. Wirkt ein bewegtes Magnetfeld auf einen elektrischen Leiter ein, so wirkt aus dem Magnetfeld eine Kraft auf die beweglichen Ladungen im Leiter ein, wodurch wie im Versuch Nr.3 eine Induktionsspannung an der Leiterschleife meßbar ist.
2. Die erzeugte Induktionsspannung ist abhängig von
  - a) der Geschwindigkeit des Magneten
  - b) von der Stärke des Magnetfeldes (Feldstärke) und
  - c) von der Windungszahl der Spule

## Versuch 5: Selbstinduktionsvorgang

Durchführung: Der Schalter "S" wird zuerst geschlossen und danach geöffnet



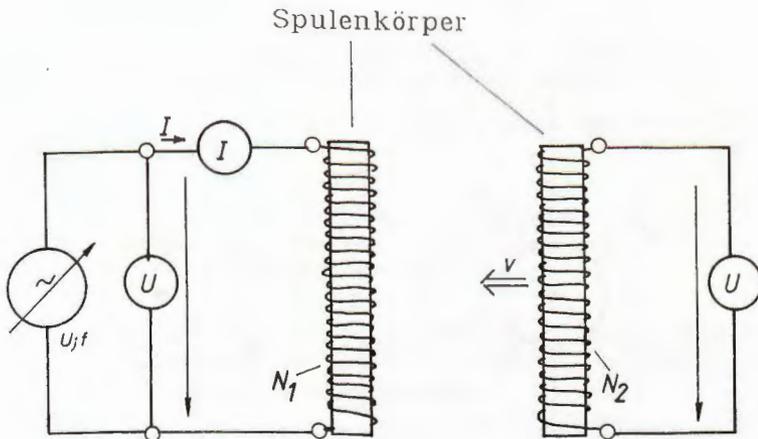
Beobachtung: Beim Öffnen des Schalters leuchtet die Glühlampe kurzzeitig auf, nicht beim Schließen des Schalters.

## Lernziele:

1. Beim Schließen des Schalters bewirkt der Strom das Spulenmagnetfeld, das durch das Eisenjoch verstärkt wird.
2. Die Batteriespannung ist wesentlich kleiner als die Zündspannung der Glühlampe.
3. Beim Öffnen des Schalters wird das Spulenmagnetfeld sehr schnell abgebaut.
4. Die freigesetzte magnetische Feldenergie wird in der Lampe in Lichtenergie umgewandelt.
5. Die hohe Zündspannung (die der Induktionsspannung entspricht) wird durch den schnellen Feldabbau erzielt, indem das Feld extrem kurzzeitig auf die beweglichen Ladungen im Spulendraht einwirkt.

## Versuch 6: Transformator ohne Eisenkern

Durchführung: In das elektromagnetische Feld der Primärspule wird die Sekundärspule hineingebracht, an deren Enden ein Spannungsmesser angeschlossen ist. Der Versuch wird mit verschiedenen Windungszahlen und Spulenabständen variiert.

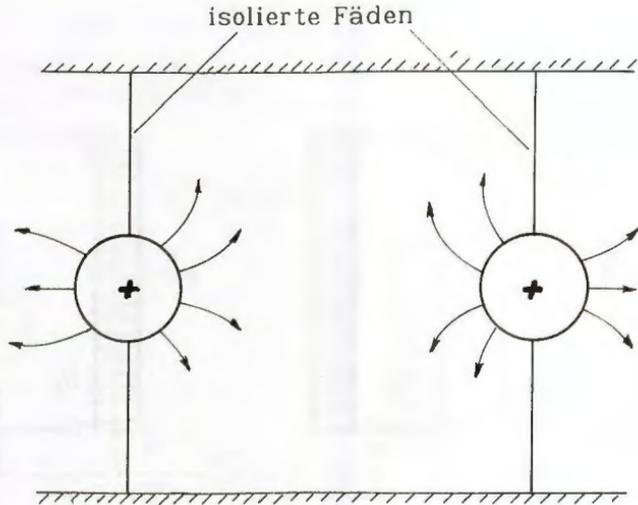


#### Lernziele:

1. Statt eines bewegten Dauermagneten kann ein zeitlich sich änderndes Magnetfeld eines Elektromagneten einen Induktionsvorgang bewirken.
2. Je näher die Sekundärspule in das Primärmagnetfeld hineingebracht wird, desto größer ist die Induktionsspannung, weil die Feldstärke in der Nähe der Spule stärker als in größerer Entfernung von ihr ist.
3. In der Nähe der Primärspule ist im Magnetfeld mehr Energie (höhere Energiedichte) gespeichert als in größerer Entfernung.

UE I/5      Energiefreisetzung (radiales elektrisches Feld)

Versuch 1: Zwei isoliert aufgehängte Tannenbaumkugeln mit metallischer Oberfläche werden mit derselben Polarität (z. B. positiv) aufgeladen.



Durchführung: Nach dem Aufladen der Kugeln werden die unteren Fäden durchtrennt.

Beobachtung: Die Kugeln bewegen sich kurzzeitig und bleiben in der veränderten Lage.

Lernziele:

1. Infolge des Aufladens der Kugeln ist zwischen den Kugeln ein komprimiertes elektrisches Gesamtfeld entstanden, das sich aufgrund der Überlagerung der Einzelfelder gebildet hat.
2. In diesem komprimierten Feld zwischen den Kugeln ist wesentlich mehr Energie gespeichert als in den Raumbereichen des Gesamtfeldes auf den anderen Seiten der Kugeln.
3. Die Kugeln erhalten die Bewegungsenergie aus dem sich entkomprimierenden Gesamtfeld aufgrund der Freisetzung von elektrischer Feldenergie.

Versuch 2: Versuch Nr.1 wird mit unterschiedlicher Polarität wiederholt.

Beobachtung: Beide Kugeln bewegen sich aufeinander zu und berühren sich, wenn die Versuchsbedingungen es erlauben.

Lernziele:

1. Zwischen den Kugeln findet eine Feldreduzierung des Gesamtfeldes statt.
2. Die Kugeln erhalten die Bewegungsenergie aus dieser Feldreduzierung infolge Freisetzung von elektrischer Feldenergie.
3. Können sich die Kugeln berühren, so entladen sie sich. Die Felder werden dabei abgebaut. Die freiwerdende Feldenergie wird durch einen Entladungsfunken abgestrahlt.

Versuch 3: Die Versuche Nr.1 und 2 werden mit verschiedenen Ladungsmengen ( $Q$ ) und mit unterschiedlichen Kugelradien ( $R$ ) wiederholt.

Lernziel: Die Bewegung der Kugeln ist umso heftiger und die Energiefreisetzung umso größer, je höher die Ladungsmenge und je kleiner der Radius ist.

Ergänzung: Vorgabe der Feldenergieformel zum radialen elektrischen Feld (Herleitung erst in Klasse 12; siehe UE 2 in der S II):

$$W_{\text{Feld}} = k \cdot \frac{Q^2}{R}$$

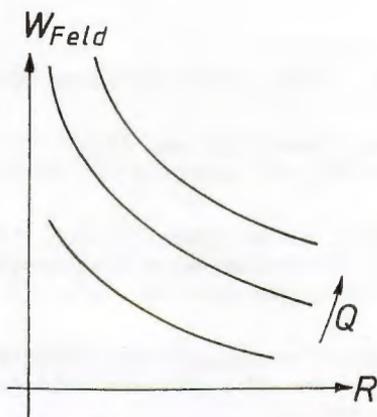
$$\left( k = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \right)$$

Die Benutzung von Konstanten ist dem Schüler aus der Erarbeitung des Hookeschen und des Ohmschen Gesetzes vertraut. In der Klassenstufe zehn werden quadratische Funktionsgleichungen auf jeden Fall, einfache hyperbolische häufig behandelt.

Unter Vorgabe der Konstanten " $k$ ", mit der Möglichkeit der Ladungsmessung - die heutzutage in den Schulen experimentell möglich ist - und mit der einfachen Kugelradiusbestimmung können die Energieinhalte radialer elektrischer Felder quantitativ bestimmt werden.

Mit der oben vorgegebenen Feldenergieformel hat der Schüler ein weiteres und sehr wesentliches physikalisches Beispiel für die Hyperbelfunktionsgleichung.

Mit der Ladungsmenge  $Q$  als Parameter läßt sich eine Schar von Hyperbeln darstellen.



An diesem Diagramm kann dem Schüler einsichtig gemacht werden, daß es keine punktförmige Ladung ( $R=0$ ) geben kann, da die Feldenergie hierfür unendlich groß sein müßte.

Weiterhin läßt sich an diesem Diagramm zeigen, daß die Feldenergiefreisetzung durch Feldvernichtung bei konstanter Ladungsmenge umso größer ist, je kleiner der Kugelradius ist. Da sich Atom- und Atomkerndurchmesser um den Faktor der Größenordnung  $10^4$  bis  $10^5$  unterscheiden und die Ladungsmenge quadratisch eingeht, ist die Energiefreisetzung bei nuklearen Prozessen infolge Feldreduzierung um den Faktor  $10^7$  bis  $10^8$  höher als bei chemischen Prozessen.

#### UE I/6 Feldenergie und Wärmelehre

Versuch 1: Ein Metallstab wird durch Energiezufuhr um eine meßbare Temperaturdifferenz erwärmt.

Beobachtung: Der Stab dehnt sich meßbar aus.

Lernziele:

1. Die dem Metallstab zugeführte Energie wird als sogenannte "innere Energie" gespeichert.
2. Aufgrund der Energiezufuhr schwingen nicht nur die Metallionen stärker als zuvor um ihre Ruhelage, sondern die zwischen den Ionen befindlichen elektrischen Felder werden stärker komprimiert bzw. gedehnt.
3. Die sog. "innere Energie" setzt sich (zu gleichen Teilen) aus der Schwingungsenergie der Metallionen und aus elektrischer Feldenergie zusammen.

Versuch 2: Schmelzvorgang eines Metalls (z.B. Blei).  
(Das feste und das flüssige Metall haben die gleiche Temperatur)

Beobachtung: Das flüssige Metall dehnt sich aus und nimmt räumlich ein größeres Volumen ein.

Lernziele:

1. Da das Metall im festen und im flüssigen Zustand die Schmelztemperatur hat, haben die Metallionen die gleichen kinetische Energie.
2. Die dem Metall zum Schmelzen zugeführte Energie, die sogenannte "Schmelzwärme", wird zusätzlich in den elektrischen Feldern zwischen den Metallionen und den freien Elektronen gespeichert. Die Felder nehmen einen wesentlich größeren Raum ein.

Versuch 3: Gedankenexperiment  
(Verdampfung eines Metalls)

Ergebnis: Aus der Oberfläche des flüssigen Metalls werden freie Ionen und freie Elektronen durch Zufuhr weiterer Energie - die sog. "Verdampfungswärme" - herausgelöst.

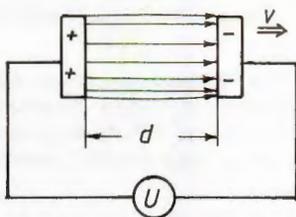
Lernziele:

1. Wie die Schmelzwärme erweist sich auch die Verdampfungswärme als reine elektrische Feldenergie.
2. Der Betrag der Verdampfungswärme ist im Vergleich zur Schmelzwärme deshalb so hoch, weil die elektrischen Felder in der Gasphase eine weitaus größere Reichweite als in der flüssigen Phase haben. Für diese enorme Feldvergrößerung ist daher wesentlich mehr Energie aufzubringen als für die relativ geringe Feldvergrößerung beim Prozess von der festen in die flüssige Phase.
3. Kondensations- und Erstarrungswärme bedeuten jeweils Freisetzung von elektrischer Feldenergie infolge Feldreduzierung.

### 3.2.2 Unterrichtseinheiten für die Sekundarstufe II (Von Klasse 11 bis Klasse 13)

UE II/1      Homogenes elektrisches Feld

Versuch 1:    Siehe Versuch Nr.4 aus der UE 3 für die Sekundarstufe I



**Ergebnis:** Die Spannung ändert sich proportional zum Plattenabstand:

$$U \sim d$$

**Mathematisierung:** Einführung eines Proportionalitätsfaktors:

$$U = k \cdot d$$

**Physikalische Interpretation:** Das elektrische Feld ist vergrößert worden, sein Volumen wurde erhöht, es enthält mehr Energie als vorher. Die Feldstärke ist konstant geblieben.

