

PROJEKT TEWISE

Spannung

Peter Willitsch
BG / BRG Mössingerstraße 25, 9020 Klagenfurt, Austria

Copyright © 2002-2010 by Project "TEWISE"
for the project -team:
holub@pi-klu.ac.at
All rights reserved. Privacy Statement.

Klagenfurt, 2003

Translation © 2004, 2005

This project has been funded with support from the European Commission.
This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

INHALTSVERZEICHNIS

1	ABSICHT DIESER ARBEIT	4
2	UNBEFRIEDIGENDE EINFÜHRUNGEN.....	5
2.1	Beispiele aus Unterstufenbüchern	5
2.2	Kritik.....	8
2.2.1	Spannung und Ladungsunterschied.....	8
2.2.2	Die Spannung als Antrieb?	9
2.2.3	Spannung und Druckunterschied.....	9
2.2.4	Abschließende Kritik	10
3	UNTERRICHTSEINHEITEN VOR DER SPANNUNG.....	11
3.1	Elektrische Kräfte (Schülerexperimente).....	11
3.2	Elektrische Ladung.....	11
3.3	Das Elektroskop (Schülerexperimente).....	11
3.4	Neutralisation (Schülerexperimente).....	12
3.5	Influenz (Schülerexperimente)	12
3.6	Welche Ladungen sind im Metall beweglich? (Glühelektrischer Effekt; Elektronen, Teil 1).....	12
3.7	Spitzenwirkung (Schülerexperimente).....	13
3.8	Faraday-Käfig (Schülerexperimente)	14
3.9	Bandgenerator	14
3.10	Der Stromkreis (teilw. Schülerexperimente).....	15
3.11	Wirkungen des elektrischen Stromes (Schülerexp.).....	15
3.12	Ladung und Stromstärke; Einheiten.....	15
3.13	Messung von Stromstärken (Schülerexperimente)	15
3.14	Elektronen, Teil 2	15
3.15	Aufbau der Materie; Atome, Moleküle, Dipole, Leiter, Nichtleiter	16

3.16	Galvanische Elemente (teilw. Schülerexperimente).....	16
3.17	Elektrostatische Motoren (Schülerexperimente)	17
3.18	Aufarbeitung von offenen Fragen.....	18
4	DIE ELEKTRISCHE SPANNUNG (TEXT FÜR SCHÜLER)	19
4.1	TEIL 1: DIE GRAVITATIONSSPANNUNG.....	19
4.1.1	Nützliche Berge.....	19
4.1.2	Beispiel einer energietechnischen Nutzung	19
4.1.3	Unser Ziel.....	20
4.1.4	Ergiebigkeit von Gebieten beim Gold suchen	21
4.1.5	Zurück ins Gebirge.....	23
4.1.6	Transportarbeit W_{AE} - potentielle Energie W_{pot}	26
4.1.7	Die energetische Ergiebigkeit von Bergwegen.....	27
4.1.8	W_{AE}/m und die Wegform; die Gravitationsspannung	28
4.1.9	Höhendifferenz statt W_{AE}/m ?	29
4.1.10	Die Rolle der Berge.....	31
4.1.11	Aufgaben.....	31
4.2	TEIL 2: DIE ELEKTRISCHE SPANNUNG	33
4.2.1	Elektrische Felder	33
4.2.2	Beispiele für elektrische Felder	33
4.2.3	Eine Batterie ohne bzw. mit Leiter.....	35
4.2.4	Die Rolle der Ladung	35
4.2.5	Die energetische Ergiebigkeit (der energetische Wert) von Feldwegen.....	38
4.2.6	Aufgaben.....	39
4.3	Entstehung und Erprobung des Textes.....	43
4.4	Einige wichtige Anwendungen	43
4.4.1	Die elektrische Leistung $P = U \cdot I$	43
4.4.2	Die Ungefährlichkeit des Bandgenerators.....	44
4.4.3	Experiment: Mehr Arbeit - mehr Spannung.....	44

1 ABSICHT DIESER ARBEIT

Der vorliegende Text verfolgt zwei Absichten.

Erstens, den ziemlich einheitlich unbefriedigenden bis fragwürdigen Einführungen der elektrischen Spannung, wie sie in fast allen österreichischen Unterstufenbüchern zu finden sind, zu widersprechen und gegen ihre Verbreitung Widerstand zu leisten. Die in Kapitel 2 gegebenen Zitate und die anschließende kurze Kritik sollen die Problematik der unzureichenden Spannungseinführungen stärker ins Bewusstsein rücken. In diesem Zusammenhang wird auch ein Weg skizziert, die Spannung korrekt als Beurteilungsgröße für die ‚Stärke‘ einer Quelle einzuführen.

Das zweite Motiv war die Vorlage eines Textes (Kapitel 4) für SchülerInnen zum selbständigen Durcharbeiten. Dieser Text soll zu einem Spannungsbegriff führen, der inhaltlich korrekt und verstehbar ist, der Schlussfolgerungen ermöglicht und auch rechenfähig ist. Die Idee des Suchens von Beurteilungsgrößen für einen zu beurteilenden Sachverhalt soll sichtbar werden. Die Spannung wird als Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit von Feldwegen aufgefasst. Die Benutzung des Begriffes ‚negative Arbeit‘ und damit die Unterscheidung zwischen negativer und positiver Arbeit wurde nicht gewagt.

In Kapitel 3 werden Themen genannt, die - knapp oder ausführlicher - im Unterricht vor der Spannung behandelt wurden. Einige Themen wurden durch wichtig erscheinende Bemerkungen, Fragen und Hinweise auf Experimente ergänzt.

2 UNBEFRIEDIGENDE EINFÜHRUNGEN

2.1 Beispiele aus Unterstufenbüchern

2.1.1 Albrecht u.a.: Erlebnis Physik 3; 2002 E. DORNER; ISBN 3-7055-0404-5

S. 60:

Wenn in einem Stromkreis ein Strom fließen soll, müssen Elektronen ständig angetrieben werden. Das geschieht durch eine Spannungsquelle. Sie „drückt“ am Minuspol Elektronen in den Stromkreis hinein und holt sie gleichzeitig am Pluspol wieder heraus.

Damit eine Spannungsquelle am Minuspol einen Elektronenüberschuss und am Pluspol einen Elektronenmangel hat, müssen die vorhandenen Ladungen getrennt werden. Dabei wird in der Spannungsquelle Trennarbeit verrichtet. Die getrennten Ladungen können dann selbst wieder Arbeit verrichten, sie haben elektrische Energie. Den Zustand der getrennten Ladungen beschreibt man mit dem Begriff der elektrischen Spannung (U).

Die Voltzahl einer Spannungsquelle gibt an, wie groß der Antrieb der Elektronen ist. Der Antrieb ist größer bei Spannungsquellen mit großer Voltzahl, er ist kleiner bei Spannungsquellen mit kleiner Voltzahl. Je größer die Voltzahl ist, umso mehr Energie kann zu den Elektrogeräten transportiert werden.

2.1.2 Bader – Walz; BLICKPUNKT PHYSIK 3; 1998 E. DORNER; ISBN 3-7055-0192-5;

S. 50:

Durch Hintereinanderschalten zweier Batterien wurde der elektrische Antrieb der Elektronen und damit die Stromstärke verdoppelt. Statt „elektrischer Antrieb“ sagt man kurz Spannung.

2.1.3 Becker, Ralf u.a.: Physik heute 3; 2002 VERITAS; ISBN 3-7058-5020-2;

S. 52:

Elektronenmangel und Elektronenüberschuss haben ein ähnliches Bestreben, einander auszugleichen, so wie das Wasser des Stausees zu Tal fließen möchte. Man sagt: Es herrscht eine elektrische Spannung. Je größer der Elektronenüberschuss am Minuspol und je größer der Elektronenmangel am Pluspol, desto größer ist auch die elektrische Spannung.

2.1.4 Duenbostl, Theodor u.a.: PHYSIK erleben 3; 1999 öbv/hpt; ISBN 3-209-02243-7;

S. 31:

Kommen ungleich oder ungleich stark geladene Körper miteinander in Berührung, gleichen sie ihren Ladungszustand aus.

Den Ladungsunterschied nennt man elektrische Spannung.

2.1.5 Gollenz, Franz u.a.: Physik 3; 2002 öbv/hpt; ISBN 3-209-03493-1

S. 58:

Warum fließt durch einen Gartenschlauch Wasser, wenn du den Leitungshahn öffnest? Die Ursache dafür ist der Druck, unter dem das Wasser steht. Ähnlich ist es auch beim elektrischen Strom.

Der Unterschied in den elektrischen Ladungszuständen der beiden Pole einer Stromquelle bewirkt eine elektrische Spannung U (electric voltage). Diese ist die Ursache für das Fließen eines elektrischen Stromes in einem Stromkreis. Die Spannung ist das Maß für die Energie der Ladungsträger.

2.1.6 Haider, Nest, Petek: Du und die Physik 3; 1999 Ivo Haas;

S. 51:

Aufgrund der unterschiedlichen Elektronenmengen an den Polen besteht zwischen diesen eine elektrische Spannung.

S. 52:

Dieses sogenannte Voltmeter misst die Ladungsunterschiede und die sich daraus ergebende Spannung zwischen den Polen des Galvanischen Elementes.

2.1.7 Holl – Unterberger: Von der Physik 3; 1997 E. DORNER; ISBN 3-7055-0126-7;

S. 68:

In der Elektrotechnik bezeichnet man den Antrieb im Stromkreis als elektrische Spannung.

S. 70:

Der Antrieb im Stromkreis hat etwas mit der Voltzahl der Stromquelle zu tun. Der Antrieb ist größer bei Stromquellen mit großer Voltzahl, er ist kleiner bei Stromquellen mit kleiner Voltzahl. Die Stärke des Antriebs einer Stromquelle nennt man auch ihre elektrische Spannung (U). Je größer die Spannung einer Stromquelle

ist, um so mehr Energie kann von der Stromquelle zu einem Elektrogerät transportiert werden.

2.1.8 Kaufmann – Zöchling: PHYSIK VERSTEHEN 3; 2002 öbv/hpt; ISBN 3-209-03450-8

S. 45:

Ein Vergleich: Wenn in zwei Gefäßen Wasser verschieden hoch steht, besteht ein Druckunterschied. – Zwischen einem Körper mit Elektronenüberschuss und einem mit Elektronenmangel besteht eine elektrische Spannung.

Wasser fließt zwischen zwei verbundenen Gefäßen, solange ein Druckunterschied besteht. Elektrischer Strom fließt nur, solange ein elektrischer Ladungsunterschied besteht.

Zwischen zwei Körpern herrscht eine elektrische Spannung, wenn sie verschieden elektrisch geladen sind.

2.1.9 Lewisch, Ingrid u.a.: PHYSIK / CHEMIE in Alltag und Technik 2; 1993 Westermann; ISBN 3-7034-8812-3;

S. 53:

Zwischen zwei verschieden geladenen Körpern, also zwischen dem Minuspol und dem Pluspol einer Stromquelle, herrscht ein besonderer Zustand, den wir als elektrische Spannung bezeichnen.

Die Größe der Spannung zwischen zwei geladenen Körpern ist von der Größe des Ladungsunterschiedes abhängig.

2.1.10 Neufingerl, Franz: Querschnitt Physik 2; 2002 Westermann; ISBN 3-7034-8256-7;

S. 55:

Den Zustand zwischen den beiden unterschiedlich aufgeladenen Körpern bezeichnet man als elektrische Spannung.

S. 69:

Die Spannung in einer Stromquelle könnte man mit dem Druck, den eine Pumpe im Wasserkreislauf erzeugt, vergleichen.

2.1.11 Pail – Schmut – Wahlmüller: Physik 3; E. DORNER; ISBN 3-7055-0060-0;

S. 24:

Wir können die elektrische Spannung mit dem Druckunterschied zwischen zwei Gefäßen vergleichen, die unterschiedlich hoch mit Wasser gefüllt sind. Besteht nun zwischen zwei Körpern ein Unterschied in den Ladungszuständen, sagt man: Zwischen den beiden Körpern herrscht eine Elektrische Spannung. Je größer der Ladungsunterschied, umso größer ist auch die Spannung.

Die Spannung ist die Ursache für den Stromfluss.

2.2 Kritik

2.2.1 Spannung und Ladungsunterschied

Natürlich erzeugen Ladungen bzw. Ladungsunterschiede elektrische Felder - und diese werden dann mit der Spannung charakterisiert.

Aber zu sagen, der Ladungsunterschied sei die elektrische Spannung (Buchbeispiel 2.1.4), ist nicht in Ordnung. Man beachte nur den Übergang von einer einzelnen Batterie zur Parallelschaltung aus zwei solchen Batterien (Abb. 2.1): Der Ladungsunterschied verdoppelt sich, die Spannung bleibt jedoch gleich!

