

# Vorwort

Das vorliegende Skript ist eine Fortentwicklung eines Skriptes zur Elektrizitätslehre, welches traditionell in der Ausbildung von Referendarinnen und Referendaren im Fach Physik am Staatlichen Seminar für Didaktik und Lehrerbildung (Gymnasien) in Tübingen eingesetzt wird. Es enthält neben einem mehrfach im realen Unterricht erfolgreich erprobten Lehrgang fachdidaktische und methodische Bemerkungen, die insbesondere noch unerfahrenen Lehrerinnen und Lehrern Hilfestellung beim Umsetzen der Anforderungen des Bildungsplanes 2004, der KMK-Standards und der Hinweise in den Mustercurricula für die jeweilige Klassenstufe im eigenen Unterricht zur Elektrizitätslehre geben kann.

Die fachdidaktischen und methodischen Bemerkungen ergänzen und begründen den vorgestellten Lehrgang. Im Lehrgang selbst wird ein mögliches Vorgehen im Unterricht dargestellt, dazu werden Experimente beschrieben, zentrale Fragestellungen und wichtige Ergebnisse genannt. An vielen Stellen werden fachdidaktische und methodische Alternativen angeboten sowie Bezüge zu gängigen Schulbüchern hergestellt. Die endgültige methodische Ausgestaltung der einzelnen Unterrichtsstunden obliegt in jedem Fall den unterrichtenden Lehrerinnen und Lehrern.

Der Lehrgang sowie die fachdidaktischen und methodischen Bemerkungen sind aufgrund langjähriger Erfahrungen im Unterricht und der Beschäftigung mit fachdidaktischen Problemstellungen im Zuge der Referendarsausbildung entstanden. Sie spiegeln vielfach persönliche Erkenntnisse und Meinungen wider und sind nicht in jedem Fall allgemeingültig.

Der vorgestellte Lehrgang ist in seiner Gesamtheit sachlogisch angeordnet und in sich schlüssig. An einigen Stellen geht der Lehrgang jedoch über die Anforderungen des Bildungsplans 2004 hinaus. Die Inhalte wurden in Pflicht- und Wahlinhalte getrennt, die innerhalb der Lehrgangsskizze in den Überschriften mit P für Pflicht und W für Wahlthemen gekennzeichnet wurden. Wahlinhalte könnten in das Schulcurriculum aufgenommen werden. Beschränkt man sich in der unterrichtlichen Behandlung nur auf die Pflichtinhalte dieses Lehrgangs, so ist es möglich, dass Teile des Lehrganges entsprechend angepasst werden müssen. An einigen zentralen Stellen des Lehrganges wurde dies berücksichtigt und Alternativen angeboten.

Alle vorgestellten Experimente sind erprobt und funktionsfähig. Fehler oder Ungenauigkeiten in der Beschreibung sind jedoch möglich.

Links zeigen entweder auf öffentlich zugängliche Seiten im Internet oder auf erprobtes Unterrichtsmaterial, das im Ordner „Material zum Skript“ abgelegt sind. Diese Unterrichtsmaterialien sollten in jedem Fall an die eigenen Bedürfnisse und an den Kenntnisstand der Schülerinnen und Schüler angepasst werden. Aufgrund vieler Beschränkungen durch Urheberrechtsgesetze konnte umfangreiches im Unterricht eingesetztes Material nicht angefügt werden. Oft wird hier auf ähnliche oder benutzte Materialien in Schulbüchern oder aus dem Internet verwiesen.

Damit die Links funktionieren, sollte das Skript zusammen mit dem Ordner „Material zum Skript“ auf die oberste Ebene der Festplatte (z.B. unter C:/) abgelegt werden.

Das Skript ist stetigen Veränderungen unterworfen und wird am Seminar Tübingen sorgsam gepflegt, an den eigenen Unterricht und an neue Anforderungen angepasst und ständig aktualisiert. Bemerkungen, Hinweise und Kommentare sind erwünscht: [renner.michael@kabelbw.de](mailto:renner.michael@kabelbw.de)

Besonderer Dank gilt meinem Kollegen Werner Schich vom Seminar Tübingen, ohne dessen kompetente Hilfe und Unterstützung die Weiterentwicklung dieses Skriptes nicht möglich gewesen wäre.