**Einführung:** Der mathematisch eingeführte Proportionalitätsfaktor "k" hat die physikalische Bedeutung einer elektrischen Feldstärke.

Symbol:  $E$

**Ergebnis:**  $U = E \cdot d$       bzw.       $E = \frac{U}{d}$

**Erarbeitung der Feldenergieformel**

1. Experimentelle Herausarbeitung von  $Q/A = D$  und  $D \sim E$  mit  $D = \epsilon_0 \cdot E$ , wie im Physikunterricht üblich.
2. Herleitung der Formel für die Energiedichte (nur für das homogene Feld)

$$W = \frac{1}{2} \cdot U \cdot I \cdot t = \frac{1}{2} \cdot U \cdot Q$$

mit  $U = E \cdot d$  und  $Q = D \cdot A = \epsilon_0 \cdot E \cdot A$  folgt

$$W = \frac{1}{2} \cdot E \cdot d \cdot \epsilon_0 \cdot E \cdot A$$

$d$  = Plattenabstand  
 $A$  = Plattenoberfläche  
 $V$  = Feldvolumen

$$W = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \cdot V$$

Betrachtung:

Ein Vergleich mit der Formel, die üblicherweise im Unterricht hergeleitet und mit der gerechnet wird - nämlich  $W = 1/2 \cdot C \cdot U \cdot U$  - ergibt, daß die Parameter  $E$  und  $V$  deutlich machen, "wo" die Energie verbleibt, die einem Kondensator bei dessen Aufladevorgang aus der Energiequelle zugeführt und im homogenen elektrischen Feld gespeichert wird.

Lernziele:

1. In der Umgebung einer elektrischen Ladung befindet sich einelektrisches Feld.  
Feld und Ladung bestehen zusammen!
2. Die elektrische Feldenergie im homogenen Kondensatorfeld ist quadratisch abhängig von seiner Feldstärke und ist im Feldvolumen gespeichert.
3. Der Quotient  $W/V$  heißt Energiedichte des elektrischen Feldes.

Versuch 2: In das konstante Kondensatorfeld wird eine Glasplatte hineingezogen.

Beobachtung: Der angeschlossene Spannungsmesser registriert eine Spannungsabnahme. Die Spannung erhält ihren ursprünglichen Wert, nachdem die Platte aus dem Feld herausgezogen worden ist.

Lernziele:

1. Da die Spannung um einen Betrag  $\Delta U$  abgenommen hat, mit  $Q = \text{const.}$ ,  $d = \text{const.}$  und  $D = \text{const.}$  keine Veränderungen vorgenommen worden sind, muß die Feldenergie um einen Betrag  $\Delta W$  vermindert worden sein.
2. Die um den Betrag  $\Delta W$  verminderte elektrische Feldenergie ist zum einen Teil in kinetische Energie der Platte bei deren Einführung in das Kondensatorfeld umgewandelt worden.
3. Beim Polarisieren der Glasmoleküle sind die innermolekularen elektrischen Felder vergrößert bzw. komprimiert worden. Die hierfür notwendige Energie entspricht dem anderen Anteil von  $\Delta W$ .

UE II/2 Radiales elektrisches Feld

Versuch: Experimentelle Bestimmung folgender Abhängigkeiten:

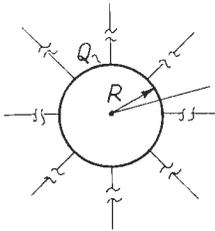
$$E = f(r) \quad \text{und} \quad E = f(Q)$$

Ergebnis:  $E \sim \frac{1}{r^2}$  und  $E \sim Q$

Resultat: 
$$E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

Herleitung der Feldenergieformel:

Schritt 1 Berechnung der Energie  $W$ , die für das Sammeln der Ladung  $Q$  aus dem Unendlichen auf die Kugeloberfläche mit dem Radius  $R$  erforderlich ist.



Mit

$$W_{\text{Kugel}} = \int_0^Q U(q) dq$$

folgt unter Einbeziehung von

$$U(q) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R^2} \cdot r$$

$$W_{\text{Kugel}} = \int_0^Q \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R^2} \cdot r \cdot dr$$

Die Integration unter Berücksichtigung von  $r \rightarrow R$  ergibt

$$W_{\text{Kugel}} = \frac{Q^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R}$$

Schritt 2 Ob die Energie im elektrischen Radialfeld gespeichert ist, wird mit  $W_{\text{Feld}} = 1/2 \cdot D \cdot E \cdot V$  nachgeprüft:

$$W_{\text{Feld}} = \int_R^\infty \frac{1}{2} \cdot D \cdot E \cdot dV$$

=====

$$D = \epsilon_0 \cdot E$$

$$\frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \int_R^\infty E^2 \cdot dV$$

Mit  $E = Q/4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r^2$  und  $dV = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr$  folgt

$$W_{\text{Feld}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \int_R^\infty \frac{1}{16 \cdot \pi^2 \cdot \epsilon_0^2} \cdot \frac{Q^2}{r^4} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr$$

$$W_{\text{Feld}} = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot Q^2 \cdot \left( -\frac{1}{r} \right) \Big|_R^\infty = \frac{Q^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R}$$

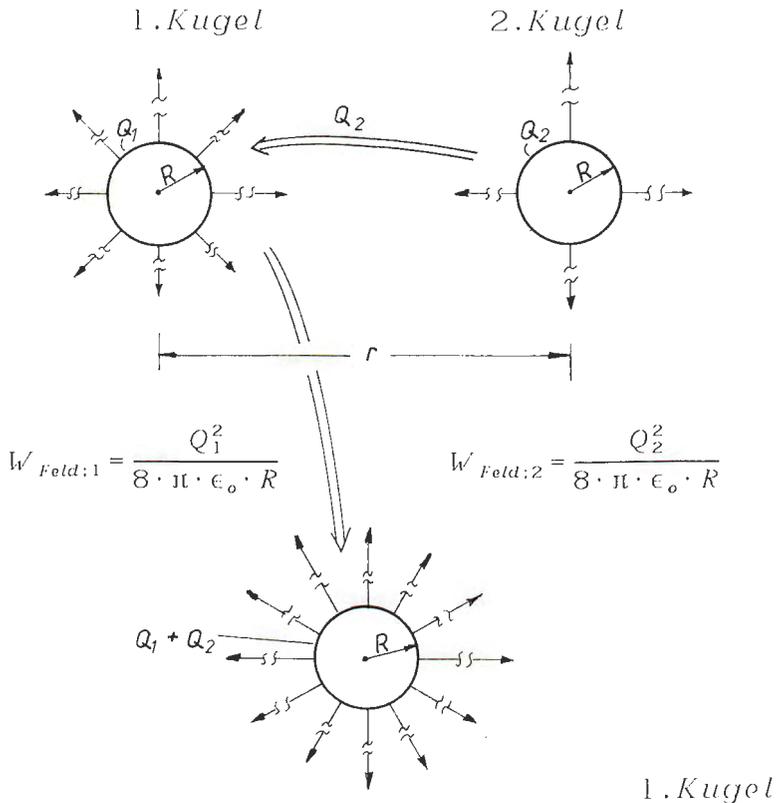
Die Integration bestätigt das obige Ergebnis und zeigt, daß die Energie nicht auf der Kugel sondern vielmehr im elektrischen Radialfeld als elektrische Feldenergie gespeichert ist.

Erweiterung:

In der UE 5 für den SI-Bereich wurde die Wechselwirkung für Radialfelder auf rein phänomenologischer Ebene beschrieben, der nun eine darauf aufbauende quantitative Betrachtung folgen soll.

Herleitung der Wechselwirkungsenergieformel:

Berechnung der erforderlichen Energie, um die Ladungen von zwei Kugeln auf eine Kugel zu konzentrieren.



$$W_{\text{Feld}:1+2} = \frac{(Q_1 + Q_2)^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R} = \underbrace{\frac{Q_1^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R}}_{W_{\text{Feld}j1}} + 2 \cdot \underbrace{\frac{Q_1 \cdot Q_2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R}}_{W_{\text{Feld-WW}}} + \underbrace{\frac{Q_2^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R}}_{W_{\text{Feld}j2}}$$

Resultat:

Die Energie von

$$W_{\text{Feld}} = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R}$$

a) ist beim Zusammenführen der Ladungen auf eine Kugel aufzubringen, wenn beide Kugeln Ladung gleicher Polarität tragen

und

b) wird freigesetzt bei verschiedenen Ladungen.

UE II/3      Radiales Gravitationsfeld

Vorspann: Die in der UE 2 für den SI-Bereich formulierten Lernziele sind zuerst zu erarbeiten, bevor auf die quantitative Beschreibung des radialen gravitativen Feldes eingegangen wird.

Aufgabe: Herausarbeitung einer Feldenergieformel durch Analogbetrachtungen zum radialen elektrischen Feld.

Hinführung: In Analogie zur feldbeschreibenden Größe E und zur feldbereitstellenden Größe D im elektrischen Feld lassen sich zum Schwerfeld folgende Definitionen vornehmen:

$$D := \frac{M}{A}$$

M = Masse eines kugelförmigen Körpers

A = die zugehörige Oberfläche

$$E := \frac{F}{m}$$

F = Feldkraft im Gravitationsfeld

m = Masse des zugehörigen Probekörpers

Physikalische Bedeutung von  $D$  und  $E$

" $D$ " beschreibt die Feldliniendichte des Gravitationsfeldes; die Gravitationsfeldstärke  $E$  erweist sich - was leicht durch Einheitenvergleich zeigbar ist - als die (bekannte) Fall- oder "Erd"-Beschleunigung.

Lösung: Die Herleitung der in der Aufgabenstellung geforderten Feldenergieformel wird durch Analogiebetrachtungen zur Feldenergieformel im radialen elektrischen Feld vorgenommen.

Mit

$$W_{Grav.Feld} = \frac{1}{2} \int_r^\infty D_{Gr.} \cdot E_{Gr.} \cdot dV$$

folgt unter Einbeziehung von

$$F_{Gr.} = \gamma_{Gr.Feld} \cdot \frac{m \cdot M}{r^2},$$

$$E_{Gr.} = 4 \cdot \pi \cdot \gamma_{Gr.Feld} \cdot D_{Gr.}$$

und

$$E_{Gr.} = \frac{F_{Gr.}}{m}$$

zunächst

$$W_{Gr.Feld} = \frac{1}{2} \int_r^\infty \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \gamma_{Gr.Feld}} \cdot E_{Gr.}^2 \cdot dV$$

Quadrieren, Vereinfachen und Integrieren liefert mit  $dV = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot r \cdot dr$  den Energieinhalt eines statischen und radialsymmetrischen Gravitationsfeldes zu

$$W_{Gr.Feld} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{Gr.Feld} \cdot \frac{M^2}{R}$$

Gegerüberstellung der Formeln zum statischen radialen elektrischen Feld und zum radialen statischen Gravitationsfeld:

$$W_{El.Feld} = \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q^2}{R}$$

$$W_{Gr.Feld} = \frac{1}{2} \cdot \gamma_{Gr.Feld} \cdot \frac{M^2}{R}$$

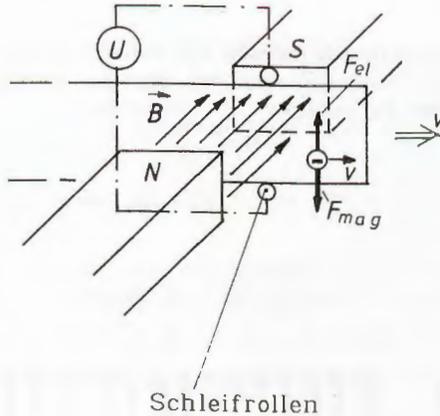
Lernziele:

1. Ruhende elektrische Ladungen haben elektrische Felder und ruhende Massen haben gravitative Felder.
2. Im elektrischen und im gravitativen Feld ist Energie gespeichert.
3. Bewegte elektrische Ladungen haben elektrische Felder und magnetische Felder.

UE II/4 Einführung der magnetischen Feldliniendichte, der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Feldenergie.