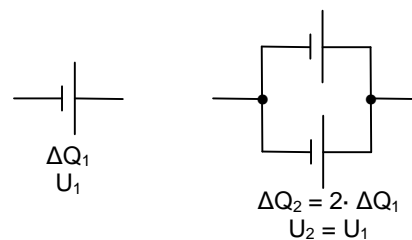


Abb. 2.1

Oder man nehme einen Plattenkondensator, dessen Spannung mit einem statischen Voltmeter gemessen wird. Die Platten werden geladen und dann von der Quelle getrennt. Verändert man nun den Plattenabstand, ändert sich die Spannung, die Ladungen und der Ladungsunterschied bleiben aber konstant.

Die Behauptung, je größer der Elektronenüberschuss (bzw. der Elektronenmangel), desto größer die Spannung (Buchbeispiele 2.1.3 und 2.1.9) ist genau so irreführend wie die Formulierung, das Voltmeter würde die Ladungsunterschiede messen (Buchbeispiel 2.1.6).

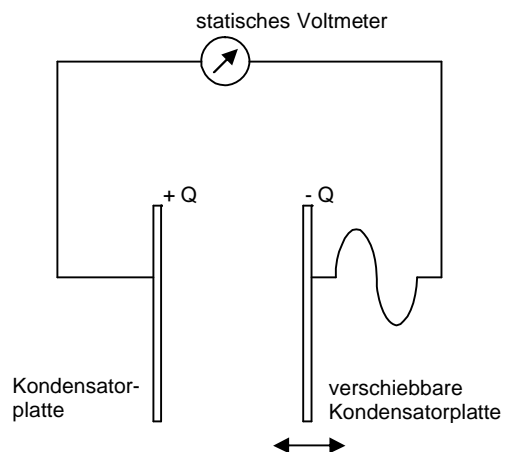


Abb. 2.2

Und schließlich widerspricht das Festmachen der Spannung an Ladungen bzw. am Ladungsunterschied der Tatsache, dass es im elektrischen Feld ohne Anwesenheit von Ladungen eine Spannung zwischen Feldpunkten geben kann.

2.2.2 Die Spannung als Antrieb?

Dass die Spannungsquelle Elektronen im Kreis treibt, sehen SchülerInnen ein. Was treibt ein Elektron? Eine Kraft, natürlich. Wenn nun Autoren (Buchbeispiele 2.1.1, 2.1.2, 2.1.5 und 2.1.7) den Antrieb als Spannung auffassen, sollten sich die Lesenden wundern, wieso man statt Antrieb und statt Spannung nicht einfach Kraft sagt und wieso statt z. B. 4,5 V nicht soundsoviel N auf der Batterie steht.

Die Lernenden werden im Unklaren gelassen. Die Autoren verschweigen, dass sich die Kraft leider nicht zur Kennzeichnung dessen eignet, was man unscharf mit ‚Antrieb‘ oder ‚Stärke‘ der Batterie meint. Die treibende Kraft auf eine Ladung in einem Leiter hängt nämlich nicht nur von der Batterie ab, sondern auch von der Länge des Leiters. Mit Hilfe der Ionenwanderung, z. B., lässt sich das experimentell zeigen.

Was ist dann aber die Spannung, wenn sie nicht die Antriebskraft ist? Die Autoren hätten den Weg weitergehen müssen. Das Experiment zum Einfluss der Leiterlänge zeigt: Die Halbierung der Leiterlänge führt zur Verdoppelung der Antriebskraft auf die transportierte Ladung - wenn der Leiter homogen ist und überall gleichen Querschnitt hat. Man findet: $F \cdot l = \text{konstant}$, wobei F die Kraft auf die transportierte Ladung q ist und l die Leiterlänge.

$F \cdot l$ charakterisiert aber auch noch nicht die ‚Stärke‘ der Batterie, denn F und damit $F \cdot l$ hängen noch davon ab, wie groß die transportierte Ladungsportion q ist. Wieder kann man experimentell zeigen, dass (bei gleich bleibendem Leiter) $F \sim q$, also $F \cdot l \sim q$ und damit $F \cdot l / q$ konstant ist. Bei ein und derselben Batterie kann der Transportweg zwischen den Klemmen lang oder kurz, die betrachtete Ladung groß oder klein sein, die Kraft F stellt sich immer so ein, dass $F \cdot l / q$ konstant bleibt.

$F \cdot l / q$ wäre dann die gesuchte Größe, welche nur mehr von der Batterie abhängt und ihre ‚Stärke‘ charakterisiert. ($F \cdot l$ ist die an q verrichtete Transportarbeit.)

Ein großer Nachteil dieses skizzierten Zugangs zur elektrischen Spannung ist die Vermittlung des Eindrucks, als würden Spannungen nur Batterien und andere Quellen beurteilen und nur zwischen den Anschlüssen der Quellen herrschen.

2.2.3 Spannung und Druckunterschied

Die elektrische Spannung mit einem Druckunterschied bei strömenden Flüssigkeiten zu vergleichen (Buchbeispiele 2.1.8 und 2.1.11, eventuell 2.1.10 und 2.1.5) ist nützlich.

Auf Grund dieses Vergleiches weiß der Lernende aber noch lange nicht, was die elektrische Spannung ist.

2.2.4 Abschließende Kritik

Die Zitate aus den Schulbüchern zeigen falsche, irreführende und oft wenig aussagefähige Einführungen der elektrischen Spannung. Die Formulierungen sind eher verständnisfeindlich als erhellend. Sie sind weder rechenfähig noch lassen sie erkennen, was man mit der Größe Spannung anfangen kann.

Eine Wurzel für den Misserfolg der zitierten Schulbücher beim Einführen der Spannung ist die Missachtung des Unterschiedes zwischen dem zu beurteilenden Phänomen und der Beurteilungsgröße. Wie z. B. ein Unterschied zwischen einer Arbeit(sverrichtung) und der Beurteilungsgröße ($W = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$) für die verrichtete Arbeit besteht, oder zwischen dem Hindernis für einen Strom und der Beurteilungsgröße $R = U/I$, so unterscheiden sich die realen Feldverhältnisse von ihren Beurteilungsgrößen.

3 UNTERRICHTSEINHEITEN VOR DER SPANNUNG

3.1 Elektrische Kräfte (Schülerexperimente)

Pflichtexperimente:

Kräfte zwischen Stäben aus gleichem und unterschiedlichem Material, wobei beide Stäbe gerieben werden.

Freie Experimente:

Nach eigenen Einfällen, z. B. Kraft zwischen einem geriebenen Stab und einem Magneten.

Neuartige Kräfte:

Da es sich weder um Trägheitskräfte, noch um Gravitationskräfte und auch nicht um magnetische Kräfte handelt, sind das andersartige Kräfte, die elektrische Kräfte (= Bernsteinkräfte) genannt werden.

3.2 Elektrische Ladung

Elektrische Ladung als unbekannt Ursache für das Auftreten von elektrischen Kräften.

Obwohl wir nicht wissen, was die Ladung ist, erfährt man von Untersuchung zu Untersuchung doch vieles über dieses unbekannt Etwas.

2 Arten von Ladungen.

3.3 Das Elektroskop (Schülerexperimente)

Funktionsweise des Elektroskops; Übertragung von Ladungen; Leiter, schlechter Leiter und extrem schlechte Leiter (Nichtleiter).

3.4 Neutralisation (Schülerexperimente)

Sicherheitshalber ein Hinweis: Die Isolierung der üblichen Experimentierkabel ist nicht ausreichend. Hält man so ein Kabel an der Isolierung und lässt ein Kabelende ein geladenes Elektroskop berühren, entlädt sich das Elektroskop sofort. Zur leitenden Verbindung zweier Elektroskope kann ein Endabschnitt eines passenden Kunststofflineals mit Alu-Folie glatt umwickelt werden.

3.5 Influenz (Schülerexperimente)

Im Anschluss an die Neutralisation von Ladungen erhebt sich die Frage: Vernichten positive und negative Ladungen einander bei der Neutralisation oder bleiben sie miteinander vermischt bestehen?

Klärung der Frage durch Ladungstrennung mit Hilfe von elektrischen Kräften (Influenz).

Bei der Erklärung eines (vorgeschlagenen) Experimentes benutzt man die Beweglichkeit von Ladungen im Metall. Ob man nur die Beweglichkeit positiver Ladungen, nur die Beweglichkeit negativer Ladungen oder sogar die Beweglichkeit beider Ladungsarten im Metall annimmt, in allen drei Fällen ist die Erklärung des experimentellen Ausgangs möglich.

Spätestens jetzt taucht die Frage auf: Sind im Metall beide Ladungsarten beweglich oder nur positive Ladungen oder nur negative? Klärung im nächsten Punkt.

3.6 Welche Ladungen sind im Metall beweglich? (Glüh-elektrischer Effekt; Elektronen, Teil 1)

Grundidee:

Bringt man Atome zum heftigen Zappeln, sollten sie einige der frei beweglichen Ladungen nach außen schleudern. Und Erhitzen führt zu heftigem Zappeln.

Experiment mit der Vakuum-Diode von Leybold (Abb. 3.1):

Sind Elektroskop, Verbindungskabel und Metallplatte der Diode negativ aufgeladen, bleibt der Elektroskopaus Schlag, wenn die Heizung eingeschaltet wird. Sind Elektroskop, Kabel und Metallplatte positiv geladen,

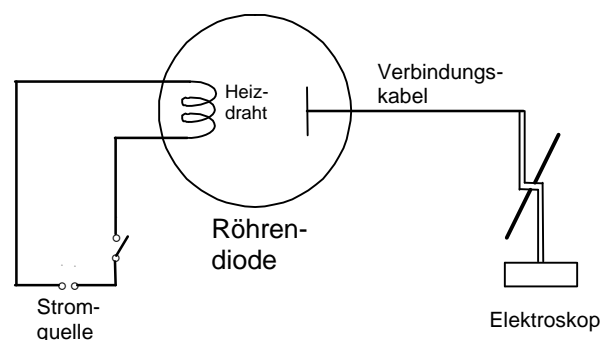


Abb. 3.1

verschwindet der Elektroskopausschlag beim Einschalten der Heizung.

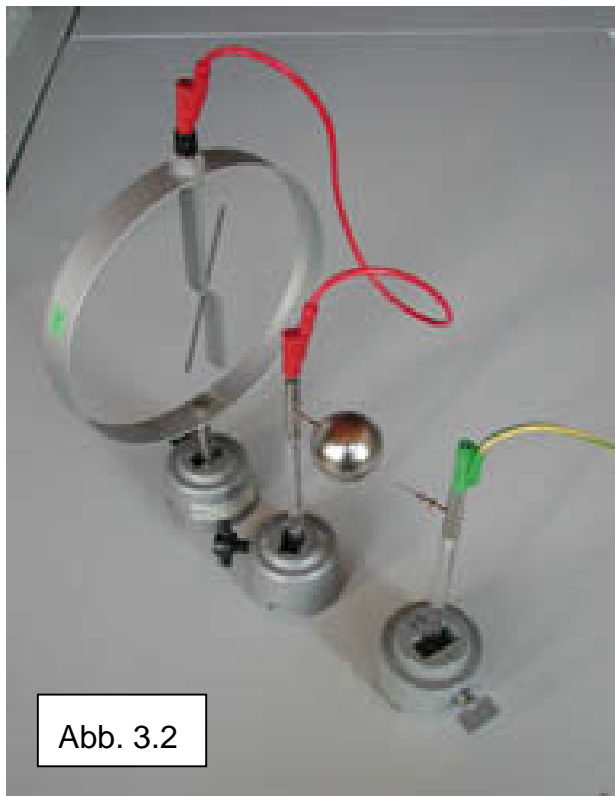
Folgerung: Aus dem glühenden Metall werden nur negative Ladungen geschleudert. Wir nehmen deshalb an, dass die im Metall frei beweglichen Ladungen negativ sind.

Natürlich muss auch die Frage geklärt werden, wieso das ungeladene Elektroskop nicht ausschlägt, wenn die Heizung eingeschaltet wird.

Mitteilung, dass aus dem Heizdraht gleichartige Teilchen kleiner Masse und gleicher Ladung austreten und dass diese Teilchen Elektronen genannt werden.