# Schulbücher

Im Manuskript wird auf folgende Schulbücher Bezug genommen:

<b>DMb</b>	Dorn-Bader, Physik <b>Mittelstufe</b> , Ausgabe B, <b>blauer</b> Einband, Schroedel 86 250
<b>DMr</b>	Dorn-Bader, Physik <b>Mittelstufe/Sekundarbereich I</b> <b>roter</b> Einband, Schroedel 86 260
<b>D7/8</b>	Dorn-Bader, Physik 1, Gymnasium <b>7/8</b> Schroedel 86 264
<b>DB1</b>	
<b>D9/10</b>	Dorn-Bader, Physik 2, Gymnasium <b>9/10</b> Schroedel 86 2654
<b>DB2</b>	
<b>DOW</b>	Dorn-Bader, Physik Oberstufe Gesamtband 12/13, <b>weißer</b> Einband (nicht mehr lieferbar) Schroedel 86205
<b>DP1</b>	Duden – Paetec, Lehrbuch Physik <b>1</b> BW G, Klassen 7/8, ISBN: 978-3-89818-563-9
<b>DP2</b>	Duden – Paetec, Lehrbuch Physik <b>2</b> BW G, Klassen 9/10, ISBN: 978-3-89818-567-7
<b>DK</b>	Selbstverständlich Physik, <b>Kursstufe</b> Baden-Württemberg, Duden Schulbuchverlag, ISBN: 978-3-8355-3130-7
<b>C1</b>	Physik für Gymnasien <b>1</b> (Einführung, Mechanik I, Elektrizitätslehre I) Länderausgabe BW, Cornelsen Nr. 60136
<b>C3</b>	Physik für Gymnasien <b>3</b> (Elektrizitätslehre II, Struktur der Materie, Mechanik II) Länderausgabe BW, Cornelsen Nr. 60152
<b>CF1</b>	Fokus Physik Band <b>1</b> Cornelsen Nr. 85281
<b>CF2</b>	Fokus Physik Band <b>2</b> Cornelsen Nr. 85282
<b>GBM</b>	Gross-Berhag Mittelstufe, Ausgabe BW, Klett Verlag 7781
<b>I7/8</b>	Impulse Physik 1, für die Klassen <b>7/8</b> Klett-Verlag 772452
<b>I9/10</b>	Impulse Physik 2, für die Klassen <b>9/10</b> Klett-Verlag 772453
<b>K</b>	Kuhn, Physik Band 1, Mittelstufe, Westermann 152121
<b>SP1</b>	Spektrum Physik <b>1</b> – Neubearbeitung, Baden – Württemberg 7/8 Schroedel 86334
<b>SP2</b>	Spektrum Physik <b>2</b> – Neubearbeitung, Baden – Württemberg 9/10 Schroedel 86334
<b>U1</b>	Universum <b>1</b> Physik, Baden-Württemberg, Cornelsen-Verlag, ISBN 978-3-06-420080-7