Versuch 1:

Ein Aluminiumstreifen oder ein Kunststoffstreifen, der mit feinen isolierten Kupferdrähten umwickelt ist, wird durch das Feld eines Magneten hindurchgezogen. Wird ein Kunststoffstreifen verwendet, so ist die Isolierung unter den Schleifkontakten zu entfernen. Innerhalb des Magnetfeldes wird über die seitlich angebrachten Rollen die Induktionsspannung abgegriffen und über einen Meßverstärker gemessen.



Durchführung:

- a) Der Streifen der Breite  $b$  wird mit konstanter Geschwindigkeit durch das Magnetfeld gezogen

Ergebnis :  $U_{ind} = const.$

Mit  $E = const.$  im Innern des Streifens folgt:

$$E = U_{ind} / b$$

- b) Aufnahme einer Meßreihe mit vorgegebener Breite des Streifens für  $U_{ind} = f(t)$

Ergebnis:  $E \sim v \rightarrow E = k \cdot v$

Einführung: Magnetische Feldliniendichte "B"

Das Magnetfeld und seine Feldliniendichte sind während der Versuchsdurchführung konstant geblieben. Der Proportionalitätsfaktor in der Beziehung  $E = k \cdot v$  ist physikalisch die Feldliniendichte  $B$ .

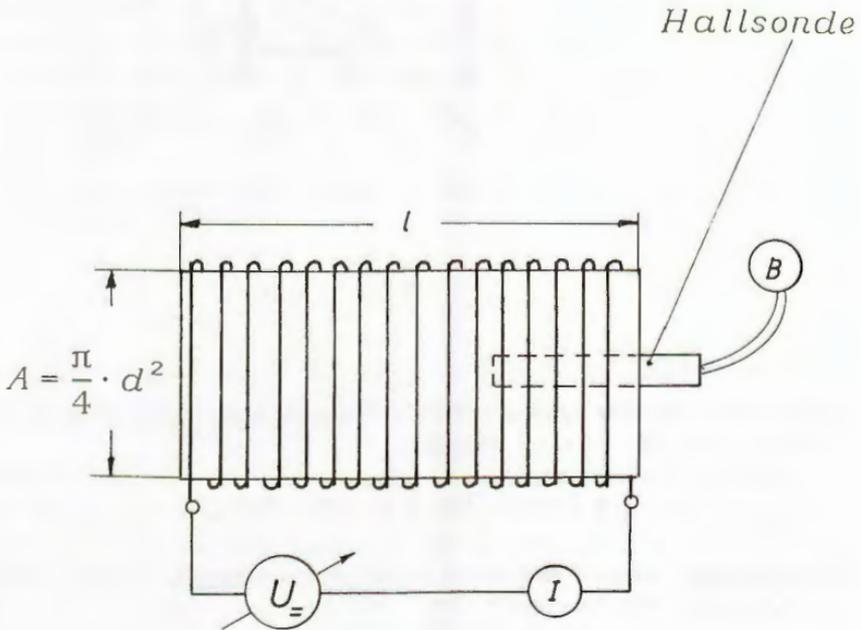
Vereinfacht für senkrecht aufeinanderstehende Vektoren folgt das Resultat

$$E = B \cdot v \quad \Longrightarrow \quad F = B \cdot q \cdot v$$

$$E = \frac{F}{q}$$

### Versuch 2:

Mit einer Hallsonde werden die Abhängigkeiten  $B = f(I)$ ,  $B = f(1/l)$  und  $B = f(N)$  herausgearbeitet und im Anschluß daran wird die magnetische Feldstärke "H" eingeführt.



### Resultat:

Mit den drei proportionalen Beziehungen  $B \sim I$ ,  $B \sim 1/l$  und  $B \sim N$  erfolgt die Zusammenfassung zu:

$$B \sim \frac{I \cdot N}{l}$$

Einführung: Magnetische Feldstärke "H"

Der Proportionalitätsfaktor in  $B = m \cdot I \cdot N / l$  ist die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  und der Quotient ist die magnetische Feldstärke "H".

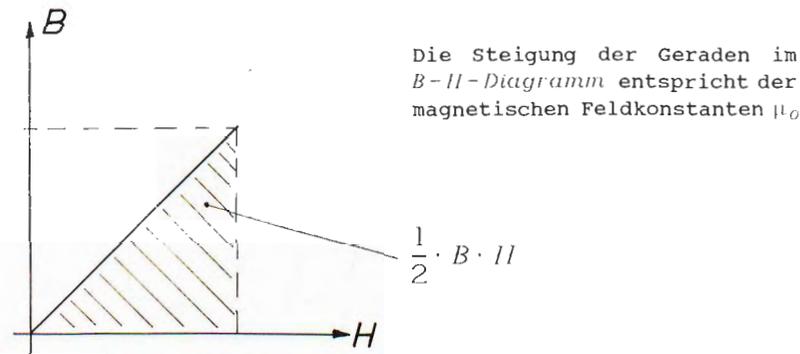
Ergebnis:  $B = \mu_0 \cdot H$  für eisenlose Spulen

und

$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$  für eisenbehaftete Spulen

Versuch 3: Aufnahme einer Kennlinie zu  $B = \mu_0 \cdot H$

Anhand einer Meßreihe läßt sich der Zusammenhang zwischen der Flußdichte und der Feldstärke des Magnetfeldes grafisch darstellen.



Einführung: Magnetische Feldenergie  $W_{\text{Magn.Feld}}$

Durch eine Zielfrage, welche physikalische Bedeutung der Flächeninhalt unter der Geraden im  $B-H$ -Diagramm hat, wird durch Einheitenermittlung des Produkts von  $B$  und  $H$  die magnetische Energiedichte  $W_{\text{Magn.Feld}}/V$  mit der Einheit  $J/m^3$  herausgearbeitet.

Zusammenfassung:

Die Energie im magnetischen Feld berechnet sich mit dem *B-H-Diagramm* zu

$$W_{\text{Magn.Feld}} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V$$

Ergänzung: Vergleich der Feldenergieformeln zum elektrischen und zum magnetischen Feld.

(I) Magnetische Feldenergie

Physikalische  
Formel (im kon-  
stanten Feld)

$$W = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot H^2 \cdot V$$

Technische Formeln

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

(II) Elektrische Feldenergie

Physikalische  
Formel (im kon-  
stanten Feld)

$$W = \frac{1}{2} \cdot D \cdot E \cdot V$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \cdot V$$

Technische Formel

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

Die "physikalischen" Formeln sind physikalisch aussagefähiger als die "technischen", die gleichwohl im Physikunterricht vorrangig verwendet werden. Durch die feldbeschreibenden Größen  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  und durch die zugehörigen Volumina läßt sich phänomenologisch wesentlich besser verstehen, daß die Energie im Feldvolumen lokalisiert und gespeichert ist.

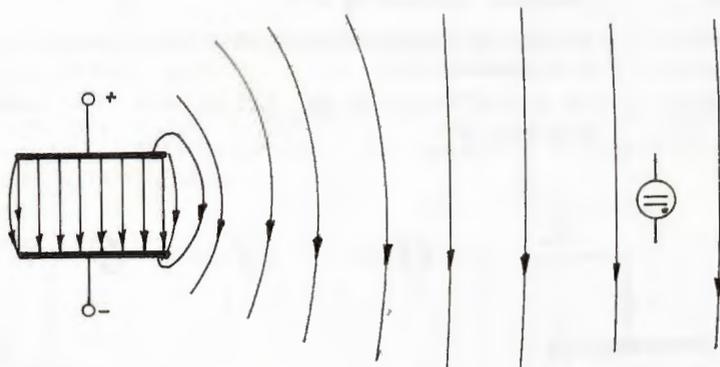
UE II/5      Der Energietransport im elektromagnetischen Feld  
 - Einführung und Handhabung des Poyntingvektors -

Vorbemerkungen:

In /198/ habe ich gezeigt, wie auf phänomenologischer und halbempirischer Weise der Energietransport im elektromagnetischen Feld schon Mittelstufenschülern nahegebracht werden kann. Am Transformator ohne Eisen läßt sich zeigen, daß der Energietransport materiellos erfolgen kann. Ein auf genetische Weise einführbarer Poyntingvektor wird von mir in /199/ angeboten, der in dieser UE verkürzt vorgestellt wird. Im zweiten Teil dieser UE wird der Poyntingvektor methodisch herangezogen, um die Zusammenhänge beim Transformator mit Eisenkern herauszuarbeiten.

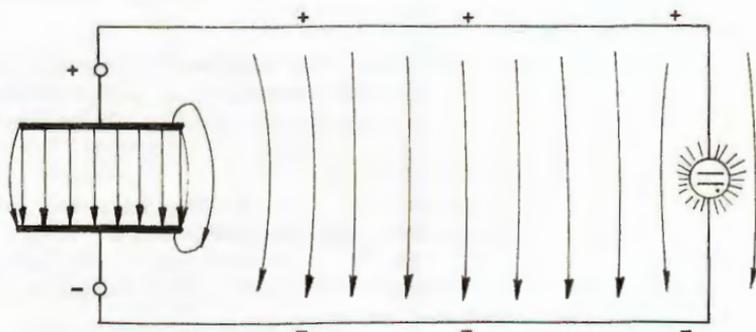
Teil 1      Entladungsvorgang beim Plattenkondensator und Einführung des Poyntingvektors

Vorversuch:      In das äußere elektrische Feld eines Plattenkondensators wird eine Glimmlampe hineingebracht.



Beobachtung:      Die Glimmlampe leuchtet nicht.

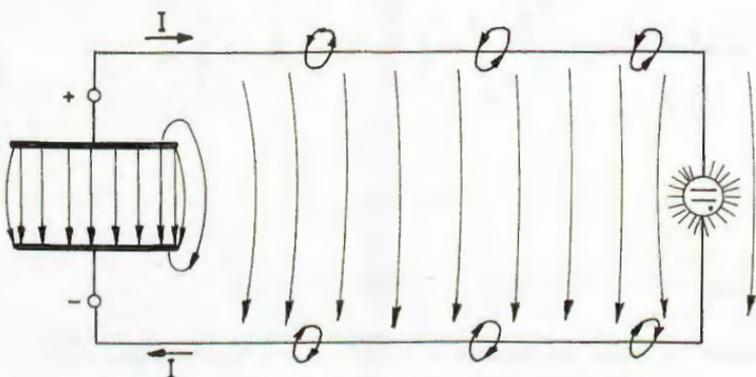
Versuch 1:      Der Kondensator wird mit der Glimmlampe durch eine elektrische Leitung verbunden.



Beobachtung: Der Kondensator wird entladen, die Glimmlampe leuchtet kurzzeitig auf.

Zielfrage: Welches physikalische Phänomen geht einher mit dem Entladungsstrom?

Antwort: Es bildet sich um den Leiter ein ringförmiges Magnetfeld.



## Hypothese:

Im elektromagnetischen Feld, das aus dem elektrischen Feld und aus dem magnetischen Feld gebildet wurde, wird die Energie transportiert

## Ansatz:

Aus der verbalen "UND - Verbindung" der zunächst selbständigen Felder zum elektromagnetischen Feld wird auf der formalen Ebene eine multiplikative Verknüpfung. Auf diese Weise werden die feldbeschreibenden Größen - nämlich die elektrische und die magnetische Feldstärke - mathematisch miteinander verknüpft, mit einer vorläufigen Beschränkung auf die Beträge der Feldvektoren. Zugleich wird die Frage nach der physikalischen Bedeutung dieser Verknüpfung untersucht, was durch einen Einheitenvergleich möglich ist.

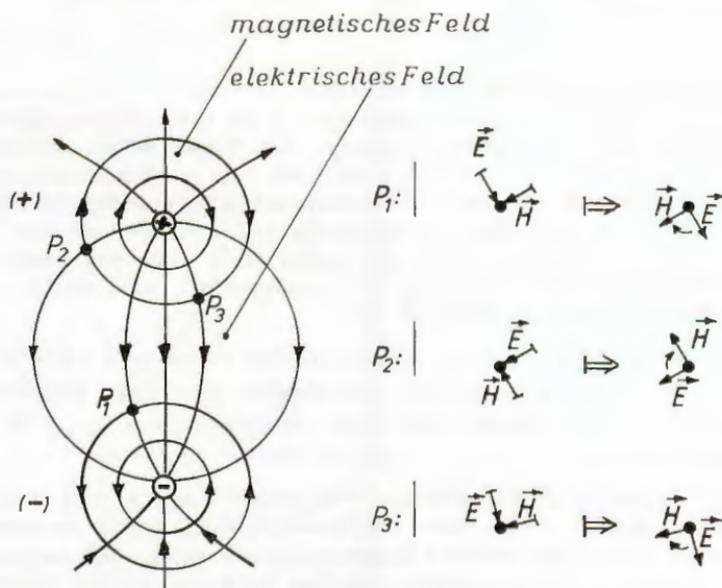
Resultat/ Mit  $[E \cdot H] = [E] \cdot [H] = V/m \cdot A/m = W/m^2 = J/m^2 \cdot s$   
 Lernziel erhält man die Leistungsdichte bzw. Energie pro Fläche und Zeit.