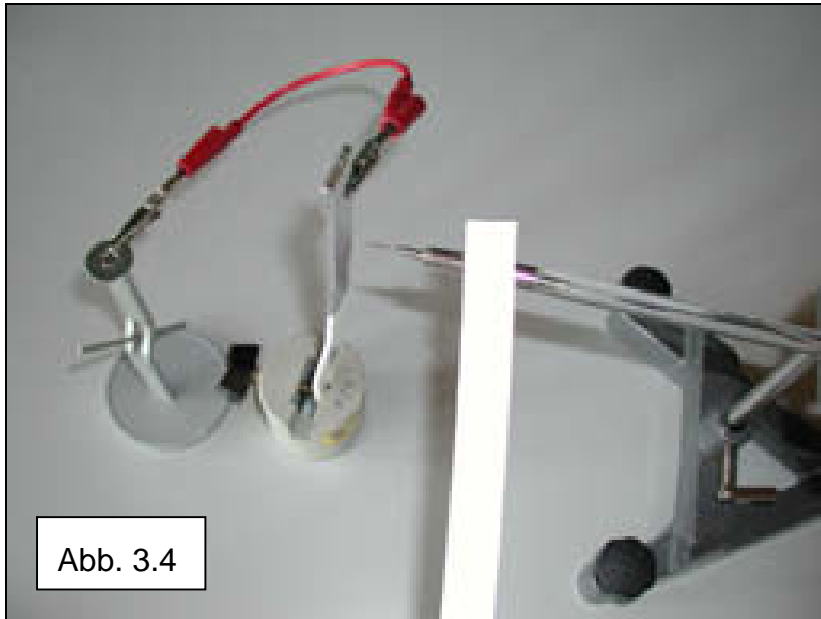
3.7 Spitzenwirkung (Schülerexperimente)

Typische Experimente:



Sowohl Experimente zum Entladen (Abb. 3.2 und Abb. 3.3) als auch Experimente zum Laden von Elektroskopen (Abb. 3.4 und Abb. 3.5). Bei den Entlade-Versuchen die Erdung nicht vergessen.

Die Abbildungen 3.4 und 3.5 zeigen Aufbauten mit Schülerexperimentiergeräten.



3.8 Faraday-Käfig (Schülerexperimente)

3.9 Bandgenerator

3.10 Der Stromkreis (teilw. Schülerexperimente)

Ein dauernder Ladungstransport in e i n e Richtung ist nur möglich, wenn die Ladungen dorthin zurückkehren können wo sie abgezogen wurden. Deshalb braucht man einen geschlossenen Stromkreis.

Der Bandgenerator im Dauerbetrieb zeigt, dass der Stromkreis nicht immer aus einem Draht bestehen muss.

Vergleich von Taschenlampenbatterie und Bandgenerator als ‚Pumpen‘: Beim Bandgenerator treten in der Umgebung der geladenen Kugel starke elektrische Kräfte auf. Bei der Batterie sind die elektrischen Kräfte in der Umgebung der Pole schwach. Beim Bandgenerator ist die pro Sekunde auf die Kugelschale - und von ihr durch Luftmoleküle weitertransportierte - Ladungsmenge klein. Die Batterie kann, wenn ihre Pole durch einen guten Leiter verbunden sind, viel mehr Ladung pro Sekunde transportieren.

3.11 Wirkungen des elektrischen Stromes (Schülerexp.)

3.12 Ladung und Stromstärke; Einheiten

3.13 Messung von Stromstärken (Schülerexperimente)

3.14 Elektronen, Teil 2

Ein wichtiger und interessanter Punkt dieses Kapitels ist folgendes Experiment, das einen Hinweis auf die kleine Masse der Elektronen liefert (wenn nicht irgendwo ein Fehler versteckt ist):

Abb. 3.6 zeigt ein Spitzenrad, das mit einer Stecknadel an einem kleinen Stabmagneten hängt. Das Spitzenrad wurde aus einem steifen, mit Alu-Folie beklebtem Papier ausgeschnitten. Die gewählte Aufhängung ist sehr reibungsarm. Das Spitzenrad wird über ein Glimmlämpchen leitend mit dem Minus-Pol eines Hochspannungsnetzgerätes (0 – 6 kV) verbunden. Das leuchtende Glimmlämpchen zeigt den Transport von Ladungen (Elektronen) zum Spitzenrad an. An den Spitzen des Rades werden Luftmoleküle durch austretende Elektronen geladen und weggeschleudert. Der ‚Rückstoß‘ treibt das Spitzenrad an. An der kugelförmigen Halbschale werden die Luftmoleküle entladen. Die Schale ist mit dem Plus-Pol des Hochspannungsnetzgerätes verbunden.



Abb. 3.6



Abb. 3.7

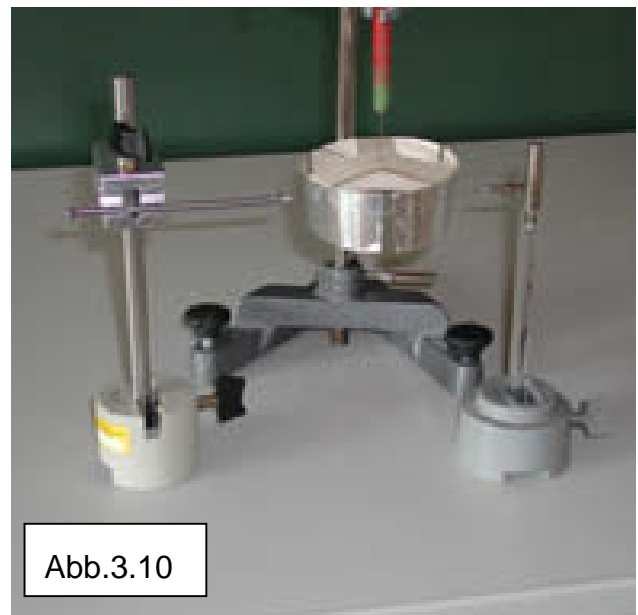
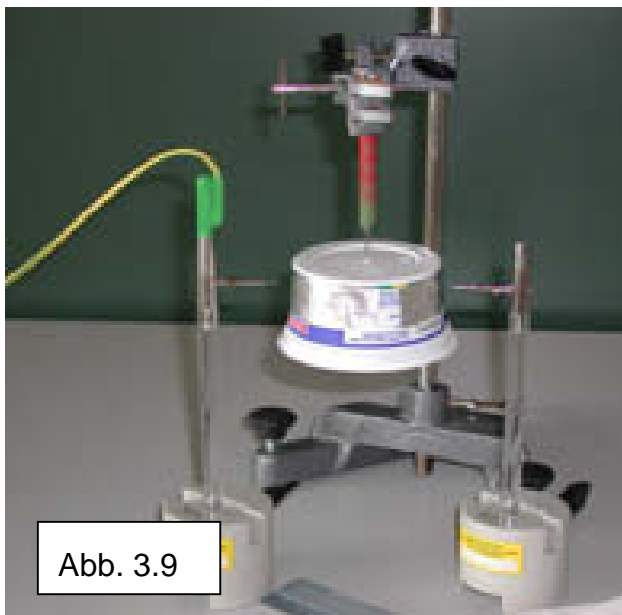
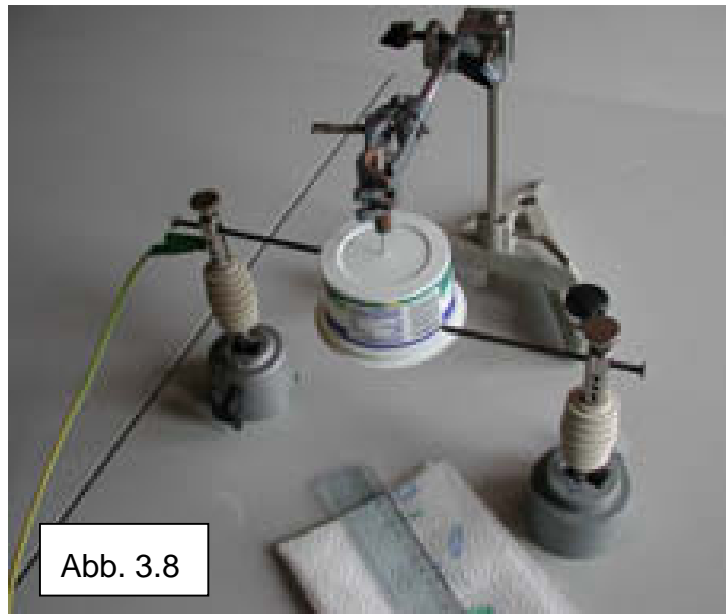
Unter der geschlossenen Glashaube (Abb. 3.7) läuft das Spitzenrad auch, wenn man verhindert, dass sich in der Umgebung Ladungen ansammeln. Die kugelförmige Halbschale hat diese Funktion. Pumpt man die Luft aus dem Behälter, bleibt das Rad (nach vorübergehender Beschleunigung) stehen - selbst wenn man die Glimmlampe heller leuchten lässt als vorher. Falls man deshalb annehmen darf, dass pro Sekunde mehr Elektronen zu den Spitzen fließen als vorher und dass pro Sekunde mehr Elektronen die Spitzen verlassen als vorher, dann fliegen viele Elektronen allein von den Spitzen weg oder etliche der verbliebenen Luftmoleküle haben jeweils mehr als ein Elektron an einer Spitze aufgenommen. Jedenfalls sind weniger Moleküle aber mehr Elektronen unterwegs. Da der ‚Elektronenrückstoß‘ nicht ausreicht, das Rad anzutreiben, muss die Elektronenmasse wesentlich kleiner als die Massen der Luftmoleküle sein.

3.15 Aufbau der Materie; Atome, Moleküle, Dipole, Leiter, Nichtleiter

3.16 Galvanische Elemente (teilw. Schülerexperimente)

3.17 Elektrostatische Motoren (Schülerexperimente)

Zuerst machen alle Gruppen - meist Zweiergruppen - das gleiche in Abb. 3.8 gezeigte Experiment. Der Kunststoffbecher hängt mit einem kleinen Nagel an einem Magneten. (Eine dünne Stecknadel ist magnetisch zu schwach, ein dickerer Nagel kann magnetisch zu stark werden und hochklappen.) Das Loch im Becherboden soll möglichst genau im Mittelpunkt sein. Die Nagelspitzen zeigen in diesem Beispiel nicht zur Drehachse. Wenigstens eine Spitze muss gut isoliert montiert sein. Die zweite Spitze muss eventuell nicht geerdet sein. Der Becher lässt sich schon in Drehung versetzen, wenn man z.B. mit einem geriebenen Kunststoffstab an der gut isolierten Spitze wiederholt Ladungen abstreift. Manche Gruppen laden mit unterschiedlichen Reibstäben beide Spitzen (Nägel), manche mit gleichen Reibstäben nur eine. (Bei einem Mangel an Reibstäben kann man Kunststofflineale verwenden; Papier von Küchenrollen eignet sich gut zum Reiben.)



Ist die Funktionsweise des Motors den Schülern klar, erhalten die Gruppen unterschiedliche Aufträge zur Anfertigung von Rotoren: Auf die Becher werden zwei, drei oder noch mehr Alu-Folienstreifen als Segmente geklebt. Oder es müssen aus Zeichenpapier und Alufolie Läufer mit Alu-Foliensegmenten hergestellt werden. Oder es

werden mehr als 2 Spitzen eingesetzt. Abb. 3.9 und Abb. 3.10 zeigen Läufer mit 2 und 3 Segmenten und Spitzen, die zu den Achsen zeigen. Liegen die Spitzen symmetrisch und zeigen zu den Drehachsen, laufen die Rotoren in der Regel nicht von selbst an - außer irgendwelche Unsymmetrien helfen.

Die Gruppen wollen ihre Motoren möglichst schnell laufen lassen - und wundern sich, dass ein Ladungsnachschub zur falschen Zeit die Bewegung behindert.

Dann kommt der Ruf nach dem Bandgenerator. Gruppen wollen ihn gemeinsam benutzen. Wieder gibt es Einsichten auffrischende Enttäuschungsmöglichkeiten: Es läuft nichts, weil die Kabel von der Kugel des Bandgenerators irgendwo eine Tischkante berühren, oder weil der Generator zu viele Anlagen versorgen muss und er ja nur wenig Ladungen pro Sekunde liefert. Oder eine Anlage läuft auf Kosten der anderen besser.

Es gibt viele Gelegenheiten zur lehrreichen Fehlersuche und Fehlerbehebung.

3.18 Aufarbeitung von offenen Fragen

Gelegenheit zur Klärung von Fragen die ab Einführung der elektrischen Kräfte noch offen geblieben sind.

Spätestens hier sollte geklärt werden, wieso ein Magnet, ein Stück Eisen oder ein Finger z. B. einen geriebenen Kunststoffstab anziehen. Oder wieso ein dünner Wasserstrahl, ein neutrales Papier oder eine neutrale Watte angezogen werden. Interessant ist auch die Frage, warum Watte von einem geriebenen Stab angezogen, dann aber nicht weggeschleudert wird - im Gegensatz zur wegschleudernden Kugel des Bandgenerators.

4 DIE ELEKTRISCHE SPANNUNG (TEXT FÜR SCHÜLER)

Wir werden die *elektrische Spannung* im Gegensatz zu vielen Schulbüchern korrekt einführen.

Du wirst die Einführung vermutlich besser verstehen, wenn wir einen Umweg machen. Wir sehen uns Berglandschaften an und werden einige energietechnische Fragen aus der Mechanik bearbeiten.

Dann kehren wir zur Elektrizität zurück.