# Inhaltsverzeichnis

<b>Magnetismus.....</b>	<b>1</b>
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>1</b>
Bildungsplan 2004.....	1
<i>Naturphänomene.....</i>	<i>1</i>
<i>Kompetenzen und Inhalte zu Naturphänomene Klasse 6: .....</i>	<i>1</i>
<i>Kompetenzen und Inhalte Physik Klasse 8:.....</i>	<i>1</i>
Stoffauswahl und Gewichtung.....	1
<i>Möglicher Stoffverteilungsplan.....</i>	<i>1</i>
Elementarmagnete-Modell .....	1
<i>Kritik am Elementarmagnetmodell.....</i>	<i>1</i>
<i>Empfehlung der Kritiker .....</i>	<i>2</i>
<i>Didaktische Bewertung .....</i>	<i>2</i>
Experimentelle Hinweise:.....	2
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>2</b>
Magnete und ihre Eigenschaften (P).....	2
Magnetisierung (P), Elementarmagnetmodell (W).....	3
Magnete und ihre Eigenschaften (P).....	4
Das magnetische Feld (P).....	4
<b>Allgemeine Bemerkungen zur Elektrizitätslehre.....</b>	<b>6</b>
<b>Fachwissenschaftliche Bemerkungen.....</b>	<b>6</b>
Elektrische Stromstärke und Ladung.....	6
Elektrische Spannung, elektrisches Potenzial.....	6
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>7</b>
<b>Allgemeine fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>7</b>
Pädagogische Leitlinien .....	7
Das Kommunikationsproblem .....	7
<i>Die Bedeutung einiger Begriffe der Elektrizitätslehre in der Umgangssprache und Fachsprache.....</i>	<i>7</i>
<i>Ladung.....</i>	<i>7</i>
<i>Der elektrische Strom.....</i>	<i>8</i>
<i>Das elektrische Potenzial.....</i>	<i>8</i>
<i>Die elektrische Spannung.....</i>	<i>8</i>
<i>Der elektrische Widerstand.....</i>	<i>9</i>
<i>Konsequenzen für den Sprachgebrauch .....</i>	<i>9</i>
Die Genderproblematik.....	9
<b>Allgemeine methodische Bemerkungen.....</b>	<b>10</b>
Veranschaulichung der Vorgänge im elektrischen Stromkreis.....	10
<i>Anforderungen und Grenzen.....</i>	<i>10</i>
<i>Wassermodelle.....</i>	<i>10</i>
<i>Einfache Modelle.....</i>	<i>10</i>
<i>Komplexe Modelle.....</i>	<i>10</i>
<i>Einfaches Wassermodell.....</i>	<i>11</i>
<i>Tübinger Wassermodell.....</i>	<i>11</i>
<i>Andere Wassermodelle.....</i>	<i>11</i>
<i>Andere Modelle .....</i>	<i>12</i>
<i>Ungeeignete Modelle .....</i>	<i>12</i>
Gefahren des elektrischen Stromes.....	12
DIN - Schaltzeichen .....	12
Schülerexperimente.....	12
Versuchsaufbauten.....	12

<b>Stoffauswahl.....</b>	<b>13</b>
Bildungsplan.....	13
<i>Naturphänomene.....</i>	13
<i>Kompetenzen und Inhalte zur Elektrizitätslehre Klasse 7/8.....</i>	13
Schulbuchvergleich.....	13
<i>Klasse 7/8.....</i>	13
<i>Kompetenzen und Inhalte zur Elektrizitätslehre für die Klasse 9/10.....</i>	15
Schulbuchvergleich.....	15
<i>Klasse 9/10.....</i>	15
Diskussion wichtiger Aspekte.....	16
<i>Stoffumfang.....</i>	16
<i>Wirkungen des elektrischen Stromes.....</i>	16
<i>Technische Anwendungen.....</i>	16
<i>Elektrische Ladung.....</i>	16
<i>Elektrische Stromstärke.....</i>	17
<i>Elektrisches Potenzial, elektrische Spannung.....</i>	17
<i>Messen.....</i>	18
<i>Elektrostatik - Elektronenvorstellung.....</i>	18
<i>Ohm'sches Gesetz – elektrischer Widerstand, Schaltung von Widerständen.....</i>	19
Mögliche Stoffanordnung.....	19
Klasse 7/8.....	19
Klasse 9/10.....	20
Verbindliche Inhalte.....	20
<b>Lehrgangsskizze in Klasse 7/8.....</b>	<b>21</b>
<b>Der elektrische Stromkreis – Strom, Antrieb (Ursache), Widerstand – Begriff der elektrischen Ladung (P)</b>	<b>21</b>
<i>Leiter und Isolator (P).....</i>	22
<i>Anschlüsse der Quelle (W).....</i>	22
Energieübertragungsanlagen - Beschreibung elektrischer Energietransporte (P).....	22
Wirkungen des elektrischen Stromes (P).....	24
<i>Die Wärmewirkung.....</i>	24
<i>Die magnetische Stromwirkung.....</i>	25
Die elektrische Stromstärke (P).....	25
<i>Das Hitzdrahtinstrument .....</i>	26
<i>Das Drehspulinstrument .....</i>	26
<i>Kalibrieren der Skala (W).....</i>	26
Elektrische Stromstärke und elektrische Ladung (P).....	27
<i>Bemerkung: Die elektrische Ladung muss in Klasse 7/8 nur qualitativ behandelt werden.....</i>	27
Der Antrieb des elektrischen Stromes: Elektrisches Potenzial, elektrische Spannung (P).....	28
<i>Der Nullpunkt des Potenzials – Darstellung von Potenzialen (P).....</i>	29
<i>Viele Übungen: Potenziale und Potentialdifferenzen bestimmen, in Schaltungen Potenziale farbig kennzeichnen (vgl. [DB1, S. 201 und S. 219]).....</i>	30
<i>Die Nennspannung (W).....</i>	30
<i>Analogien.....</i>	30
<i>Reihen- und Parallelschaltung elektrischer Quellen (W).....</i>	30
<b>Das Ohm'sche Gesetz, der elektrische Widerstand.....</b>	<b>32</b>
<b>Fachwissenschaftliche Bemerkungen.....</b>	<b>32</b>
Das Ohm'sche Gesetz.....	32
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>32</b>
Vorgehen .....	32
Gefährliche Stromstärken und Spannungen.....	33
Experimentelle Hinweise.....	33
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>33</b>