## Weiterführung:

Durch eine Ergänzungsfrage, "welche" Energie und "welche" Fläche gemeint sind, wird der zuvor eingeleitete Lernprozess aufrechterhalten und die Erkenntnis gewonnen, daß es sich um die Energie im elektromagnetischen Feld und um die "Schnittfläche" in "Blickrichtung" mit Ausnahme der Leiterquerschnittsfläche handelt.

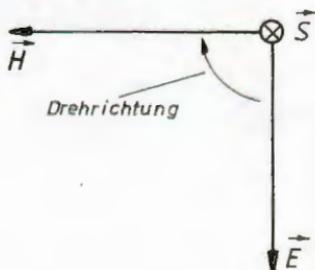
Hinführung zum Poyntingvektor:

Im unteren Bild ist das Feldlinienbild des elektromagnetischen Feldes dargestellt.



In den Raumpunkten (1) bis (3) sind die Feldvektoren  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  eingetragen. Sie liegen in einer Ebene senkrecht zur Richtung des Energietransportes. Mit dem Wissen, daß die Energie aus dem Kondensatorfeld in Richtung der Lampe fließen muß, ist die "Rechtsschraube" aus den Richtungen von  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$  und dem Energietransport ausgezeichnet.

Die Energie fließt im obigen Bild im elektromagnetischen Feld "durch das Blatt" hindurch.



Die Energieflußrichtung wird durch ein "Kreuz" gekennzeichnet, das in ein "Rechtssystem" eingetragen ist, dessen Darstellung im nebenstehenden Bild wiedergegeben ist.

## Einführung des Poyntingvektors:

## Weg 1

Die formale Schreibweise des Kreuz - bzw. des Vektor - Produkts ist aus der mathematischen Formulierung der Lorenzkraft bekannt. Durch erinnernde Wiederholung, daß die Lorenzkraft  $\vec{F}$  ebenso senkrecht auf  $\vec{v}$  und  $\vec{B}$  steht wie der Energietransport auf  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$ , wird der Poyntingvektor, der den Energietransport formal beschreibt, zu  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  eingeführt.

## Weg 2

Ist dem Schüler das Vektorprodukt nicht bekannt, wohl aber das Skalarprodukt, so kann dem Schüler mit physikalischen Argumenten plausibel gemacht werden, daß das Skalarprodukt für die mathematische Beschreibung des Energietransports eben deshalb nicht in Frage kommen kann, weil das Resultat des Skalarprodukts ein Skalar und keinen Vektor ergibt. Der Energietransport ist aber gerichtet und muß daher durch einen Vektor beschrieben werden.

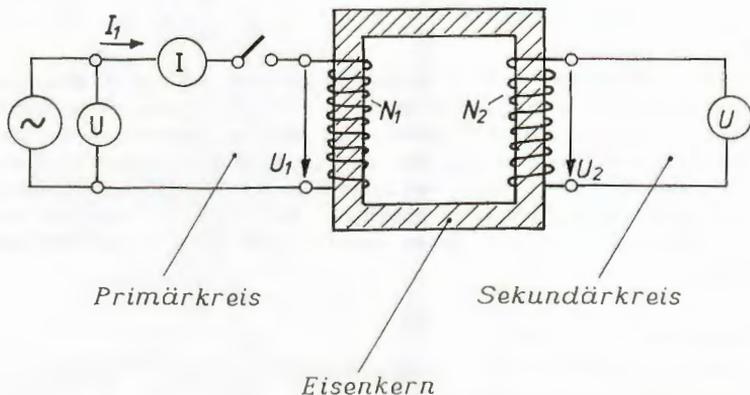
## Lernziele:

1. Die Energie von einer Energiequelle zum sog. Verbraucher wird im elektromagnetischen Feld und nicht im Leiter transportiert.
2. Das elektromagnetische Feld ist an den Stromkreis gebunden, von dem es sich nicht löst.

## Teil 2 Zum Energietransport beim Transformator

Vorbemerkungen:

Im Teil 1 dieser UE wurde ein idealer elektrischer Stromkreis betrachtet. In Analogie hierzu stellt ein geschlossener Eisenkern einen (in guter Näherung) idealen magnetischen Leiter dar, auf dessen Schenkeln Spulen angebracht sind.



**Zielfrage:** Einleitung des Lernprozesses durch Betrachtungen zum Energietransport von der Primärseite des Transformators zu dessen Sekundärseite.

**Hypothesel:** Die Energie wird im Eisenkern transportiert.

**Analyse 1:** Für das Magnetfeld bzw. für die magnetische Feldstärke im Eisenkern gilt:

$$H_{\text{Eisenkern}} = \frac{B_{\text{Eisenkern}}}{\mu_0 \cdot \mu_r}$$

Für eine endliche Flußdichte strebt die magnetische Feldstärke für einen unendlich guten magnetischen Leiter gegen Null.

**Ergebnis 1:** Die Energie kann nicht im Eisenkern transportiert werden, da mit  $\vec{H} = 0$  auch der Energietransport (d.h. der Poyntingvektor) zu Null wird ( $\vec{S} = 0$ ).

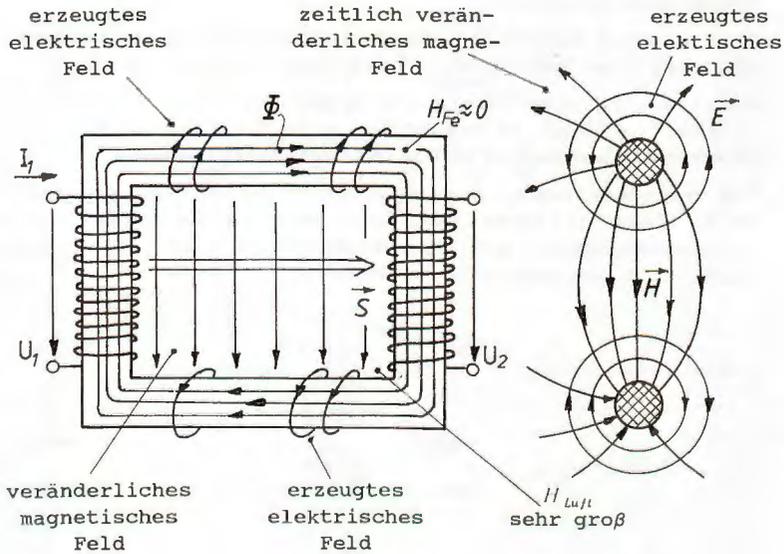
Hypothese 2: Die Energie wird durch das Streufeld transportiert. Der Streufluß verläuft gegenüber dem Nutzfluß, der im Eisen verläuft, außerhalb des Eisens.

Analyse 2: Für das Streufeld mit  $\mu_r = 1$  folgt, daß die Energie

$$W_{\text{Streufeld}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot V$$

bzw. die zugehörige Energiedichte sehr groß wird.

Ergebnis 2: Die Energie wird beim Transformator senkrecht zum Streufeld von der Primärspule ausgehend zur Sekundärseite transportiert.



Zielfrage: Wie ist diese Erkenntnis mit dem Energietransport in Einklang zu bringen, der durch den Poyntingvektor  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$  beschrieben wird?

"Wo" ist hier das elektrische Feld, das durch die Feldstärke  $\vec{E}$  beschrieben wird?

Folgerung:

Da der Poyntingvektor  $\vec{S}$  senkrecht auf dem Kreuzprodukt  $\vec{E} \times \vec{H}$  steht und das im Teil 1 dieser UE eingeführte "Rechtssystem" verbindlichen Charakter hat, folgt zwangsläufig das im obigen Bild eingetragene ringförmige elektrische Feld um die (idealen) magnetischen Verbindungen der Schenkel.

Lernziele:

1. Der Poyntingvektor  $\vec{S}$  beschreibt sowohl den Energietransport im elektrischen als auch im magnetischen Kreis, zu dem der Transformator gehört.
2. Ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld bewirkt ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld und umgekehrt.
3. Metalle sind elektrische und Eisenkerne sind magnetische Leiter, in denen im Grenzfall keine Energieumsetzung und dadurch keine energetischen Verluste erfolgen.
4. Der Energietransport im elektromagnetischen Feld ist sowohl beim elektrischen als auch beim magnetischen Kreis "systemgebunden"; d.h. das elektromagnetische Feld löst sich nicht vom betreffenden System.

## UE II/6 Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

## Teil 1 Schwingungen

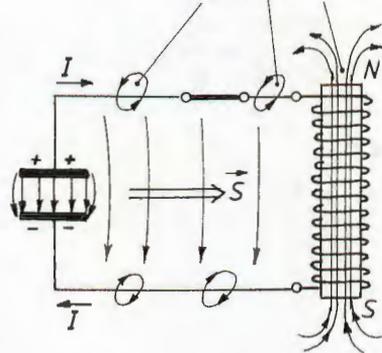
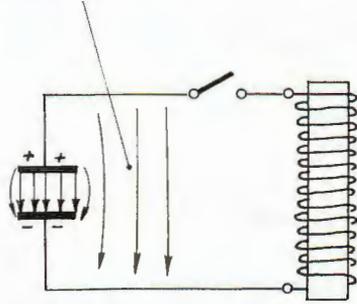
## Energiebetrachtungen zum System : Kondensator - Spule

a)

b)

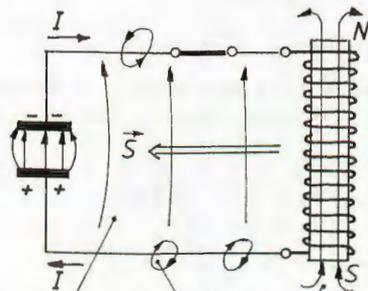
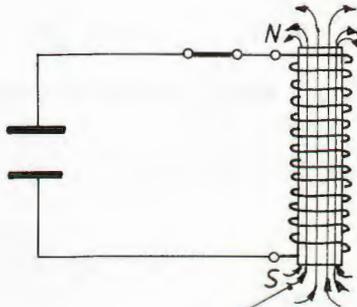
Elektrisches Feld

Magnetisches Feld



c)

d)



Magnet. Feld

Elektr. Feld

Magnet. Feld

Nach dem Energieerhaltungssatz gilt:

$$W_{\text{Elektr. Feld}} + W_{\text{Magn. Feld}} = \text{const.}$$

zu a)

$$W_{\text{Elektr. Feld}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \cdot V = W_{\text{max}}$$

$$W_{\text{Magn. Feld}} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot H^2 \cdot V = 0$$

zu b)

$$\Sigma W = \frac{1}{2} \cdot (\epsilon_0 \cdot E^2 + \mu_0 \cdot H^2) \cdot V = \text{const.}$$

zu c)

$$W_{\text{Magn. Feld}} = \frac{1}{2} \cdot \mu_0 \cdot H^2 \cdot V = W_{\text{max}}$$

zu d): wie zu b)

Ergänzung:

Herleitung der THOMSON'schen Beziehung durch Gleichsetzen der Blindwiderstände  $X_C$  und  $X_L$ :

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

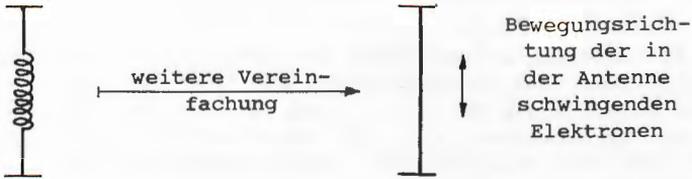
Lernziel:

Der Energietransport zwischen den passiven Bauelementen des elektrischen Schwingkreises Kondensator und Spule erfolgt im "systemgebundenen" elektromagnetischen Feld. Das elektromagnetische Feld löst sich nicht vom System. Es handelt sich um einen Schwingungsvorgang.