Den Text eher langsam und genau lesen! Das erleichtert das Verstehen!

Packen wir es an.

4.1 TEIL 1: DIE GRAVITATIONSSPANNUNG

4.1.1 Nützliche Berge

Gebirge kann man für unterschiedliche Sportveranstaltungen oder Freizeitaktivitäten nutzen. Man kann nach Mineralien suchen oder Berghänge landwirtschaftlich nutzen.

Es gibt aber auch eine energietechnische Nutzung von Bergen - und das ist der Bereich, mit dem wir uns zunächst beschäftigen wollen.

4.1.2 Beispiel einer energietechnischen Nutzung

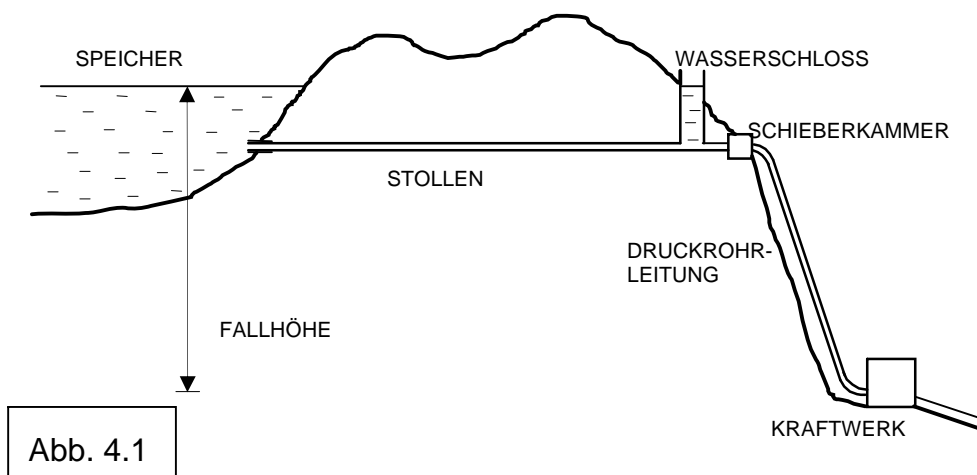
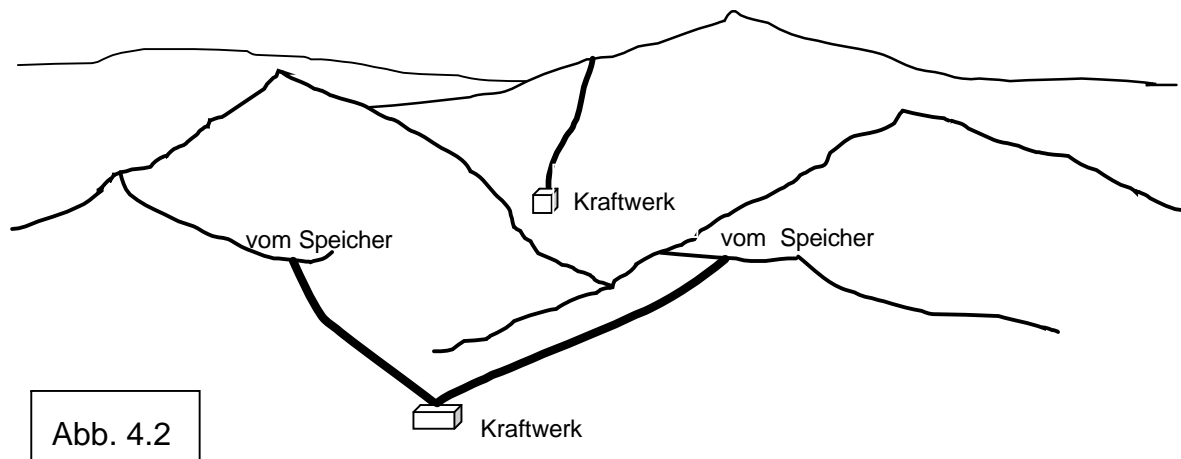


Abb. 4.1

4.1.3 Unser Ziel

Das folgende Bild 4.2 zeigt Kraftwerke mit unterschiedlichen Zuleitungen von Speicheranlagen.



Wir kümmern uns jetzt nicht um wirtschaftliche Fragen. Es geht nicht darum, welche Speicheranlage stärkere Zuflüsse hat, welche billiger war oder welche sich leichter und kostengünstiger warten lässt.

Und wir wollen uns nur um Gefällestrrecken oder - allgemeiner gesagt - um Bergwege kümmern.

Es geht beispielsweise darum, bei welchen Strecken eine bestimmte Wassermenge, sagen wir 10 000 Liter, mit viel Energie das Kraftwerk erreicht und bei welchen Strecken mit wenig Energie.

Es geht um die energetische Ergiebigkeit oder den energetischen Wert von Gefällestrrecken oder Bergwegen.

Unser Ziel ist das Finden einer Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit, für den energetischen Wert von Gefällestrrecken bzw. Bergwegen.







Wenn dir eine Formulierung wie ‚Beurteilungsgröße für die Ergiebigkeit‘ fremd vorkommt, lass dich nicht schrecken, im nächsten Kapitel klären wir die Sache.

4.1.4 Ergiebigkeit von Gebieten beim Gold suchen

Stell dir vor, es werden Sandböden in 3 unterschiedlichen Regionen auf ihren Goldgehalt untersucht.

Dass die Angelegenheit für uns nicht zu kompliziert wird, wollen wir annehmen, dass in jeder Region das Gold im Sand gleichmäßig verteilt ist.

In jeder Region wird Sand untersucht. Die folgende Tabelle gibt Näheres an.

	Region (1)	Region (2)	Region (3)
Gefundene Goldmenge m	10 g 	10 g 	20 g 
Verarbeitete Sandmenge M	10 t 	20 t 	40 t 

Mancher hält auf den ersten Blick die Region (3) für die ergiebigste. 20 g Gold! Aber Achtung, es wurde ja auch ziemlich viel Sand durchsucht.

Bei der Beurteilung, wie ergiebig eine Region bzw. ihr Sand goldmäßig ist, muss neben der gefundenen Goldmenge m auch die durchsuchte Sandmenge M beachtet werden.

Vor dem Weiterblättern folgende Aufgabe lösen:

Sind gleich ergiebige Regionen vorhanden? In welcher Region ist der Sand goldmäßig am ergiebigsten?

L ö s u n g :

Die Regionen (2) und (3) sind gleich ergiebig.

(Falls du zur Orientierung irgendeine Begründung brauchst: Nimmt man in Region (2) die doppelte Sandmenge - also auch 40 t wie in Region (3) - dann erhält man die doppelte Goldmenge, das sind 20 g. In Region (2) und Region (3) liefern gleiche Sandmengen gleiche Goldmengen.)

Region (1) ist am ergiebigsten:

40 t Sand würden 40 g Gold liefern, das ist mehr als man in 40 t Sand der anderen Regionen findet.

Nun wollen wir einen mathematischen Term aus m und M suchen, der die goldmäßige Ergiebigkeit gerecht beurteilt.

Was heißt das?

Erstens: Wenn 2 Regionen unserer Ansicht nach gleich ergiebig sind, muss der Term für beide Regionen den gleichen Wert liefern.

Zweitens: Wenn eine Region ergiebiger ist als die andere, muss der Term für die eine Region einen größeren Wert liefern als für die andere Region.

L ö s e v o r d e m W e i t e r b l ä t t e r n f o l g e n d e A u f g a b e :

Aus m und M bilden wir einige Terme und können nachsehen, ob einer unsere Ansicht über die Ergiebigkeit der Regionen wiedergibt. Fülle dazu die folgende Tabelle aus; verwende dafür die Werte aus der vorigen Tabelle. Gib an, welcher Term sich zur Beurteilung der goldmäßigen Ergiebigkeit eignet.

	Region (1)	Region (2)	Region (3)
$M \cdot m$			
M/m			
m/M			

L ö s u n g :

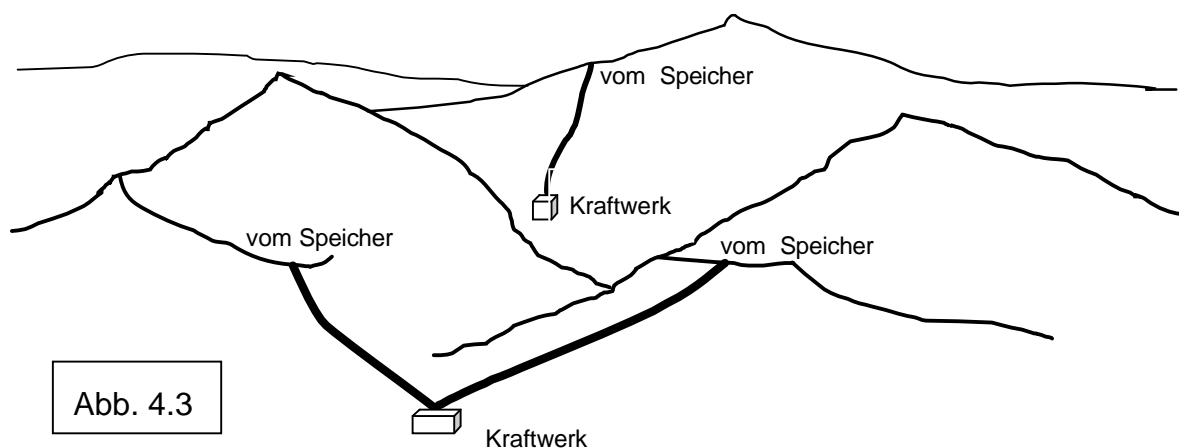
	Region (1)	Region (2)	Region (3)
$m \cdot M$	100 gt	200 gt	800 gt
M/m	1 t/g	2 t/g	2 t/g
m/M	1 g/t	0,5 g/t	0,5 g/t

m/M passt zu unserer Ansicht über die Regionen: Die Werte für die Regionen (2) und (3) sind gleich und für die Region (1) ist der Wert am größten.

m/M ist somit die geeignete Beurteilungsgröße für die goldmäßige Ergiebigkeit der Regionen.

4.1.5 Zurück ins Gebirge

Schauen wir uns wieder einige Gefällestrrecken an.



Statt Sand wird Wasser eingesetzt und statt Gold erwarten wir Energie.

Eine bestimmte Wassermenge hat am oberen Ende einer Leitung eine bestimmte potentielle Energie W_{pot} - bezüglich der Kraftwerksposition.

Würde beim Herabströmen keine Reibung auftreten, könnte die gesamte Energie W_{pot} dem Kraftwerk geliefert werden.

Um die Angelegenheit für uns einfacher zu machen, nehmen wir für die in der Abbildung 4.3 skizzierten Leitungen Reibungsfreiheit an.

Durch die drei Rohrleitungen lässt man etwas Wasser ab. Genauere Daten dazu findest du in der folgenden Tabelle.

	Gefällestrecke (1)	Gefällestrecke (2)	Gefällestrecke (3)
Abgelassene Wassermenge m	40 t	40 t	20 t
Energie W_{pot} , die das Kraftwerk bei Rei- bungsfreiheit erhält	400 MJ	200 MJ	100 MJ

A u f g a b e :

- Ordne die Gefällestrecken nach ihrer energetischen Ergiebigkeit.
- Aus m und W_{pot} kann man eine Beurteilungsgröße bilden, welche die energetische Ergiebigkeit der Leitungen beurteilt. Ergänze dazu die folgende Tabelle. Erledige diesen Auftrag auch wenn du schon weißt, wie die gesuchte Größe aussieht - einfach zur Vertiefung. Gib an, welcher Ausdruck die gesuchte Beurteilungsgröße ist.

	Gefällestrecke (1)	Gefällestrecke (2)	Gefällestrecke (3)
$W_{pot} \cdot m$			
$\frac{m}{W_{pot}}$			
$\frac{W_{pot}}{m}$			

Die nächste Seite erst dann lesen, wenn du die Aufgabe erledigt hast.

L ö s u n g :

a) (2) und (3) haben die gleiche Ergiebigkeit, die Ergiebigkeit von (1) ist doppelt so groß.

b)

	Gefällestrecke (1)	Gefällestrecke (2)	Gefällestrecke (3)
$W_{pot} \cdot m$	16 000 MJ·t	8 000 MJ·t	2 000 MJ·t
$\frac{m}{W_{pot}}$	0,1 t/MJ	0,2 t/MJ	0,2 t/MJ
$\frac{W_{pot}}{m}$	10 MJ/t	5 MJ/t	5 MJ/t

Der Term $\frac{W_{pot}}{m}$ ist eine Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit (den energetischen Wert) von Gefällestrecken.

Achtung! Wir beleuchten die letzten zwei Aufgaben a) und b) noch von einer anderen Seite:

Vielleicht hast auch du dir gedacht, du könntest die Erledigung der Aufgaben doch einfacher machen: Man nehme die Tabelle aus der letzten Angabe her und rechne aus, welche Energie für 1 t Wasser bei jedem Kraftwerk ankommt.