Das Ohm'sche Gesetz (W) - Der elektrische Widerstand (P).....	33
<i>Eigenständige Erarbeitung mit selbstständiger Planung eines Experiments:   ☛ Ohm'sches Gesetz (Experimente planen Beispiele.doc).....</i>	33
Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands (W).....	34
Widerstand von Drähten, Anwendungen (W).....	34
Kennlinien von elektrischen Geräten bzw. Bauteilen (P).....	35
<i>Die Schülerinnen und Schüler haben nun genügend Grundkenntnisse, um erste U-I-Kennlinien von Geräten in einem Praktikum selbstständig aufzunehmen. Es bieten sich folgende Geräte bzw. Bauteile an:.....</i>	35
☛ Praktikum U-I-Kennlinien 2: Praktikum_U_I_Kennlinien_2.doc .....	35
Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen (P).....	35
<b>Elektrostatik.....</b>	<b>36</b>
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>36</b>
Bildungsplan 2004.....	36
<i>Im Bildungsplan findet man keinen Hinweis auf die Elektrostatik. Weder das Vorzeichen der Ladung, noch die Begriffe Neutralisation und Influenz werden genannt. Auch das Elektron wird nicht erwähnt. ....</i>	36
Stoffauswahl und Gewichtung.....	36
<i>Im Hinblick auf die Behandlung des elektrischen Feldes bereits in der Mittelstufe wird man nicht umhin kommen, zumindest folgende Themen zu behandeln:.....</i>	36
Faraday-Käfig.....	36
Der glühelektrische Effekt.....	36
<i>Gedankengang.....</i>	36
<i>Edison - Effekt.....</i>	36
<i>Elektron.....</i>	37
<i>Methodische Tipps.....</i>	37
Die Braun'sche Röhre.....	37
<i>Gedankengang.....</i>	37
<i>Karl Ferdinand Braun (1850 - 1918) .....</i>	37
Elektronenleitung in Metallen.....	37
Schülerversuche zur Elektrostatik.....	37
<i>Die Fa. Mekruphy bietet eine Schülerversuchskasten „Elektrik 2“ zum Thema „Ladungen und Felder, elektromagnetische Induktion“ an. Dieser Experimentierkasten enthält u.a. eine Elektroskop, Woll- und Seidentuch, PVC-Stäbe, Acrylglasstab sowie Glimmlampe mit Sockel für Elektrostatikversuche. Damit können einige der in der Lehrgangsskizze genannten Versuche auch von den Schülerinnen und Schülern selbstständig durchgeführt werden. Die Experimente gelingen auch bei hoher Luftfeuchtigkeit. ....</i>	37
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>38</b>
Zwei Arten elektrischer Ladung – Kräfte zwischen Ladungen (P).....	38
Neutralisation und Influenz (W).....	39
<i>Alternativ: Planarbeit zu Influenz und elektrostatischer Aufladung.....</i>	39
Der glühelektrische Effekt, Elektronen (W).....	39
Elektrostatik im Elektronenbild (W).....	40
Braun'sche Röhre (W).....	40
Elektronenleitung in Metallen (W).....	40
Ionenleitung (W).....	41
<i>Stromrichtung (W).....</i>	43
<b>Elektrizitätslehre in Klasse 9/10</b>	
<b>Das elektrische Feld.....</b>	<b>44</b>
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>44</b>
Bildungsplan 2004.....	44
<i>Kompetenzen und Inhalte für die Klasse 9/10.....</i>	44
Stoffauswahl und Gewichtung.....	44
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>44</b>
Das elektrische Feld in Analogie zum Magnetfeld (P).....	44