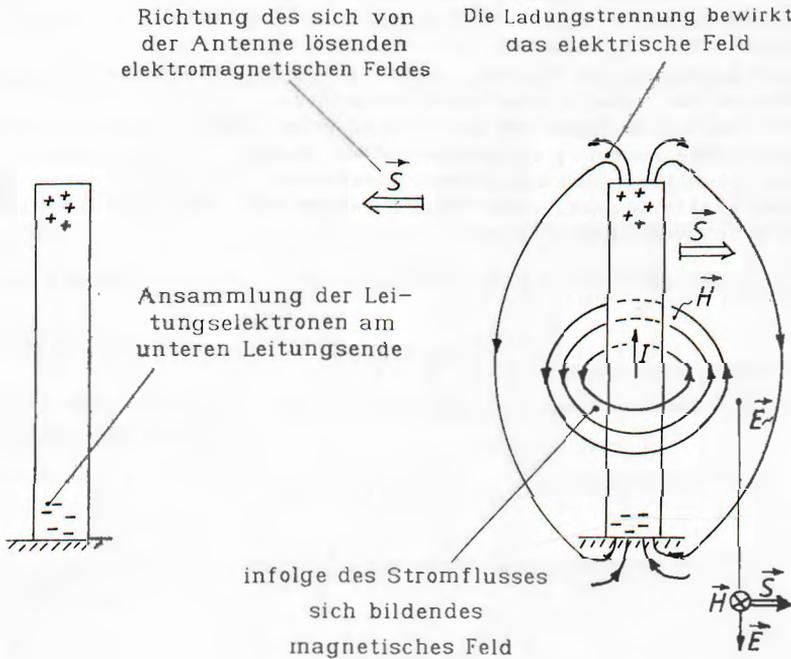
## Teil 2      Elektromagnetische Wellen

Gedankenexperiment:

Der oben dargestellte Schwingkreis wird in eine andere Form gebracht:



Vergrößerung der Darstellung des Antennenquerschnitts und Einbeziehung der Modellvorstellung liefern:



## Beschreibung des Phänomens

Das um die Sendeantenne herum entstehende elektromagnetische Feld löst sich von der Antenne, bevor infolge des nächsten Schwingungsvorgangs der Elektronen und der damit verbundenen wiederholten Energieeinspeisung in die Antenne abermals ein elektromagnetisches Feld erzeugt wird.

"Was" wird abgestrahlt?

Das elektromagnetische Feld mit seinem Energieinhalt löst sich vom System Antenne-Senderöhre und breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit wellenförmig durch den Raum aus. Wenn man in einer Näherung die Phasenbeziehung zwischen der elektrischen und der magnetischen Feldstärke beim Nahfeld vernachlässigt, kann man die Richtung des Energie transports mittels des Poynting-Vektors ebenso leicht bestimmen wie im "systemgebundenen" Feld beim Schwingkreis.

## Übung 1

Der Schwingungsvorgang der Elektronen in der Antenne sei sinusförmig.

Somit:  $Q(t) = Q_s \cdot \sin \omega t$ .

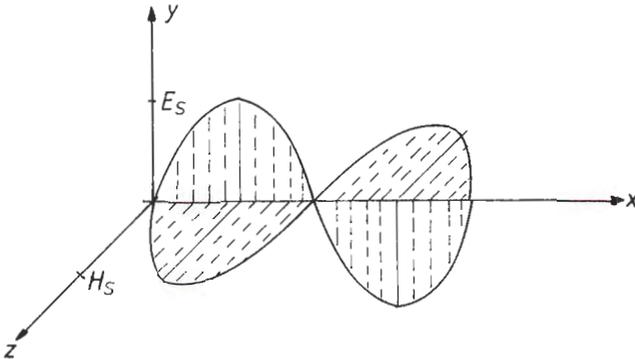
Die Änderung des mit der Ladung einhergehenden elektrischen Feldes ist dadurch ebenfalls sinusförmig:  $E(t) = E_s \sin \omega \cdot t$ .

Die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes bewirkt eine zeitliche Änderung des magnetischen Feldes:  $H(t) = H_s \cdot \sin \omega t$ .

Die räumlichen und zeitlichen Änderungen beider Wellenanteile des elektromagnetischen Feldes lauten für das Fernfeld sind die Feldvektoren in Phase:

$$E(t; x) = E_s \cdot \sin \omega \cdot \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

$$H(t; x) = H_s \cdot \sin \omega \cdot \left( t - \frac{x}{c} \right)$$



Die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle erfolgt in Richtung der x - Koordinate des kartesischen Koordinatensystems.

**Aufgabe:** Es ist die mittlere Gesamtenergie des elektromagnetischen Feldes zu formulieren.

**Lösung 1:** Der Momentanwert für den "elektrischen Anteil" lautet:

$$\frac{W'_{EL.Feld}}{V} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_o \cdot E^2 = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_o \cdot E_S^2 \cdot \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

Der Momentanwert des "magnetische Anteils" betrifft:

$$\frac{W'_{Magn.Feld}}{V} = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot H^2 = \frac{1}{2} \cdot \mu_o \cdot H_S^2 \cdot \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

Die Gesamtenergie des elektromagnetischen Feldes wird beschrieben durch:

$$W'_{Feld;ges} = \frac{1}{2} \cdot \left( \epsilon_o \cdot E_S^2 \cdot \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) + \mu_o \cdot H_S^2 \cdot \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \right)$$

Der räumliche und der zeitliche Mittelwert von  $\sin^2 \cdot \omega(t-x/c)$  ergibt den Zahlenwert 1/2.

Damit läßt sich unter Einbeziehung von  $H = B/\mu_0$ ,  $B = E/c$  und  $c^2 = 1/(\mu_0 \cdot \epsilon_0)$  das Ergebnis formulieren:

$$\overline{W}_{\text{Feld; ges}} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E_S^2 \cdot V$$

Übung 2: Man zeige, daß sich der Energietransport mit Lichtgeschwindigkeit in Richtung des Poyntingvektors (siehe obiges Bild) ausbreitet.

Lösung 2: Unter Verwendung der Wellengleichung für das elektrische und für das magnetische Feld und unter Einbeziehung der in der Übung 1 verwendeten Mittelwertbildung ergibt sich mit Beschränkung auf die Beträge der Feldvektoren der Ansatz:

$$S(x;t) = E(x;t) \cdot H(x;t)$$

Mit  $E(x;t) = E_S \cdot \sin \omega(t - x/c)$ ;  $H(x;t) = H_S \cdot \sin \omega(t - x/c)$  und  $c^2 = 1/(\mu_0 \cdot \epsilon_0)$  folgt die mittlere Leistungsdichte

$$\overline{S} = \overline{P} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \cdot c$$

Resultat: Die der Sendeantenne aus der Senderöhre zu geführte Leistung wird von der Antenne im Idealfall (keine Verluste) gänzlich in Form von elektromagnetischen Wellen "abgestrahlt".

Lernziele:

1. Beschleunigte Ladungen strahlen Energie ab.
2. Elektromagnetische Felder müssen nicht systemgebunden bleiben, sie können sich vom System - z.B. einer Sendeantenne - lösen.
3. Das vom System gelöste elektromagnetische Feld breitet sich wellenartig mit Lichtgeschwindigkeit aus.

## UE II/7 Hüllenphysik

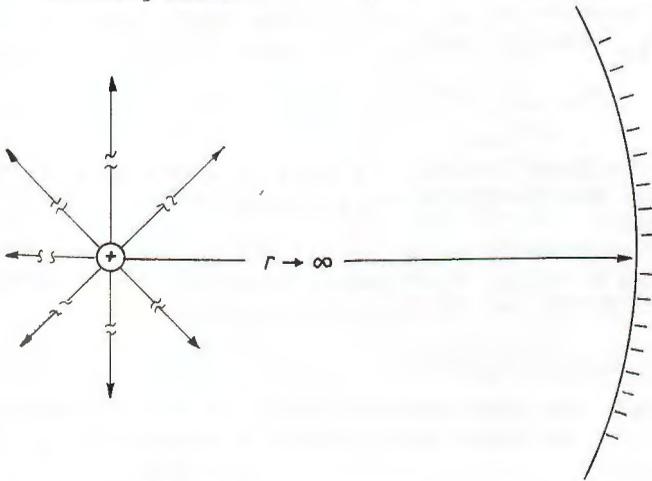
Einleitung: In dieser UE werden einige Phänomene der Atomphysik angesprochen. Hierzu gehören die Wasserstoffatombildung und die Ionenbindung.

## Teil 1 Die Wasserstoffatombildung

Vorbemerkung: EBINGHAUS und RÜCKL haben hierzu eine Abhandlung /200/ verfaßt, die sich um eine Genese der Atommodelle mit dem Feldenergiekonzept bemüht. In diesem Teil beschränke ich mich auf die Beschreibung der Wasserstoffatombildung.

## (A) Erklärung mit dem Feldenergiekonzept

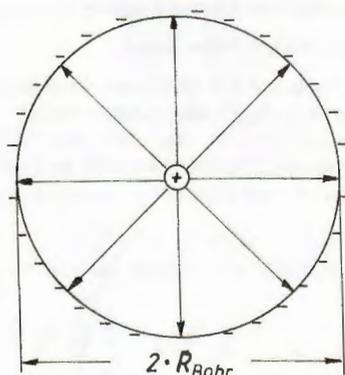
Hiernach wird die Energiefreisetzung zwischen einem Proton und einem freien Elektron entwickelt. Ein Wasserstoffatom im ionisierten Zustand läßt sich so darstellen, daß von dem Proton ein elektrisches Feld ausgeht, dessen Feldlinien bei der weit entfernten, auf einer Kugelschale gleichmäßig verteilten, Elektronenladung endet.



In der UE II/2 - Seite 87 bis Seite 89 - wurde die Energieformel eines radialen elektrischen Feldes einer mit der Ladung  $Q$  geladenen Kugel mit dem Radius  $R$  hergeleitet.

$$W_{\text{Feld}} = \frac{Q^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R}$$

Nach dieser Formel kann eine elektrische Ladung niemals punktförmig sein, da bei verschwindendem Radius ( $R \rightarrow 0$ ) die Feldenergie unendlich groß würde. Aus einer punktförmigen Elektronenladung (im BOHR'schen Atommodell) ist eine gleichmäßig verteilte kugelförmige Oberflächenladung entstanden. Die Kugeloberfläche ist im ionisierten Zustand des Wasserstoffatoms unendlich groß. Die Bildung des H-Atoms erfolgt durch Verringerung des Kugelradius auf den BOHR'schen Radius. Dabei wird die Feldenergie im Außenraum frei.



*feldfreier Raum*

Außerhalb der Kugeloberfläche, auf der die negative Ladung des Elektrons gleichmäßig verteilt ist, befindet sich der feldfreie Raum.

Mit der Feldenergieformel zum radialen elektrischen Feld läßt sich nun die Energiefreisetzung aufgrund der Feldreduktion berechnen.

Mit dem Bohr'schen Radius von  $R_{Bohr} = 0,53 \cdot 10^{-10} m$  der Elementarladung  $e$  und der elektrischen Feldkonstanten  $\epsilon_0$  berechnet sich der Betrag der freigesetzten Feldenergie zu:

$$W_{Elektr. Feld} = 13,6 eV$$

Ergebnis: Der Energiebetrag von 13,6 eV wird als Photon vom gebildeten Wasserstoffatom abgestrahlt.

Lernziele:

1. Bindungsenergie ist freigesetzte Feldenergie.
2. Die freigesetzte Feldenergie wird als Photon vom System - hier vom Wasserstoffatom - abgestrahlt.

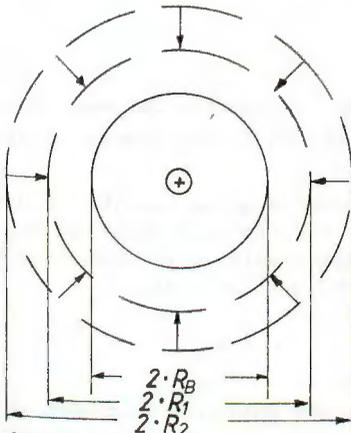
(B) Linienspektrum; Erklärung der Balmerreihe mit dem Feldenergiekonzept

Berechnung der Frequenzen und der Energien zu den vorgegebenen Wellenlängen der Balmerreihe liefern folgende Zahlenergebnisse:

$\lambda_1$ in nm	$f$ in $10^{14}$ Hz	$W$ in $10^{-19}$ J (eV)
656	4,57	3,03 (1,89)
486	6,17	4,09 (2,55)
434	6,91	4,58 (2,86)
410	7,32	4,85 (3,02)

Erklärung der Spektren:

Betrachtet wird die bildliche Darstellung des Wasserstoffatoms im Grundzustand sowie im ersten und zweiten angeregten Zustand. Die eingetragene Pfeilrichtung längs der eingetragenen Feldlinien im räumlichen Radialfeld deutet an, daß das Atom aus dem zweiten in den ersten angeregten Zustand übergeht.