	Gefällestrecke (1)	Gefällestrecke (2)	Gefällestrecke (3)
Abgelassene Wassermenge m	40 t	40 t	20 t
Energie W_{pot} , die das Kraftwerk bei Reibungsfreiheit erhält	400 MJ	200 MJ	100 MJ

↓

↓

↓

	Gefällestrecke (1)	Gefällestrecke (2)	Gefällestrecke (3)
Abgelassene Wassermenge m	1 t	1 t	20 t
Energie W_{pot} , die das Kraftwerk bei Reibungsfreiheit erhält	400 MJ/40 = 10 MJ	5 MJ	5 MJ

Und schon hätte man alles, denkst du. Man sieht was los ist und die Werte

10 MJ, 5 MJ, 5 MJ

könnte man als Beurteilungen der Ergiebigkeit für die 3 Strecken hernehmen.

Gut gedacht. Für die Lösung von Aufgabe a) ist das in Ordnung. Aber die Sache hat einen Haken, wenn es um die Lösung von Aufgabe b) geht: Die Werte 10 MJ, 5 MJ und 5 MJ allein genommen sagen zu wenig. Man weiß nicht, wieviel Wasser im Spiel war. Kommen z. B. bei der Gefällestrecke (1) unten die 10 MJ Energie heraus, wenn man oben 1 kg Wasser oder 100 kg oder 1 t Wasser loslässt? Der Wert 10 MJ verrät das nicht. Der Wert 10 MJ / t - beachte den kleinen Unterschied - informiert aber über die nötige Wassermenge, bei der unten 10 MJ Energie erhalten werden. 1 Tonne ist es!

Du könntest jetzt sagen: Man hätte ja nur die *Energie* W_{pot} immer statt durch den *Zahlenwert von m* direkt durch *m* dividieren können. Dann hätte man auch 10 MJ/t, 5 MJ/t und 5 MJ/t erhalten und hätte sich das Rechnen mit anderen Termen ersparen können.

Ja, das wäre eine zweite Möglichkeit gewesen. Aber das erste Verfahren zum Auffinden einer Beurteilungsgröße, das Untersuchen verschiedener Terme und das Vergleichen ihrer Werte mit unserer Meinung eignet sich bei der Einführung etlicher Größen besser.

Immerhin konnte uns aber jetzt bewusst werden: Die Werte unserer Beurteilungsgröße $\frac{W_{pot}}{m}$ lassen erkennen, wieviel Energie pro kg Wasser oder pro t Wasser - also für eine Masseneinheit - am Rohrende bei Reibungsfreiheit herauskommt.

4.1.6 Transportarbeit W_{AE} - potentielle Energie W_{pot}

Wie findet man aber für eine Gefällestrecke und eine Wassermenge, etwa für 20 000 kg, den Wert von W_{pot} ?

Man berechnet einfach die Arbeit, die man benötigt, um diese Wassermenge reibungsfrei vom Kraftwerk A zum oberen Rohrende E zu transportieren.

Beim Herunterrinnen erhält das Kraftwerk genau diese Energie zurück, falls nicht ein Teil davon zur Verrichtung von Reibungsarbeit gebraucht wird.

Damit können wir festhalten:

Ist W_{AE} die Arbeit, wenn die Wassermenge m reibungsfrei vom Kraftwerk A zum oberen Leitungsende E transportiert wird, dann ist

$$\frac{W_{AE}}{m}$$

eine Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit (für den energetischen Wert) von Leitungen .

4.1.7 Die energetische Ergiebigkeit von Bergwegen

Nicht nur längs Rohrleitungen kann man etwas hinunterlassen.

Auch auf gewöhnlichen Wegen oder besonderen Bahnen kann man Dinge hinunterlassen.

Denken wir diesmal an Radwege.

Beim Hinaufschieben (oder Hinauffahren) muss man bei manchen Wegen ganz schön rackern, bei anderen weniger.

Ist W_{AE} die Arbeit, die man brauchen würde um ein Rad samt Last auf einem Weg reibungsfrei nach oben zu transportieren, dann ist W_{AE} die potentielle Energie von Rad und Fahrer, wenn sie oben sind. Bei der Talfahrt nutzt man diese Energie. Aber nicht erst unten am Wegende, sondern während der gesamten Fahrt: Beschleunigungsarbeit wird verrichtet und viel Reibungsarbeit - in der Bremsanlage und vor allem gegen die Widerstandskräfte der Luft.

Gegeben sind nun einige Wege (Abb. 4.4):

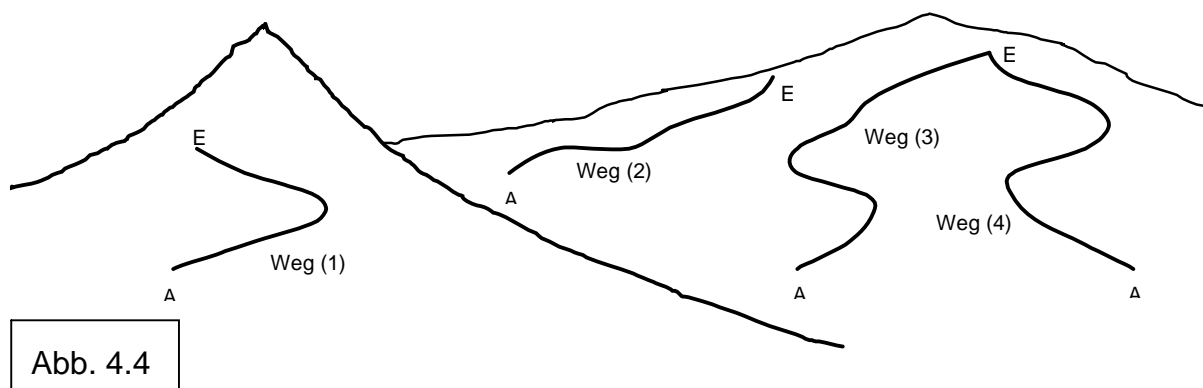


Abb. 4.4

Auf jedem Weg wird ein Fahrrad - eventuell mit Gepäck - hinaufgeschoben. Bekannt sind folgende Daten:

	Weg (1)	Weg (2)	Weg (3)	Weg (4)
Arbeit W_{AE}	80 kJ	60 kJ	80 kJ	100 kJ
Masse m des Fahrrades	20 kg	15 kg	16 kg	20 kg

A u f g a b e :

Berechne für jeden Weg die energetische Ergiebigkeit.

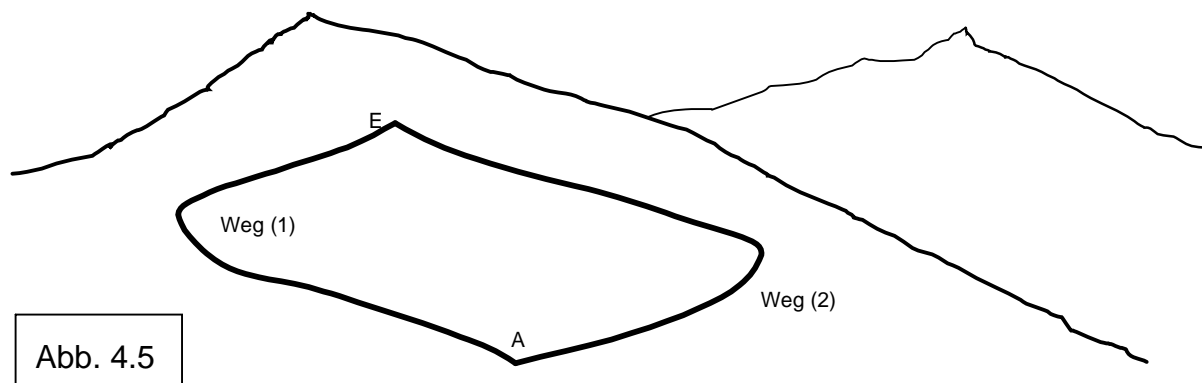
L ö s u n g :

	Weg (1)	Weg (2)	Weg (3)	Weg (4)
$\frac{W_{AE}}{m}$	4 kJ/kg	4 kJ/kg	5 kJ/kg	5 kJ/kg

Es soll noch nebenbei daran erinnert werden:

Mit der Berechnung von $\frac{W_{AE}}{m}$, z.B. 4 kJ/kg für Weg (1), erfährt man auch, wieviel Arbeit man für ein gedachtes Rad von 1kg Masse brauchen würde, um es auf dem betreffenden Weg ans andere Wegende zu bringen - nämlich 4kJ.

4.1.8 W_{AE}/m und die Wegform; die Gravitationsspannung



Die Abbildung 4.5 zeigt 2 Wege, die unterschiedliche Form haben, also unterschiedlich verlaufen. Sie haben den gleichen Anfangspunkt A und en gleichen Endpunkt E.

Aus der Mechanik weiß man:

Schiebt man ein Fahrrad reibungsfrei von A nach E, ist es egal auf welchem Weg man geht, die am Fahrrad verrichtete Arbeit W_{AE} ist auf allen Wegen gleich groß.

Der Wert von $\frac{W_{AE}}{m}$ hängt damit nicht von der Wegform sondern nur von der Lage des Anfangspunktes und des Endpunktes E ab.

Die Größe $\frac{W_{AE}}{m}$ heißt *Gravitationsspannung*.

Und weil sie nur von der Lage des Weganfangspunktes A und des Wegendpunktes E abhängt, nennt man $\frac{W_{AE}}{m}$ die *Gravitationsspannung zwischen A und E*. Wir bezeichnen sie mit u_{AE} .

Die *Gravitationsspannung* $u_{AE} = \frac{W_{AE}}{m}$ ist also eine Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit (für den energetischen Wert) von (Berg-) Wegen.

4.1.9 Höhendifferenz statt $\frac{W_{AE}}{m}$?

Das folgende Bild zeigt Kraftwerke mit unterschiedlichen Zuleitungen von Speicheranlagen.

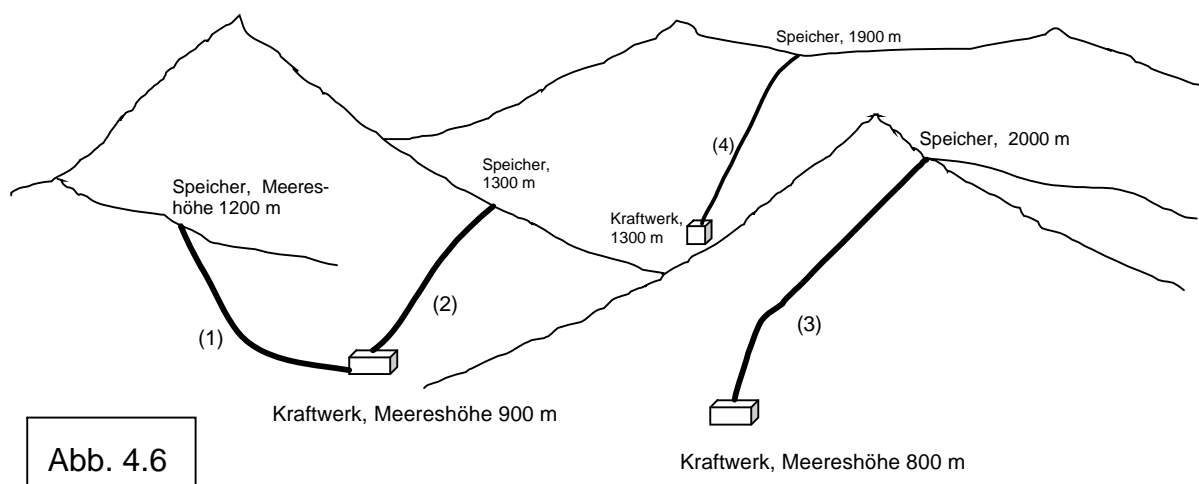


Abb. 4.6

Je größer der Höhenunterschied ist, desto größer ist W_{AE} bei gleicher Wassermasse m – und desto größer ist dann auch $\frac{W_{AE}}{m}$.