<b>Elektrische Spannung, Energie, Leistung.....</b>	<b>48</b>
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>48</b>
Bildungsplan 2004.....	48
Stoffauswahl und Gewichtung.....	49
Die elektrische Spannung.....	49
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>52</b>
Elektrische Energie (P) – Energetischer Aspekt der elektrischen Spannung (W).....	52
<b>Elektromotor.....</b>	<b>58</b>
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>58</b>
Bildungsplan 2004.....	58
<i>Kompetenzen und Inhalte für die Klassenstufe 7/8.....</i>	<i>58</i>
Stoffauswahl und Gewichtung.....	58
<i>Grundlagen – Anwendungen .....</i>	<i>58</i>
<i>Schulbuchvergleich.....</i>	<i>58</i>
<i>Unverzichtbare Lernziele.....</i>	<i>59</i>
<i>Handlungsorientierter Unterricht.....</i>	<i>59</i>
<i>Historische Aspekte.....</i>	<i>59</i>
<i>Einstiegsvarianten.....</i>	<i>59</i>
<i>Bewertung der Unterrichtsmethode.....</i>	<i>59</i>
<i>Zeitbedarf.....</i>	<i>59</i>
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>60</b>
Der Elektromotor (P).....	60
<b>Generator, Transformator – Elektromagnetische Induktion.....</b>	<b>62</b>
<b>Fachwissenschaftliche Bemerkungen.....</b>	<b>62</b>
Lorentzkraft – Kraft auf stromdurchflossenen Leiter.....	62
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>62</b>
Bildungsplan 2004.....	62
Stoffauswahl und Gewichtung.....	62
<i>Grundlagen – Anwendungen .....</i>	<i>62</i>
<i>Schulbuchvergleich.....</i>	<i>63</i>
<i>Stoffauswahl und Gewichtung.....</i>	<i>63</i>
<i>Für die Erfüllung des Bildungsplans und die KMK-Standards unverzichtbare Inhalte.....</i>	<i>63</i>
<i>Für einen gymnasialen Bildungsgang unverzichtbar erscheinende Inhalte.....</i>	<i>63</i>
<i>Historische Aspekte.....</i>	<i>64</i>
<i>Einstiegsvarianten.....</i>	<i>64</i>
<i>Unterrichtsmethode.....</i>	<i>64</i>
<i>Zeitbedarf.....</i>	<i>64</i>
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>64</b>
Der Generator (P) - Elektromagnetische Induktion (W).....	64
Der Transformator (P).....	66
Elektrische Energieübertragung – Generator und Transformator (P).....	68
<b>Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen.....</b>	<b>72</b>
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>72</b>
Bildungsplan 2004.....	72
Stoffanordnung und Gewichtung.....	72
<i>Bedeutung.....</i>	<i>72</i>
<i>Reihenfolge.....</i>	<i>72</i>
<i>Methodenkompetenz.....</i>	<i>73</i>
<i>Durchführung der Schülerversuche .....</i>	<i>73</i>
Ersatzwiderstand.....	73