Bei diesem Prozess wird infolge der Feldreduzierung Energie freigesetzt und als elektromagnetische Welle vom Atom abgestrahlt. Die Wellenlänge des abgestrahlten Photons entspricht der  $\lambda_1$  - Linie aus dem Bereich des roten Spektrums.

Berechnung der Atomdurchmesser für den zweiten und für den ersten angeregten Zustand des Wasserstoffatoms nach der Formel für die Feldenergie.

Erfolgt die Bildung des Wasserstoffatoms aus dem ionisierten Zustand in den zweiten angeregten Zustand, so wird die Bindungsenergie von 1,51 eV freigesetzt; bei der Bildung in den ersten angeregten Zustand sind es 3,4 eV.

Mit diesen, dem Energietermschema des Wasserstoffatoms entnommenen, Zahlenwerten lassen sich die Radien für das Wasserstoffatom wie folgt ermitteln:

a) für den zweiten angeregten Zustand

$$R_3 = \frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta W_{\text{Feld}_1}} = \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{As})^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot 1,51 \text{eV}}$$

$$R_3 = 4,75 \cdot 10^{-10} \text{m}$$

b) für den ersten angeregten Zustand

$$R_2 = \frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \Delta W_{\text{Feld}_2}}$$

$$R_2 = 2,11 \cdot 10^{-10} \text{m}$$

Überprüfung der Wellenlänge der  $\lambda_1$  - Linie für den Übergang des Wasserstoffatoms aus dem zweiten in den ersten angeregten Zustand.

Beim Übergang des Wasserstoffatoms aus dem zweiten in den ersten angeregten Zustand wird infolge Feldreduktion der Energiebetrag von  $W = 1,89 \text{eV}$  abgestrahlt. Die zugehörige Wellenlänge bestimmt sich nach  $W = h \cdot f = h \cdot c / \lambda_1$  zu:

$$\lambda_1 = 658,2 \text{nm}$$

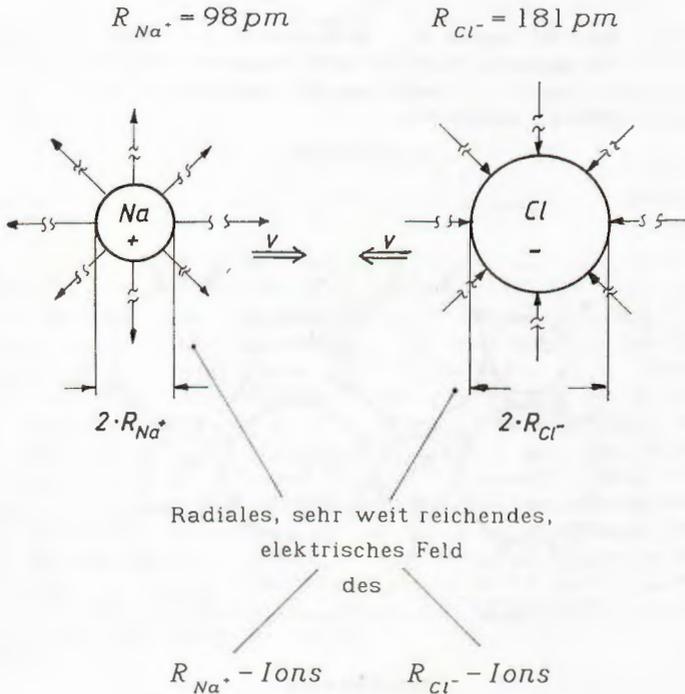
Resultat: Der Vergleich mit dem Zahlenwert in der obigen Tabelle zeigt eine sehr gute Übereinstimmung.

## Teil 2 Ionenbindung

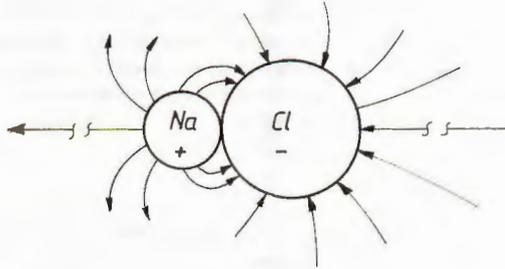
Vorbemerkungen: In /193/ habe ich einen Ansatz vorgeschlagen, wie ein Teil des Unterrichts der naturwissenschaftlichen Fächer Chemie und Physik aus der Feldenergie heraus exemplarisch und zusammenhängend behandelt werden können. In diesem Artikel habe ich gezeigt, daß der bei weitem größte Anteil der Gitterenergie freigesetzte elektrische Feldenergie ist. Der geringere Anteil ist kinetische Energie der Teilchen, die als vernachlässigbar angesehen werden kann.

## Gedankenexperiment:

Freie  $Na^+$  - und  $Cl^-$  - Ionen in der Gasphase reagieren aufgrund ihrer Wechselwirkung und bilden ein Ionenpaar, wodurch die zunächst radialen elektrischen Felder beider Reaktionspartner extrem reduziert und verändert werden.



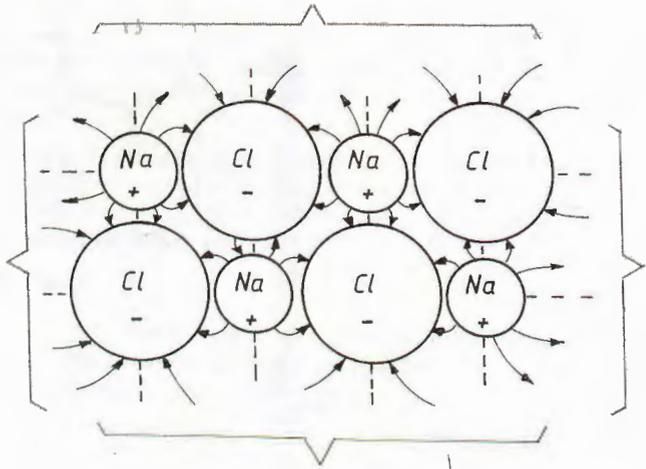
## Bildung eines Ionenpaares



Es hat also Feldenergiefreisetzung durch Feldreduktion stattgefunden.

Im ersten Schritt wurde der Sachverhalt an einem Ionenpaar erläutert. Im nächsten Schritt wird zunächst veranschaulicht, wie sich  $Na^+$ - und  $Cl^-$ -Ionen aus der Gasphase zu einem festen Körper (Kristall) verbinden.

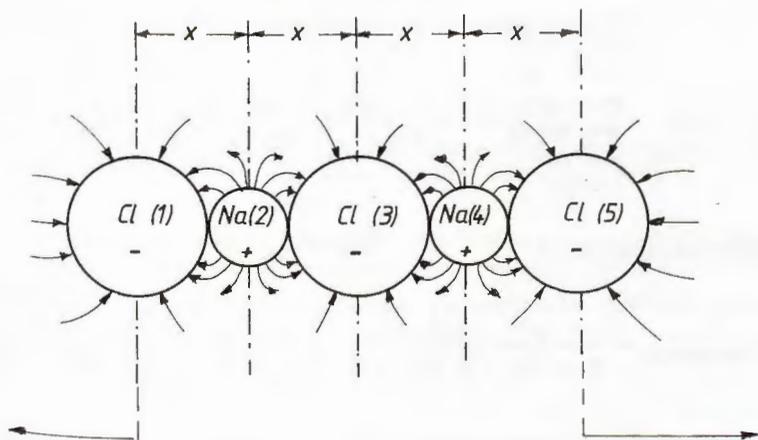
Fortsetzung



Fortsetzung

## Berechnung der Gitterenergie:

Nach BAUER /11/ ist die Gitterenergie diejenige Energie, die bei der Kristallisation von zunächst freien  $Na^+$  - und  $Cl^-$  - Ionen zum Festkörper frei wird. Zur Berechnung der Gitterenergie wird die "lineare Kette" aus dem Kristall verwendet und veranschaulicht.



Fortsetzung

Fortsetzung

Der Abstand der Ionen berechnet sich aus der Summe der Ionenradien zu  $x = 98 \text{ pm} + 181 \text{ pm} = 279 \text{ pm}$ . Mit den obigen Erläuterungen läßt sich nunmehr die Gitterenergie abschätzen. Methodisch wird so vorgegangen, daß die "lineare Kette" vom (zentralen) Chlor(1)-Ion aus entwickelt wird. Für die Berechnung der Gitterenergie wird die in der UE 5 zur SII hergeleitete Beziehung  $W = Q^2 / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot x)$  herangezogen. Nähern wir dem Chlor(1)-Ion das Natrium(2)-Ion, so wird wegen der unterschiedlichen Ladungen Energie freigesetzt. Beim zweiten "Entwicklungsschritt" muß insofern Energie aufgewendet werden, weil die beiden Chlorionen (1) und (3) gleiche Ladungen tragen. Die Wechselwirkung zwischen dem Natrium(2)-Ion und dem Chlor(3)-Ion bleibt unberücksichtigt, weil nach dem ersten Chlor(1)-Ion "entwickelt" wird. Da beide Ionen chemische einwertig sind, gilt:  $Q_1 = Q_2 = e$

Die Abschätzung liefert:

$$W_{\text{Gitterenergie}} \approx \left( \underbrace{\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot x}}_{\substack{\text{Energiefrei-} \\ \text{setzung} \\ \text{durch das} \\ \text{Cl-Ion(1)} \\ \text{und durch} \\ \text{das Na-} \\ \text{Ion(2)}}} - \underbrace{\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot x}}_{\substack{\text{Energiezufuhr} \\ \text{infolge Annä-} \\ \text{herung des} \\ \text{Cl-Ions(3) an} \\ \text{das Cl-Ion(1)}}} + \underbrace{\frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot 3 \cdot x}}_{\substack{\text{Energiefrei} \\ \text{-} \\ \text{setzung} \\ \text{durch das} \\ \text{Na-Ion(4)} \\ \text{bzgl. des} \\ \text{Cl-Ions(1)}}} \pm \dots \right)$$

Zwischenergebnis:

$$W_{\text{Gitterenergie}} = \frac{e^2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot 2,79 \cdot 10^{-10} \text{ m}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} \pm \dots \right)$$

Da bislang nur in eine Richtung vom Cl(1)-Ion die Energiefreisetzung bzw. Energiezuführung in der "linearen Kette" betrachtet worden ist, fehlt noch der andere Anteil in die andere Richtung längs derselben "linearen Kette". Deshalb ist der Faktor 2 einzubeziehen. Für eine unendlich lange "lineare Kette" (Idealisierung) unendlich vieler Ionen, folgt mit der Grenzwertbildung

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left( 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \dots - \frac{1}{2n} + \frac{1}{2n+1} \right) = \ln 2$$

die Berechnung der Bindungsenergie pro Ion in der "linearen Kette" zu

$$W_{\text{Gitterenergie}} = 11,5 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 7,2 \text{ eV} = 690 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

## Resultat

Die Gitterenergie WG wird mit 770 kJ/mol /79/ angegeben. Der oben theoretisch abgeschätzte Wert stimmt also zu 90% mit dem Literaturwert überein. Der nach der "linearen Kette" ermittelte Zahlenwert für die Gitterenergie muß gegenüber dem Literaturwert geringer ausfallen, da dieser sich auf eine dreidimensionale Struktur bezieht, während jener eine eindimensionale Struktur voraussetzt.

## Lernziele:

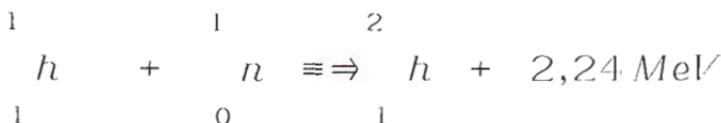
1. Bei der Ionenbindung handelt es sich um einen chemischen Prozess, der durch die Wechselwirkung der betreffenden Reaktionspartner zustande kommt. Die zugehörigen Felder erfahren eine Reduktion.
2. Bindungsenergie (Ionenpaare) und Gitterenergie (Festkörper) sind weitestgehend freigesetzte elektrische Feldenergie.
3. Die bei chemischen Prozessen freigesetzte Energie bewegt sich im ein - bis zweistelligen eV - Bereich.