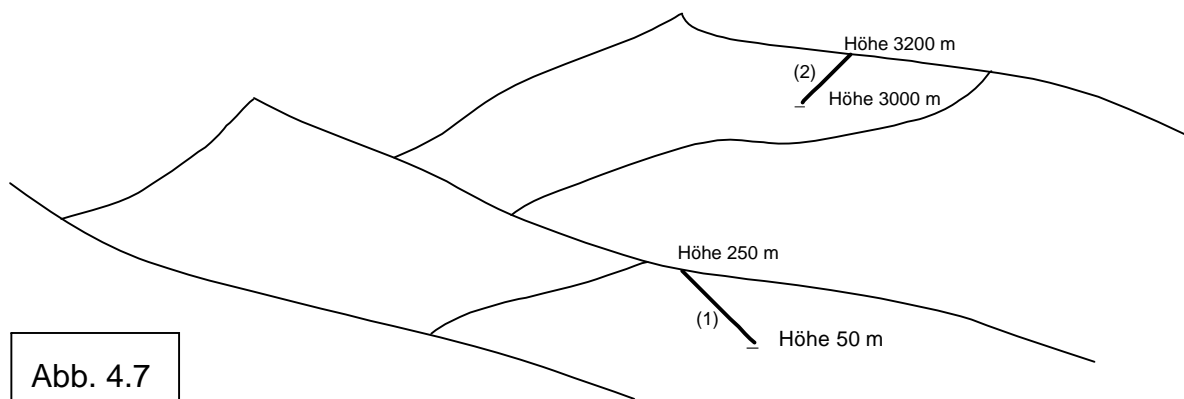
Die Strecke (3) hat den größten Höhenunterschied: $2\,000\text{ m} - 800\text{ m} = 1\,200\text{ m}$. Damit wäre die Strecke (3) die energetisch ergiebigste.

(4) ist die zweitergiebigste Strecke ($1\,900\text{ m} - 1\,300\text{ m} = 600\text{ m}$) usw.

Auf den ersten Blick sieht es so aus, als könnten wir ganz einfach mit Hilfe der Höhendifferenz den energetischen Wert einer Strecke angeben.

Leider ist die Angelegenheit nicht so simpel.

Im folgenden Bild 4.7 gehört zu zwei Bergwegen die gleiche Höhendifferenz.



Der Weg (2) liegt aber etwa $3\,000\text{ m}$ höher als der Weg (1).

Die Schwerkraft wird mit zunehmender Höhe kleiner. Deshalb werden $1\,000\text{ kg}$ Wasser auf dem Weg (2) nicht so stark angetrieben wie auf dem Weg (1). $1\,000\text{ kg}$ Wasser haben am Ende von Weg (2) etwas weniger Energie als am Ende von Weg (1). Weg (2) hat somit einen etwas kleineren energetischen Wert.

Der Unterschied ist so klein, dass er in der Praxis nicht beachtet wird. Aber er ist da.

Wenn aber etwa die Strecke (2) auf dem Mars liegen würde, dann wäre bei gleichen Höhendifferenzen der Unterschied in der energetischen Ergiebigkeit groß. (Der Mars zieht Körper nicht so stark an wie die Erde.)

Oder vergleichen wir zwei Wege in der Umgebung der Erde (Abb. 4.8):

Weg (1) von der Erdoberfläche zu einem Fernsehsatelliten $36\,000\text{ km}$ über der Erdoberfläche.

Weg (2) vom Fernsehsatelliten nochmals $36\,000\text{ km}$ in den Raum hinaus.

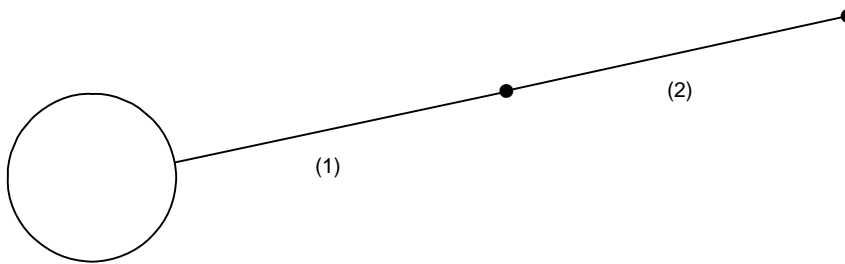


Abb. 4.8

Über so große Entfernungen nimmt die Anziehungskraft der Erde sehr stark ab. Trotz gleicher Höhendifferenz ist der Weg (2) energetisch viel weniger wert als der Weg (1).

Die genannten Beispiele zeigen:

Die Höhendifferenz eignet sich nicht zur Beurteilung des energetischen Wertes von Wegen.

Man könnte allerdings die Höhendifferenz benutzen, wenn man eine Ergänzung vornimmt. Der Weg wäre aber anstrengender als der von uns gegangene.

4.1.10 Die Rolle der Berge

Wenn die Anziehungskraft der Erde nicht wäre, würde uns der höchste Berg nichts nützen. Ein Berg stützt sozusagen nur die Speicheranlagen und die Rohrleitungen, er hält unsere Wege, wie ein Stativ.

Die Anziehungskraft der Erde ist es, die Wasser oder Fahrräder nach unten treibt.

Das Entscheidende ist die Tatsache, dass in allen Punkten des Raumes Kräfte auf Körper wirken (wenn Körper vorhanden sind). So einen Raum nennt man *Kraftfeld*. Und weil es sich um Kräfte handelt, die für die Schwere der Gegenstände zuständig sind, sprechen wir vom *Schwerefeld* oder *Gravitationsfeld der Erde*.

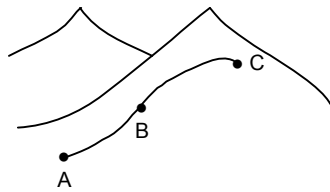
Der Berg ist also nur ein Stativ, das Wesentliche ist das Feld.

4.1.11 Aufgaben

1. Ein Fahrrad wird einen Weg entlang von A nach E geschoben. Die Reibung soll vernachlässigt werden. Dabei wird die Arbeit 50 000 J verrichtet. Fahrradmasse = 20 kg.

Gravitationsspannung zwischen A und E?

2.



Ein Fahrrad mit 20 kg Masse wird von A nach B transportiert; die verrichtete Arbeit $W_{AB} = 40\,000\text{ J}$.

Dann wird das Rad von B weiter nach C transportiert, wobei die Arbeit $W_{BC} = 30\,000\text{ J}$ verrichtet wird.

a) Wie groß ist die Gravitationsspannung u_{AB} ?

b) $u_{BC} = ?$

c) Wie groß sind die Arbeit W_{AC} und die Gravitationsspannung u_{AC} ?

Gilt $u_{AC} = u_{AB} + u_{BC}$?

3. Die Gravitationsspannung zwischen zwei Punkten A und B beträgt $u_{AB} = 2\,000\text{ J/kg}$.

Welche Arbeit ist an einem 15 kg - Fahrrad zu verrichten, wenn es reibungsfrei von A nach B verschoben wird?

4. Die Gravitationsspannung zwischen einem Kraftwerk und einem Speichersee hat den Wert $1\,500\text{ J/kg}$. Es werden 20 000 kg Wasser abgelassen.

Welche Arbeit (Energie) kann das Wasser (bei Reibungsfreiheit in der Zuleitung) dem Kraftwerk liefern?

5. Ein Körper hat die Masse 1 kg. Auf der Mondoberfläche hat er ein Gewicht von 1,62 N.

a) Welche Arbeit ist erforderlich, um das 1 kg - Stück vom Mondboden 2 m hoch zu heben?

b) Gravitationsspannung zwischen Mondboden und einem Punkt, der 2 m über dem Mondboden liegt?

c) Bei uns im Klassenzimmer hat das 1 kg - Stück ein Gewicht von 9,81 N.

Wie groß ist bei uns die Gravitationsspannung zwischen Klassenzimmerboden und einem Punkt, der 2 m über dem Fußboden liegt?

d) Wieso kann der Ausdruck W/G (=Verschiebungsarbeit/Gewicht) keine gerechte Beurteilungsgröße für den energetischen Wert eines Weges sein? Berechne dazu den Wert von W/G für die 2 m langen Wege im Klassenzimmer und auf dem Mond.

4.2 TEIL 2: DIE ELEKTRISCHE SPANNUNG

4.2.1 Elektrische Felder

Wer weiß, was etwa ein Rübenfeld ist, weiß schon viel: In etlichen Ackerpunkten sind Rüben zu finden. Anders gesagt: Etlichen Ackerpunkten sind Rüben zugeordnet.

So ähnlich ist es mit Feldern in der Mathematik und Physik.

Nehmen wir ein Raumstück, z.B. den Physik-Saal, dann gehört zu jedem Raumpunkt eine Temperatur. Jedem Raumpunkt ist eine Temperatur zugeordnet.

So ein Raum (mit den seinen Punkten zugeordneten Temperaturen) heißt *Temperaturfeld*.

Ist jedem Punkt eines Raumes oder Raumteiles eine Kraft zugeordnet, spricht man von einem *Kraftfeld*.

Allen Punkten in der Umgebung der Erde kann eine spezielle Kraft, die Schwerkraft oder Gravitation, zugeordnet werde. Mit einem Testkörper (Massestück) merkt man, wie in den Raumpunkten die Schwerkraft am Testkörper angreift.

Dieses Kraftfeld nennen wir *Gravitationsfeld der Erde*.

Untersucht man einen Raum mit einer elektrischen Testladung, dann sieht man, ob in den Raumpunkten eine ruhende elektrische Ladung eine Kraft erfährt. (Ab und zu kann so eine Kraft auch null sein.)

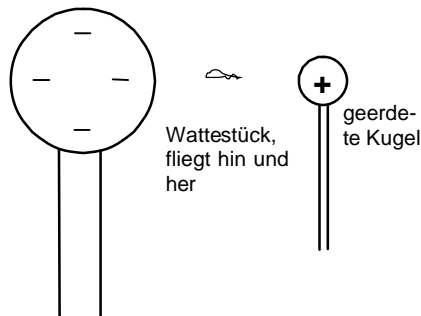
Wird jedem Punkt eine elektrische Kraft zugeordnet, dann liegt ein *elektrisches Kraftfeld*, kurz: *elektrisches Feld* vor.

4.2.2 Beispiele für elektrische Felder

Beispiel 1:

Zwischen den geladenen Kugeln existiert ein Feld, das die geladene Watte antreibt.

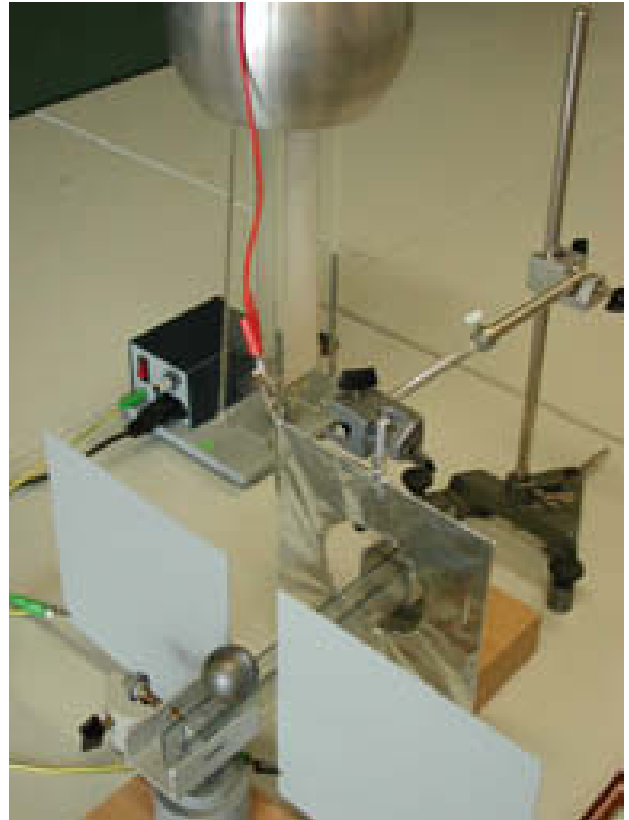
Kugel des Band-
generators



Beispiel 2:

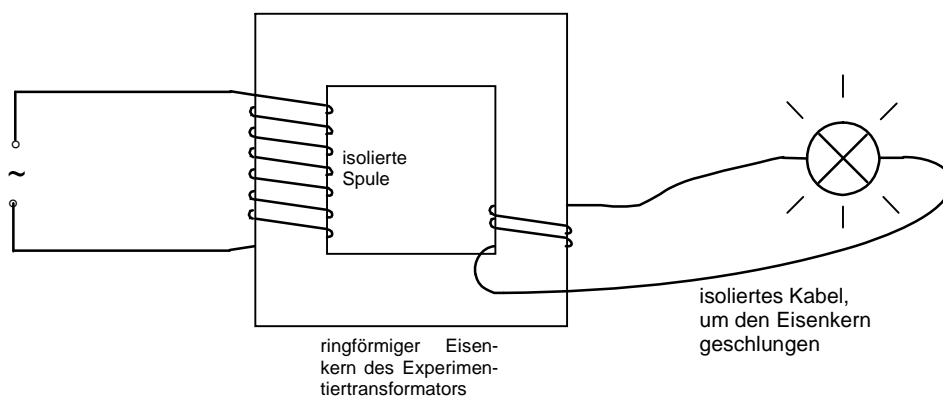
Die gut isoliert montierte Platte mit der Kreisöffnung ist mit dem Bandgenerator verbunden. Die beiden einen Spalt bildenden Platten sind geerdet. Die Bahn für den Ball ist aus zwei Kunststofflinealen errichtet. Zwischen den Linealen befinden sich zwei exakt gleiche Abstandsqader. Die Bahn muss sehr gut waagrecht montiert sein. Der geladene Tischtennisball (mit einem weichen Bleistift angestrichen) wird vom Feld zwischen den Platten angetrieben und könnte am Ende der Bahn ein Schaufelrad antreiben. Dem geladenen Ball geht es im Feld zwischen den Platten wie einer Wassermenge im Rohr vom Speicher zum Kraftwerk.