Reihenschaltung von Widerständen.....	73
<i>Methode</i> .....	73
<i>Denkschwierigkeiten</i> .....	73
Potenzial, Potenziometerschaltung.....	74
Vorwiderstand.....	74
<b>Lehrgangsskizze .....</b>	<b>75</b>
Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen (P).....	75
<i>Ersatzwiderstand der Parallelschaltung</i> .....	77
Reihenschaltung von Widerständen (P).....	77
<i>Übungen: [DB1, S. 213, S. 215, mit Potenzial: S. 219], [U1, S. 273], [I1, S. 222]</i> .....	78
<i>Zusammenfassung: ☛ Reihen_und_Parallelschaltung.docx</i> .....	78
<i>Vertiefung: Potenzial, Potenziometerschaltung (W)</i> .....	78
<i>Der Vorwiderstand (W)</i> .....	78
Anwendungen (W).....	79
<i>Schülerexperimente</i> .....	79
<i>Berechnung einfacher Netzwerke</i> .....	79
<i>Messbereichserweiterung</i> .....	79
<b>Elektronische Schaltungen .....</b>	<b>80</b>
<b>Fachwissenschaftliche und methodische Bemerkungen.....</b>	<b>80</b>
Reine Halbleiter und die Halbleiterdiode.....	80
<i>Leitungsmechanismen</i> .....	80
<i>Vorgänge am pn-Übergang</i> .....	80
<i>Die Vorgänge am Metall – Halbleiter – Übergang</i> .....	81
<i>Planartechnik</i> .....	81
<i>Diodenkennlinie</i> .....	81
<b>Methodische und fachdidaktische Bemerkungen.....</b>	<b>82</b>
Bildungsplan 2004.....	82
Stoffauswahl und Gewichtung.....	82
<i>Bedeutung des Themas</i> .....	82
<i>Bipolarer Transistor kontra Feldeffekttransistor</i> .....	82
<i>Der Feldeffekt-Transistor</i> .....	82
<i>Der bipolare Transistor</i> .....	82
<i>Stoffanordnung</i> .....	83
<i>Schulbuchvergleich</i> .....	83
<i>Klasse 9/10</i> .....	83
<i>Stoffauswahl und Gewichtung</i> .....	85
<i>Unverzichtbare Inhalte</i> .....	85
<i>Historische Aspekte</i> .....	85
<i>Einstiegsvarianten</i> .....	85
<i>Unterrichtsmethoden</i> .....	86
<i>Zeitbedarf</i> .....	86
<b>Lehrgangsskizze.....</b>	<b>86</b>
Die Halbleiterdiode als richtungsabhängiger Widerstand (P).....	86
<i>Die Solarzelle (P)</i> .....	87
Reine Halbleiter (W).....	87
☛ <i>Praktikum Widerstandsmessung (NTC-Widerstand): Praktikum_Widerstandsmessung.docx</i> .....	88
Die Dotierung von Halbleitern (W).....	88
(Will man die Effekte im FET erklären, ist ein Verständnis von p- und n-Leitung erforderlich.).....	88
Aufbau einer Halbleiterdiode und Erklärung der Ventilwirkung (W) .....	88
Der Transistor als steuerbarer Widerstand (P) – Feldeffekttransistor, kurz FET (W) .....	88
<i>Aufbau und Funktionsweise eines FET (W)</i> .....	88
<i>(funktionale Beschreibung genügt)</i> .....	88
<i>Kennlinien eines FET (W)</i> .....	89

<i>Anwendungen des Feldeffekttransistors zum Steuern als Sensor und Verstärker (W).....</i>	<i>89</i>
<i>(Möglichkeit für die Behandlung einfacher elektronischer Schaltungen) .....</i>	<i>89</i>



# Magnetismus

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Bildungsplan 2004

#### Naturphänomene

#### Kompetenzen und Inhalte zu Naturphänomene Klasse 6:

**2. Themenkreis Magnetismus und Elektrizität:** Die SuS können magnetische und nichtmagnetische Materialien nennen und unterscheiden; durch eigene Experimente zeigen, dass es unterschiedliche Magnetpole gibt und diese nicht als Einzelpole vorkommen.