Diese UE besteht aus drei Teilen, in denen einige der wesentlichen Phänomene besprochen werden, die im Teil 1 zur Kernfusion, im Teil 2 zur Kernspaltung und im Teil 3 zur Radioaktivität gehören.

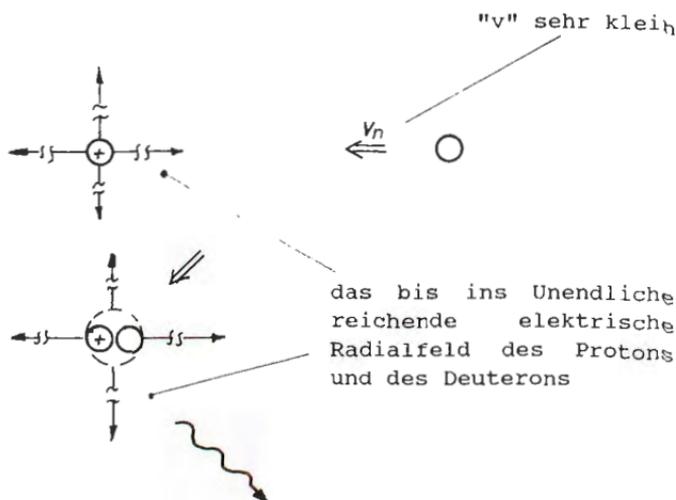
Teil 1 Fusions - (oder Vereinigungs -) Prozess

(A) Die Deuteron - Bildung

a) Schematische Darstellung des Vorganges



b) Bildliche Darstellung der Ausgangssituation und des Reaktionsergebnisses



Die kinetische Energie des Protons ist Null, da dessen Geschwindigkeit Null betragen soll. Die Bewegungsenergie des Neutrons sei vernachlässigbar, da seine Geschwindigkeit gering ist.

Problem "Woher" stammt die bei diesem Prozess freigesetzte Energie?

Analyse

Aus dem elektrischen Feld des Protons kann die Energie nicht stammen, da das Neutron kein elektrisches Feld hat und somit somit auf diese Weise nicht mit dem Proton wechselwirken kann. Das Magnetfeld des Protons infolge dessen Spin bleibe unberücksichtigt. Die gravitativen Anteile der Nukleonen fallen aufgrund deren Geringfügigkeit aus der Bilanz ebenfalls heraus. Die absolute Energiefreisetzung des elektrischen Radialfeldes des Protons ergäbe unter Verwendung der Feldenergieformel für das radiale elektrische Feld nur eine Energiefreisetzung von  $W=0,5025$  MeV. Das elektrische Feld kann sich nicht aufgelöst haben, sonst könnte nach der Deuteronbildung keine Atombildung (schwerer Wasserstoff) ablaufen.

Folgerung Keines der bekannten Felder kommt in Betracht!

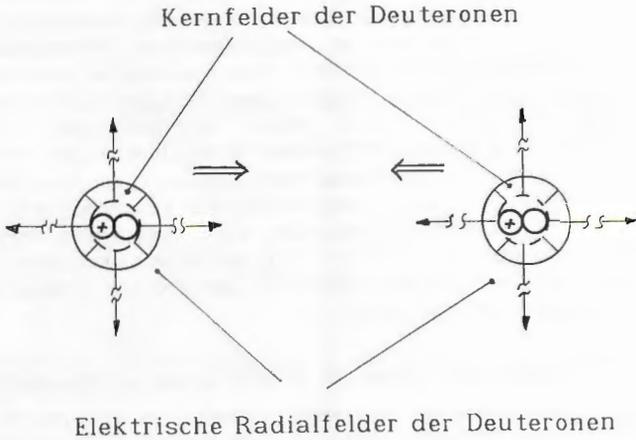
Postulat Die Energiefreisetzung stammt aus kurzreichweitigen Feldern, die die Nukleonen konzentrisch (YUKAWA-Näherung) umgeben. Über diese Nukleonen- bzw. Kern - Felder wechselwirken die Nuleonen miteinander, wobei infolge der Wechselwirkung die Kernfelder reduziert werden.

(B) Die Deuteron - Deuteron - Reaktion

a) Schematische Darstellung

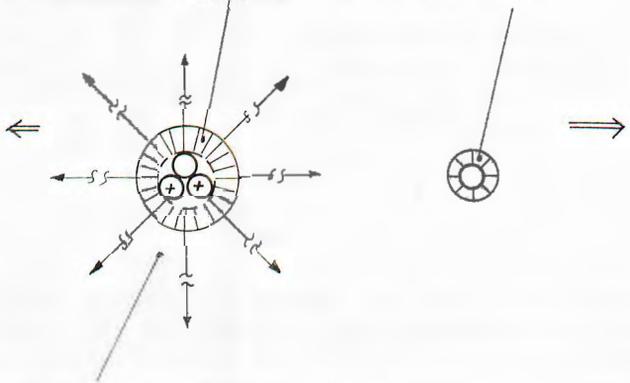


b) Bildliche Darstellung des Prozesses  
Vor dem Prozess



Nach dem Prozess

Kernfelder des Tritons und des Neutrons



## Aufgabe:

Welche Geschwindigkeit müssen die Deuteronen haben, um sich bis zur Überlappung ihrer Kernfelder nähern zu können?

## Lösung:

Der in der UE II/2 hergeleitete Wechselwirkungsterm zwischen zwei geladenen kugelförmigen Teilchen wird verwendet, um eine Abschätzung der Deuteronengeschwindigkeit vornehmen zu können. Weil ein Deuteronenradius nicht zur Verfügung steht, erfolgt eine konservative Abschätzung unter Verwendung des Protonenradius. Damit sich zwei Deuteronen bis zu ihrer Berührung nähern können, müssen sie eine hinreichend große kinetische Energie besitzen, um ihre elektrischen Felder genügend komprimieren zu können. Mit  $x = R_{\text{Proton}}$ , der Elementarladung  $e$  und der elektrischen Feldkonstanten  $\epsilon_0$  ergibt sich die von den Deuteronen aufzubringende Feldkomprimierungsenergie zu

$$W_{\text{Feld}} = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot x} = 2 \cdot W_{\text{kin; Deuteron}} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot m_D \cdot (v_D)^2$$

$$v_D = \sqrt{\frac{W_{\text{Feld}}}{m_D}}$$

$$W_{\text{Feld}} < \frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot R_p}$$

Diese Energie muß der kinetischen Energie der Deuteronen entsprechen, aus der sich ihre Geschwindigkeit bestimmen läßt. Unter Einbeziehung der atomaren Masseneinheit von  $m = 2,014 \text{ a.m.u.} = 2,014 \cdot 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ kg} / 111$  für das Deuteron läßt sich die Geschwindigkeit ermitteln.

## Ergebnis:

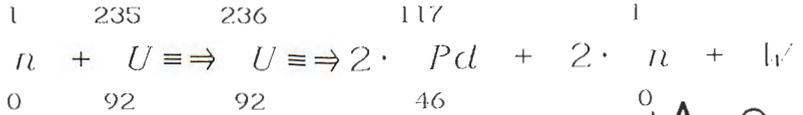
Beide Deuteronen müssen eine Geschwindigkeit von ca. 5 000 km/s haben, um ihre elektrischen Felder hinreichend komprimieren und sodann den Fusionsprozess einleiten zu können. Ein aus Deuteronen bestehendes Deuteronenplasma müßte eine Temperatur von ca. 100 Millionen Grad aufweisen, damit die Deuteronen fusionieren können.

## Teil 2 Fissions - (oder Spaltungs -) Prozess

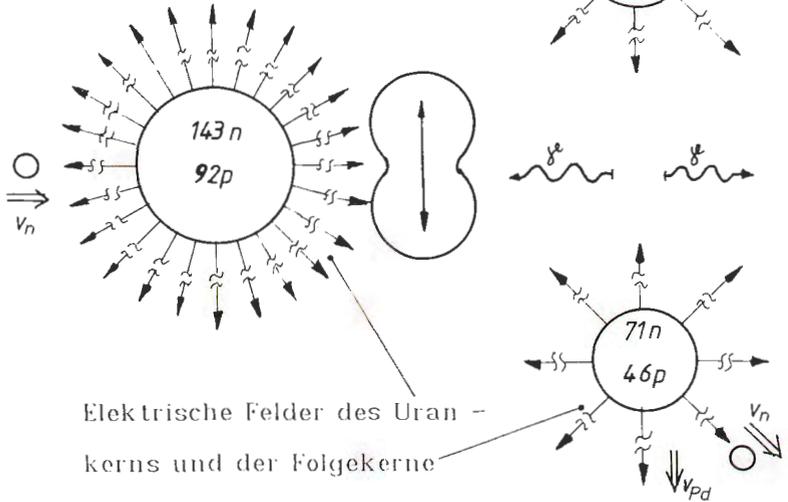
Gedankenexperiment:

Spaltung eines Uran-235-Kerns

a) Schematische Darstellung



b) Bildliche Darstellung



Bemerkungen:

a) Vor der Spaltung

$$v_n \text{ sehr klein} \implies W_{kin;n} = 0$$

$$U_{U-235} = 0 \implies W_{kin;U-235} = 0$$

$$U_{U-236} = 0 \implies W_{kin;U-236} = 0 \quad (W_{kin;Transition})$$

b) Nach der Spaltung

Behauptung: Die freigesetzte Energie stammt im wesentlichen aus dem elektrischen Feld.

Die freigesetzte Energie ergibt sich aus der Differenz der Feldenergien im elektrischen Radialfeld des Urankerns und in den elektrischen Radialfeldern der kugelförmigen Bruchstücke.

Es muß daher gelten:

$$(\Delta W')_{\text{Elektr. Feld}} = W_{\text{El. Feld}; U-235} - 2 \cdot W_{\text{El. Feld}; Pd-46}$$

$$(\Delta W)_{\text{El. Feld}} = \frac{e^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R_P} \cdot \left( \frac{92^2}{236^{\frac{1}{3}}} - 2 \cdot \frac{46^2}{117^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$(\Delta W)_{\text{El. Feld}} = 236 \text{ MeV}$$

Der berechnete Wert der freigesetzten Feldenergie des elektrischen Feldes liegt höher als der tatsächlich Wert von  $W=215$  MeV.

Wie läßt sich dieser Energieunterschied verstehen?

Erklärung:

Die obige Rechnung bezieht sich auf radiale elektrische Felder. Das elektrische Feld des im hantelförmigen Zustand befindlichen Urankerns ist ebensowenig radial wie die elektrischen Felder der Paladiumkerne kurz nach deren Entstehung. Darüberhinaus wurden die Kernfelder nicht berücksichtigt. Im Augenblick der Spaltung des Urankerns werden Kernkräfte z.T. von elektrischen Kräften kompensiert. Diese Effekte bewirken einen Energiebeitrag, um den der oben berechnete Energiebetrag zu vermindern ist.

## Lernziele:

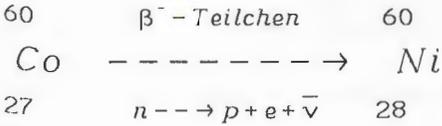
1. 80% der freigesetzten Energie bei der Kernspaltung werden in kinetische Energie der Bruchstücke umgewandelt. Diese Energie stammt im wesentlichen aus der elektrischen Feldenergie.
2. Die Energiefreisetzung bei der Kernspaltung und bei der Kernfusion ist um acht Zehnerpotenzen höher als bei chemischen Prozessen, weil die Energiedichten der wirksamen Felder entsprechend höher sind.