Rechts von der Lochplatte und links vom Spalt erfährt der geladene Ball keine merkbare Kraft. Das heißt, dort gibt es entweder kein Feld oder es ist dort viel schwächer als zwischen den Platten.



Beispiel 3:

Das Beispiel 3 ist sehr bemerkenswert.



Das Kabel auf der rechten Seite ist isoliert. Es steht nicht in leitender Verbindung mit dem Eisenkern; klarerweise

auch nicht mit dem Kabel und der Quelle auf der linken Seite. **Dennoch leuchtet das Lämpchen!** Was treibt die Ladungen durch das Lämpchen? Das können nur Kräfte eines elektrischen Feldes sein. Wir müssen annehmen, dass sich auf geheimnisvolle Weise ein elektrisches Feld bildet, welches die Ladungen durch den Glühdraht treibt.

In den Beispielen 1 und 2 könnte man zunächst noch sagen, wir verzichten auf die Feldvorstellung, wir brauchen sie nicht.

Im Beispiel 3 geht das nicht mehr. Weit und breit sind keine geladene Kugel und keine geladene Platte zu sehen, welche die Ladungen antreiben könnten.

(Später einmal wirst du verstehen, dass sich im Beispiel 3 ein Wechselfeld bildet, das dauernd die Ladungen hin- und herzieht.)

4.2.3 Eine Batterie ohne bzw. mit Leiter

Wenn man eine einfache Flachbatterie nimmt, dann hat man im Raum zwischen den Kontaktstreifen ein deutliches Feld. Entfernt man sich von der Batterie, wird das Feld schwächer (Abb. 4.12).

Feld
schwach

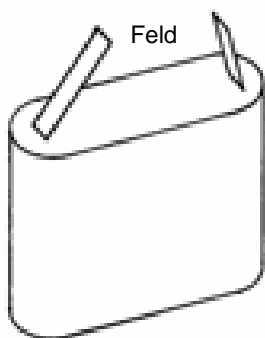


Abb. 4.12

Feld
schwach

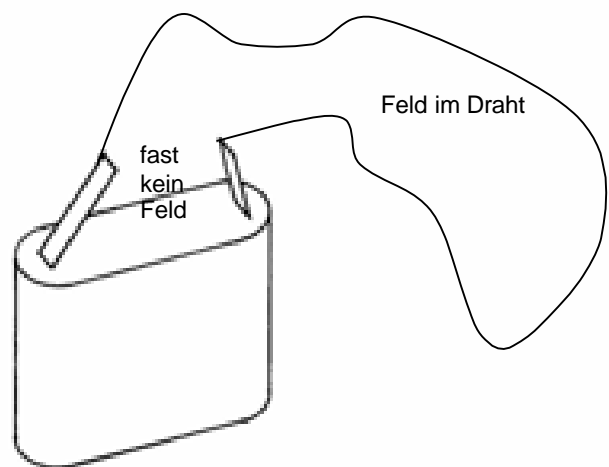
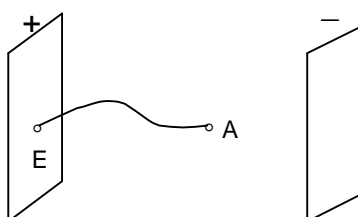


Abb. 4.13

Verbindet man die Batteriekontakte mit einem dünnen Draht (Abb. 4.13), der schon ein deutliches Hindernis für den Strom ist, gibt es eine dramatische Änderung des Feldes. Außerhalb der Batterie und außerhalb des Drahtes ist das Feld nur mehr sehr, sehr schwach, fast nicht mehr vorhanden. Aber im gesamten Draht, auch wenn er lang ist, herrscht ein elektrisches Feld, das deutlich stärker ist, als das Feld außerhalb des Drahtes. (Ist der Draht dick und damit praktisch kein Hindernis, gibt es auch im Draht praktisch kein Feld.)

4.2.4 Die Rolle der Ladung

Sehen wir uns das Feld zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Platten an (Abb. 4.14):



Auf einem Weg im Feld können wir eine Ladung q vom Weganfang A zum Wegende E bringen.

Je größer die Ladung q ist, desto stärker wirkt die Kraft des Feldes auf die Ladung und desto mehr

Abb. 4.14

Kraft und Arbeit müssen wir beim Transport aufwenden.

Mit der Anlage in Abb. 4.15 oder zur Not einfach mit einer passenden Waage (Abb. 4.16) können wir zeigen:

Halbiert man eine Ladung q , dann halbiert sich auch die Kraft auf q ; drittelt man die Ladung, dann geschieht das auch mit der Kraft. Und so weiter.

Abb. 4.15:

Die Kraft des Feldes zwischen den Platten zieht das geladene Plättchen zu einer Platte hin. Dabei wird der Torsionsdraht verdreht. Der Lichtstrahl zeigt die Torsion an. Der Torsionswinkel ist proportional zur Kraft. Eine Verdoppelung des Torsionswinkels zeigt eine Verdoppelung der Kraft an. Die Plättchenladung kann durch Berührung mit einem zweiten gleichartigen, ungeladenen Plättchen halbiert werden. Dabei muss allerdings das Feld zwischen den Platten abgeschaltet sein.

Das Experiment nur unter Aufsicht und Anleitung der Lehrperson durchführen!

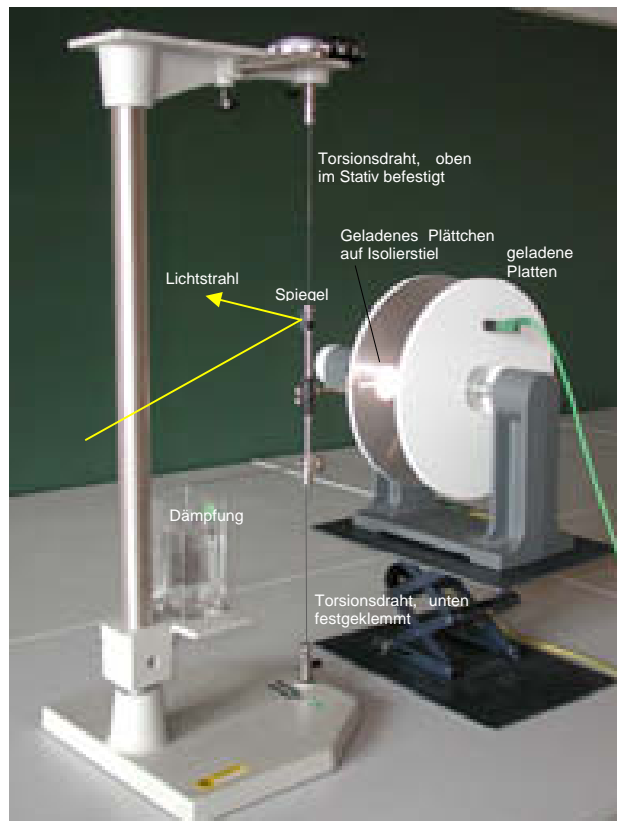


Abb. 4.16:

Beide Kugeln werden geladen. Die Waage zeigt die Kraft, welche eine Kugel im Feld der anderen erfährt.

Die Ladung einer dieser Kugeln kann halbiert werden, wenn man sie aus dem Feld bringt und mit einer gleich großen, ungeladenen Kugel berührt.

Die Waage muss ausreichend belastbar sein und soll 0,01 g unterscheiden können.



Das heißt aber auch:

Wenn man statt der Ladung q eine n -mal so große Ladung nimmt, vergrößert sich automatisch die Kraft auf das n -fache - und mit ihr auch die Transportarbeit auf das n -fache.

Jetzt können wir die Wirkung des elektrischen Feldes auf Ladungen mit der Wirkung des Gravitationsfeldes auf Massen vergleichen.

Beispiel eines Weges im elektrischen Feld zwischen den geladenen Platten.



Abb. 4.17

Beispiel eines Weges (einer Gefällestrecke) im Gravitationsfeld der Erde.

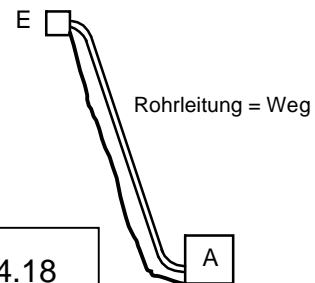


Abb. 4.18

Bei Reibungsfreiheit gilt für die abgebildete Anlage:

Transportiert man eine positive Ladung q von A nach E, muss man eine Arbeit W_{AE} verrichten und bei E hat die Ladung dann die Energie W_{AE} .

Lassen wir bei E die positive Ladung q wieder los, kann sie bei A die Energie W_{AE} wieder abgeben.

Lässt man bei E die doppelte Ladung los, liefert sie bei A die doppelte Energie.

Bei Reibungsfreiheit gilt für die abgebildete Anlage:

Transportiert man eine Wassermasse m von A nach E, muss man eine Arbeit W_{AE} verrichten und bei E hat das Wasser dann die Energie W_{AE} .

Lassen wir bei E die Wassermenge m ab, kann sie bei A die Energie W_{AE} wieder abgeben.

Lässt man bei E die doppelte Wassermasse ab, gibt es unten die doppelte Energie.

Die Ladung spielt im elektrischen Feld jene Rolle, welche die Masse im Gravitationsfeld hat.

4.2.5 Die energetische Ergiebigkeit (der energetische Wert) von Feldwegen

Im Gravitationsfeld war (bei reibungsfreiem Transport) "Transportarbeit W dividiert durch die transportierte Masse m " eine gerechte Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit eines Weges.

"Transportarbeit W dividiert durch die transportierte Ladung q " ist dann im elektrischen Feld eine gerechte Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit eines Feldweges.

Und von der Wegform ist die Größe W/q auch unabhängig.

Damit gilt:

Transportiert man im elektrischen Feld eine Ladung q von einem Punkt A auf beliebigem Weg (reibungsfrei) zu einem Punkt E und ist W_{AE} die Transportarbeit, dann ist

W_{AE}/q eine Beurteilungsgröße für die energetische Ergiebigkeit (den energetischen Wert) des Feldweges von A nach E.

Die Größe

$$W_{AE}/q$$

heißt elektrische Spannung zwischen A und E.

Wir bezeichnen sie mit U_{AE} oder einfach mit U .

$$U = W_{AE}/q$$

Die Einheit von U ist $[U] = 1 \text{ J}/1 \text{ As} = 1 \text{ J}/\text{As} = 1 \text{ Volt} = 1 \text{ V}$.

4.2.6 Aufgaben

1. Eine positive Ladung $q = 0,000\ 000\ 001\ \text{As}$ wird im Feld vom Punkt A zur positiven Platte transportiert (Abb. 4.19).

Die Transportarbeit beträgt $W = 0,000\ 001\ \text{J}$.

a) Spannung zwischen A und der positiven Platte?

- b) Welche Arbeit verrichtet das Feld, wenn die positive Ladung q vom Feld zurück nach A getrieben wird?

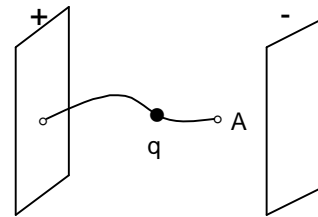


Abb. 4.19

2. Das Feld zwischen den Platten treibt die Ladung $q = 0,000\ 000\ 004\ \text{As}$ reibungsfrei von einer Platte zur anderen und verrichtet dabei die Transportarbeit von $0,000\ 002\ \text{J}$ (Abb. 4.20).

Spannung zwischen den Platten?

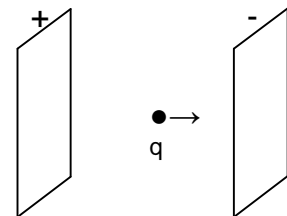
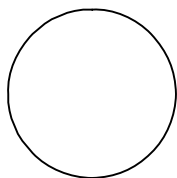


Abb. 4.20

3.



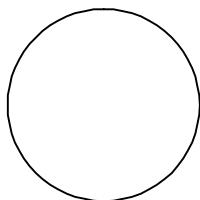
◦ A

◦ B

Die Ladung q wird im Feld der großen, geladenen Kugel reibungsfrei von A nach B transportiert. Die Transportarbeit ist null.

Energetische Ergiebigkeit (energetischer Wert) des Weges von A nach B?

4.