## Teil 3 Der Betazerfall

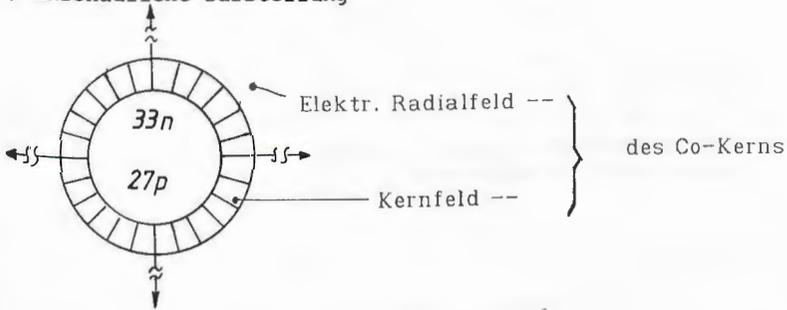
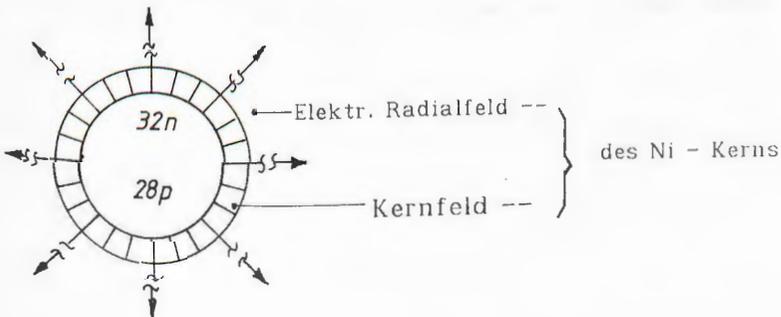
## Gedankenexperiment:

Zerfalls eines Kobalt-60-Kerns

## a) Schematische Darstellung



## b) Anschauliche Darstellung

Annahme:  $R_{\text{Co}} = R_{\text{Ni}}$ 

Situation: Das Kobaltisotop befindet sich vor dem Betazerfall in Ruhe; also:  $W'_{kin} = 0$

Zielfrage: "Woher" erhält das Beta-Teilchen seine Energie?

Lösungs-      Berechnung der Feldenergien in den elektrischen  
ansatz:      Radialfeldern des Kobalt und des Nickelkerns.

a) Die Feldenergie im radialen elektrischen Feld des Kobaltkerns berechnet sich:

$$W_{Co-Feld} = \frac{(27 \cdot e)^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R_p \cdot 60^{\frac{1}{3}}}$$

b) Die Feldenergie im radialen elektrischen Feld des Nickelkerns ergibt entsprechend:

$$W_{Ni-Feld} = \frac{(28 \cdot e)^2}{8 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R_p \cdot 60^{\frac{1}{3}}}$$

Resultat:

Der Nickelkern enthält ein Proton mehr als der Kobaltkern; die Feldenergie ist im radialen elektrischen Feld des Nickelkerns höher als diejenige im Feld des Kobaltkerns. Unter der Voraussetzung, daß der Nickel - und der Kobalt - Kern den gleichen Radius haben, ergibt sich, daß im radialen elektrischen Feld des Nickelkerns ein um  $W = 6,61 \text{ MeV}$  höherer Energiebetrag gespeichert ist als im elektrischen Feld des Kobaltkerns.

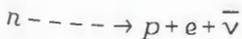
Dilemma:

Für den Betazerfall muß ein noch unbekannter Prozess verantwortlich sein, der außer der Energie für das Betateilchen und für das Antineutrino eben diesen zusätzlich hohen Energiebetrag zur Verfügung stellt. Kinetische Energien spielen keine Rolle, gravitative Felder im mikroskopischen Bereich auch nicht. Aufgrund der Konstanz der Nukleonenzahl bleiben auch die Kernfelder unberücksichtigt. Der Betazerfall bleibt (zunächst) auf dieser Stufe ein unerklärtes physikalisches Phänomen.

Einführung von Quarks und Gluonenfeldern

Protonen und Neutronen unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung auf der bislang untersten Stufe im Mikrokosmos durch verschiedene Quarks zwischen denen sich innerhalb der Nukleonen subnukleare Felder, die sog. Gluonenfelder befinden.

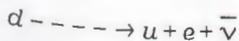
Der oben beschriebene Umwandlungsprozess



läßt sich nur auf dieser subnuklearen Ebene erklären. Bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton geht eines der zwei "Downquark" (d) innerhalb des Neutrons in ein weiteres "Upquark" (u) über. Die Nukleonen unterscheiden sich nur in der Anzahl dieser zwei verschiedenen Quarks, wobei die Gesamtzahl der Quarks konstant bleibt.

Damit läßt sich der Betazerfall wie folgt beschreiben:

a) Symbolische Beschreibung

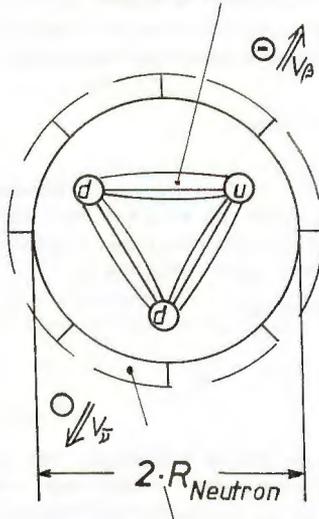


## b) Veranschaulichung des Sachverhalts

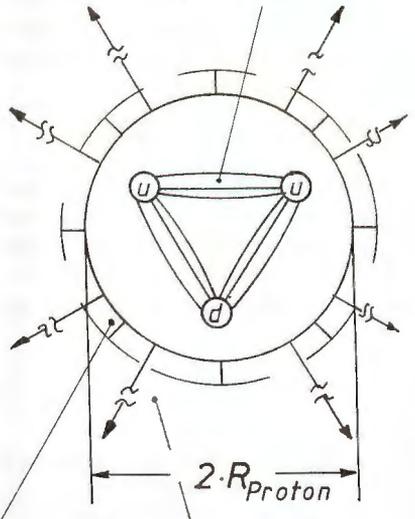
## Neutron

## Proton

Feldlinienbilder der innernuklearen Gluonenfelder  
des Neutrons



des Protons



Feldlinienbilder der kurz reichweitigen und konzentrischen Kernfelder des Neutrons und des Protons

Feldlinienbild des sehr weitreichenden elektrischen Radialfeldes des Protons

## Resultat:

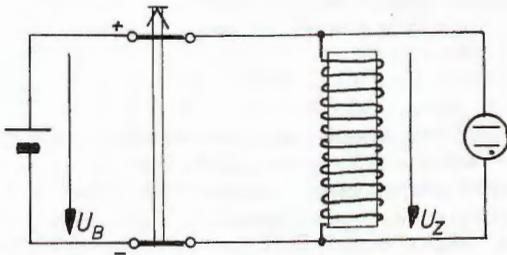
Die oben beschriebene zusätzliche Energie, sowie die Energie des Betateilchens muß durch diesen phänomenologisch beschriebenen Umwandlungsprozess bereitgestellt werden. Die tieferen Ursachen für diesen Prozess können (noch) nicht erläutert werden. So bleiben die Umwandlungsprozesse zwischen den Quarks und die Gluonenfeldänderungen ihrerseits (vorläufig) unerklärte Phänomene.

### 3.3 Ergänzungen

Eine mögliche Gegenüberstellung des Feldenergiebegriffs bzgl. anderer Erklärungsmöglichkeiten bei der Deutung, Erklärung oder Bewertung physikalischer Sachverhalte gehört nicht zu den Bestandteilen dieser Schrift. An einem zweiteiligen Beispiel soll exemplarisch der Vorzug und die Sinnhaftigkeit des Feldenergiebegriffs gegenüber herkömmlichen Erklärungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Beispiel: Selbstinduktionsvorgang bei einer Spule

Schaltungsbild



$$U_B = 12V$$

$$U_Z = 85V$$

Beobachtung: Beim Ausschalten des Stromkreises durch den zweipoligen Schalter leuchtet die Lampe kurzzeitig auf.

Folgerung: Die Zündspannung muß mindestens 85 V betragen haben.

Fragen: I) Wie kommt diese kurzzeitige hohe Spannung zustande  
II) Woher stammt die in der Lampe umgewandelte Energie?

Erklärungsmöglichkeiten:

zu Frage I):

(1) Mit dem Feldenergiekonzept

Durch den extrem schnellen Abbau des Magnetfeldes wird die Feldenergie in einer sehr kurzen Zeiteinheit frei, was eine sehr hohe Leistungsdichte beinhaltet. Dieser Sachverhalt hat zur Folge, daß die Elektronen im Spulendraht zum einen Leiterende hin verschoben werden. Diese an den Leiterenden vorherrschende Ladungsdifferenz bewirkt die hohe Zündspannung.

(2) Erklärungsvariante

Nach dem Ausschalten bewegen sich die Elektronen im Draht aufgrund ihrer Trägheit weiter zum einen Leiterende hin. Die hierdurch erfolgte Ladungstrennung bewirkt - wie in (1) - die Zündspannung.

Analyse:

Wenn die Trägheit der Elektronen die Ursache wäre, so müßte der daraus postulierte Effekt grundsätzlich zu einer meßbaren Spannung an den Klemmen eines zweipoligen Schalters führen, die mit einem statischen Spannungsmesser nachweisbar wäre. Der gleiche Effekt müßte auch eintreten, wenn der zur Spule zusammengewickelte Draht zu einem geradlinigen Draht auseinandergezogen würde.

Ergebnis:

Das "langgestreckte" Magnetfeld, das den geradlinigen Leiter beim Stromfluß ringförmig umgibt, wird auf einen kleinen Raum verdichtet, wenn der geradlinige Draht zu einer Spule zusammengewickelt wird. Die Energiedichte des Feldes ist deshalb höher.

Mit (1) und (2) folgt, daß die Erklärung des Vorgangs mit dem Feldenergiebegriff in sich schlüssig ist.

Zur Frage II):

(1) Erklärungsvariante

Die Energie, die in der Lampe in Lichtenergie umgewandelt wird, entspricht der kinetischen Energie der aufgrund ihrer Trägheit weiterfließenden Leitungselektronen.

## Analyse:

Berechnung der kinetischen Energie der Leitungselektronen:

$$W_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot n_e \cdot v_e^2$$

$m_e$  - Masse des Leitungselektrons

$n_e$  - Anzahl der Leitungselektronen

$v_e$  - Driftgeschwindigkeit der Leitungselektronen

Nimmt man eine Spule, wie sie in jeder Physiksammlung vorkommt, mit einem durchschnittlichen Windungsumfang von 22cm und mit einer Windungszahl von 23000, so erhält man eine Drahtlänge von  $l = 506\,000\text{ cm}$ . Mit einem Wicklungsquerschnitt von  $0,00785\text{ mm}^2$  erhält man das zugehörige Kupfervolumen von ca.  $V = 40\text{ cm}^3$ . Mit einer Ladungsträgerdichte in Kupfer von  $1022\text{ Elektronen/cm}^3$  und einer Driftgeschwindigkeit von  $3 \times \text{cm/s}$  erhält man zunächst die Anzahl der freien Elektronen im Kupfervolumen zu  $n_e = 4 \cdot 10^{23}$  Elektronen

Setzt man diese Werte in die obige Formel zur kinetischen Energie ein, so berechnet sich die gesamte kinetische Energie der Elektronen zu:

$$W_{kin} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ Nm} = 1,6 \text{ nJ}$$

## Ergebnis:

Die kinetische Energie der Elektronen ist um mehrere Zehnerpotenzen kleiner als die in der Lampe umgesetzte Energie.

## Resultat:

Dieses zweiteilige, inhaltlich zusammenhängende Beispiel zeigt, daß die Feldenergie den sinnvolleren Erklärungs begriff abgibt.

### 3.4 Zusammenfassung

Das in seinen wesentlichen Inhalten vorgestellte Feldenergiekonzept ist ein in sich geschlossenes Konzept, das von der Erklärung magnetischer Erscheinungen bis zum Verständnis subnuklearer Phänomene reicht. Kontinuität im Denken war Prinzip, sämtliche Erscheinungen wurden auf das Feld reduziert. In der Einleitung dieser Schrift wurde darauf hingewiesen, daß meine Forschungsarbeit an den innerphysikalischen Entwicklungsprozess ankoppeln soll. Daß eine derartige Möglichkeit besteht, soll das pragmatisch angelegte Feldenergiekonzept verdeutlichen. Der Zyklus (siehe Seite 17, Bild 1: Blöcke V, VI und VII) - der Kern meiner fachdidaktischen Arbeit - wird durch die empirischen Untersuchungen geschlossen. Diese Untersuchungen werden im folgende Kapitel beschrieben.