B

◦

A

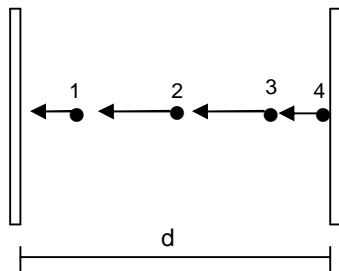
◦

Im Feld der großen, geladenen Kugel werden nacheinander 100 gleich große Ladungen von zusammen $0,000\ 000\ 2\ \text{As}$ von A nach B transportiert. Dabei wird die Gesamtarbeit $W = 0,000\ 4\ \text{J}$ verrichtet.

Energetische Ergiebigkeit (Spannung) der Strecke AB?

5. Gegeben sind zwei Vorgänge:

Vorgang 1:



Vorgang 2:



Zwei parallele, geladene Platten haben den Abstand $d = 20$ cm. Im Feld werden 4 Kugeln festgehalten. Jede Kugel trägt die gleiche Ladung q .

Alle Kugeln werden nun, ohne die Ladungen zu verlieren, so nach links verschoben, dass Kugel 1 die linke Platte trifft, Kugel 2 den Platz von Kugel 1 einnimmt, Kugel 3 den von Kugel 2, und schließlich Kugel 4 den von Kugel 3.

Dabei werden an der Kugel 1 die Arbeit $0,005$ J, an der Kugel 2 die Arbeit $0,006$ J, an der Kugel 3 ebenfalls $0,006$ J und an der Kugel 4 die Arbeit $0,003$ J verrichtet.

Zwei parallele, geladene Platten haben den Abstand $d = 20$ cm.

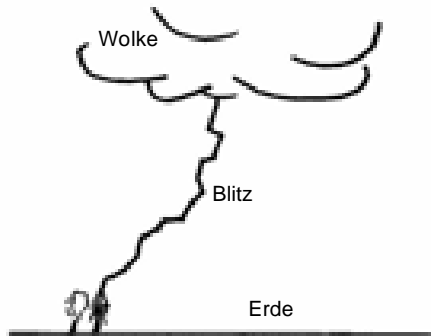
Die Plattenanordnung ist die gleiche wie bei Vorgang 1 - also gleiche Abmessungen und gleich stark geladene Platten.

An der rechten Platte wird eine Kugel festgehalten. Diese Kugel trägt die gleiche Ladung q wie jede der Kugeln vom Vorgang 1.

Die Kugel wird nun, ohne ihre Ladung zu verlieren, von der rechten zur linken Platte transportiert.

- Wie groß ist die im Vorgang 2 an der Kugel verrichtete Transportarbeit?
- Wie groß ist die Spannung zwischen den Platten bei beiden Vorgängen, wenn jede Kugel die Ladung $0,1 \mu\text{As}$ trägt?

6. Blitz



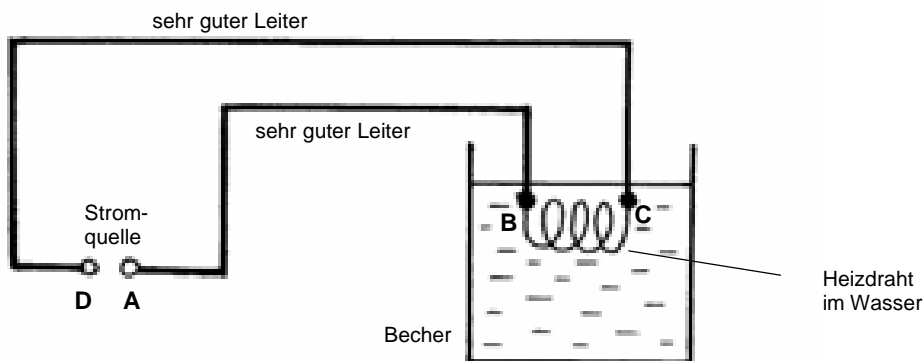
Wenn der Blitz zündet, sind längs des Blitzweges enorm viele geladene Teilchen vorhanden. Alle diese Ladungen verschieben sich um ein Stück - wie die Kugeln von Vorgang 1 der vorigen Aufgabe.

An jeder Stelle des Blitzweges fließt durch den Blitzweg-Querschnitt eine Ladungsmenge Q von z.B. 20 As. Dieser Ladungstransport dauert aber nur sehr kurz, etwa 1 ms.

- Wie groß ist die Stromstärke während des 0,001 s dauernden Blitzes?
- Die Spannung zwischen Wolke und Erde beträgt 500 000 000 V. Wie groß ist die Arbeit, die vom Feld zwischen Wolke und Erde an den Ladungen verrichtet wird?
- Was denkst du, was passiert mit dieser verrichteten Arbeit, wo kommt diese Energie hin?

(Bei etwa 8 großen Blitzen wird insgesamt schon jene Energie umgesetzt, welche für die Jahresheizung eines Einfamilienhauses (150 m²) reichen würde.)

7.



Durch den Draht fließt ein Strom der Stärke $I = 1,0$ A.

Das im Draht zwischen B und C vorhandene elektrische Feld verrichtet Arbeit beim Transport von Ladungen. Die Ladungen müssen gegen Reibungskräfte bewegt werden. Die vom Feld verrichtete Arbeit ist in diesem Fall Reibungsarbeit, taucht in Form von Wärme auf und erhöht die Temperatur des Wassers.

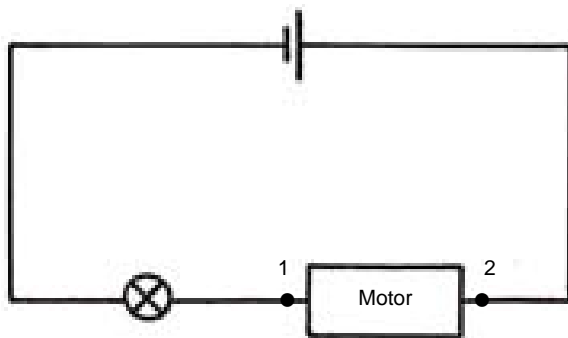
Bei einem 10 Minuten langen Betrieb wird an das Wasser die Wärmeenergie von 2700 J abgegeben.

- Welche Ladungsmenge Q wird in den 10 Minuten durch einen Leitungsquerschnitt bewegt?
- Wie groß ist die Spannung U_{BC} zwischen B und C?
- In den Drahtstücken AB und CD gibt es keine merkbare Erwärmung. Es taucht keine Energie auf.

Wie groß ist die zwischen A und B vom Feld verrichtete Arbeit?

- Wie groß sind U_{AB} , U_{CD} und U_{AD} ?

8.



Die Stromstärke beträgt 0,5 A.

In 100 s werden in der Lampe 150 J Energie und im Motor 450 J Energie umgesetzt.

- Wie groß ist der energetische Wert der Strecke zwischen den Motoranschlussstellen 1 und 2 ?
- Wie groß ist die Spannung zwischen den Batterieanschlüssen?

4.3 Entstehung und Erprobung des Textes

Der Text für SchülerInnen ist aus der eigenen Unterrichtsarbeit hervorgegangen. Im Gegensatz zum eigenen Unterricht wurde in diesem Text die Unterscheidung von positiver und negativer Arbeit nicht gewagt. Deshalb wurde weder $U_{AE} = - U_{EA}$ thematisiert noch die Einführung des Potentials als Beurteilungsgröße für den energetischen Wert von Punkten angestrebt.

Erfahrungen von einem Kollegen und einer Kollegin, die den Text hintereinander in ihren Klassen einsetzten sowie Rückmeldungen von GegenleserInnen wurden berücksichtigt.

SchülerInnen, die das Konzept des Suchens von gerechten Beurteilungsgrößen für Phänomene nicht kannten, waren zunächst über die Vorgangsweise verwundert und konnten sich nicht vorstellen, welchen Sinn z. B. die Beschäftigung mit der Ergiebigkeit beim Gold suchen haben könnte.

Das selbständige Durcharbeiten jener Textfassung, die zuletzt einer Klasse vorgelegt wurde, klappte nach Auskunft der Lehrkraft gut und machte keine Probleme, ausgenommen einige Rechenaufgaben am Ende des Textes in Kapitel 4.2.6. Aufgabe 7 war für die SchülerInnen dieser Klasse zu schwer.

Der Zeitbedarf zur Bearbeitung des kompletten Textes samt Aufgaben ist groß. Es gab zwar Schüler, die in etwa $2\frac{1}{4}$ Schulstunden fertig waren, aber die meisten SchülerInnen benötigten 4 volle Unterrichtsstunden. Die Erledigung der Rechenaufgaben hat verhältnismäßig viel Zeit gekostet.

4.4 Einige wichtige Anwendungen

Der Nutzen des eingeführten Spannungsbegriffes zeigt sich auch in seiner Anwendbarkeit. Es sollen nur ein paar Beispiele angedeutet werden.

4.4.1 Die elektrische Leistung $P = U \cdot I$

Für Gleichstrom lässt sich die Formel für die Leistung in einem Leiterstück AE leicht gewinnen:

In einem Zeitintervall Δt wird eine Ladung Q durch den Querschnitt des Leiters transportiert. Diese Ladung muss nicht das ganze Stück AE durchlaufen haben. Unter Beachtung der Aufgabe 5 von Kapitel 4.2.6 kann man aber sagen: Die während der Zeit Δt vom Feld zwischen A und E verrichtete Arbeit ist genau so groß wie die Arbeit W_{AE} an Q , wenn Q von A bis E transportiert wird.

Und jetzt ist es leicht. Wegen $W_{AE} = Q \cdot U_{AE}$ gilt

Leistung = Arbeitsgeschwindigkeit = $W_{AE} / \Delta t = (Q_{AE} \cdot U_{AE}) / \Delta t = U_{AE} \cdot Q_{AE} / \Delta t = U_{AE} \cdot I$.

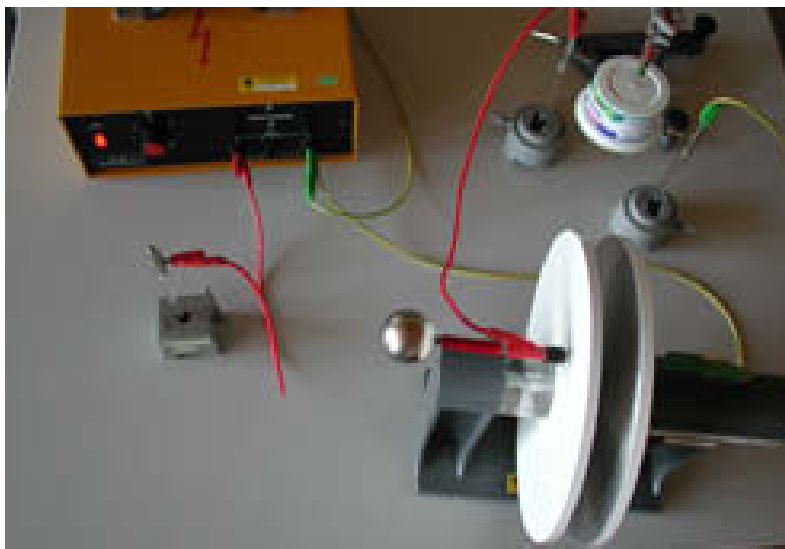
4.4.2 Die Ungefährlichkeit des Bandgenerators

100 000 V zwischen Bandgeneratorkugel und geerdeter Person und kein Personenschaden.

Zuerst der Fall, dass sich die voll aufgeladene Kugel des Bandgenerators über eine Person entlädt: Bei einer Spannung zwischen Erde und Kugel von 100 kV trägt die Kugel unseres Bandgenerators etwa die Ladung $Q = 1,5 \mu\text{As}$. Selbst wenn wir so tun, als würde die Spannung während des gesamten Entladevorganges 100 kV betragen, wird der Person maximal die Energie $W = Q \cdot U = 1,5 \mu\text{As} \cdot 100 \text{ kV} = 150 \text{ mJ}$ geliefert. Und das ist zur Schädigung des Menschen zu wenig Energie. Nach Euro-Norm 61010-1 liegt die Grenze bei 350 mJ.

Im Fall, dass eine Person eine dauernde Verbindung zwischen Kugel und Erde herstellt, kommt ins Spiel, dass die maximale Stromstärke vom Band zur Kugel - und dann wieder zur Erde - bei unserem Bandgenerator weniger als 10 μA beträgt. Auf der Kugel können sich kaum Ladungen ansammeln, der Nachschub ist zu schwach. Die Spannung zwischen Kugel und Erde ist jetzt äußerst klein und damit auch die Leistung $U \cdot I$.

4.4.3 Experiment: Mehr Arbeit - mehr Spannung



An den Platten des Kondensators sind die Spitzen eines selbstanlaufenden elektrostatischen Motors angeschlossen. Mit dem Hochspannungsnetzgerät probiert man zuerst, bei welcher Spannung der Motor startet. Dann wird der Kondensator nur so stark aufgeladen, dass der Motor gerade noch nicht anläuft. Die Spannung zwischen den Spitzen ist gleich groß wie die Spannung zwischen den Platten. Zieht man die Platten auseinander, läuft der Motor an und dreht sich eine Weile.