#### Kompetenzen und Inhalte Physik Klasse 8:

##### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

- a) Die SuS können elementare Erscheinungen in der Natur und wichtige Geräte funktional beschreiben.
- b) Die SuS können physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einsetzen.

Inhalte:

Erde: Erdmagnetfeld

### Stoffauswahl und Gewichtung

Inhalte der kurzen Einheit Magnetismus in der Mittelstufe sind

Magnete und ihre Wirkungen, die zwei Pole, Abstandsabhängigkeit der Kräfte,

Regeln für Anziehung und Abstoßung, Name der Pole, Zusammenwirken von Magnetpolen

Magnetisieren, Modellvorstellung

2 Std.

Magnetfeld, Feldlinienbilder

2 Std.

Erdmagnetfeld

1 Std.

Wurde der erste Themenkomplex den Forderungen des Bildungsplans entsprechend in Naturphänomenen behandelt, so kann man sich hier auf eine Wiederholung beschränken, die die Schüler auch selbstständig als Planarbeit oder Hausaufgabe erledigen können.

Schwerpunkt dieser Einheit ist das magnetische Feld. Seine Behandlung wird nicht ausdrücklich vom Bildungsplan gefordert. Allerdings soll als Anwendung das Erdmagnetfeld behandelt werden und das setzt die Kenntnis des magnetischen Feldes voraus.

In den Kompetenzen und Inhalten zur Klasse 10 wird dann bei 9. Strukturen und Analogien die qualitative Beschreibung von Feldern (Gravitationsfeld, magnetisches Feld, elektrisches Feld) gefordert. Man wird dort das Gelernte aus Klasse 8 reaktivieren (fördert die Nachhaltigkeit) und auf das Gravitationsfeld und elektrische Feld übertragen. Das bedeutet, dass bereits hier in Klasse 8 das magnetische Feld so erarbeitet werden muss, dass es später auf die anderen Felder übertragen werden kann.

### Möglicher Stoffverteilungsplan

Reaktivierung der Inhalte zum Magnetismus aus den Naturphänomenen

1 Std.

Magnetisches Feld, Feldlinienbilder

2 Std.

Erdmagnetfeld

1 Std.

### Elementarmagnete-Modell

#### Kritik am Elementarmagnetmodell<sup>1</sup>

Da sich die Schüler die Elementarmagnete dank der schönen Bilder in den Lehrbüchern sehr konkret vorstellen, kommen sie schnell in große Schwierigkeiten: Typische Schülerprobleme: Wieso brechen die Stricknadeln beim Drehen der Elementarmagnete nicht auseinander? Wieso spreizen sich die Enden von Magneten nicht auf? Wieso

<sup>1</sup> W. Franzbecker: Elementarmagnete und Magnetismus, Ph.u.D. 3/1976, S. 157-165;

V. Hagemeyer: Das Elementarmagnetmodell in der Mittelstufe, MNU 4/78. S.212f

kann man die Elementarmagnete nicht sehen? Irgendwann muss man doch so einen Elementarmagneten zerteilen können.

Die Schüler kennen schon ein Teilchenmodell mit Atomen und Molekülen als kleinsten Teilchen der Materie. Es ist nicht möglich, das neue Teilchenmodell der Elementarmagnete experimentell begründet mit dem schon bekannten zu verbinden.

Der starke Einfluss der Kohlenstoffatome beim Stahl bleibt unverständlich. Es bleibt unverständlich, was "Umklappen" der Elementarmagnete bedeutet.

Die Modellvorstellungen lassen sich in SII kaum so erweitern, dass sie den Anschluss an den derzeitigen Kenntnisstand der Fachwissenschaft liefern: Will man in der Oberstufe die Weiß'schen Bezirke als die früher bezeichneten Elementarmagnete ausweisen, so ergeben sich folgende Inkongruenzen: Der Übergang vom magnetischen zum nichtmagnetischen Zustand erfolgt nicht durch Zunahme der Entropie, sondern durch Verminderung der Gesamtenergie des Kristalls. Und: Die Magnetisierung erfolgt in erster Linie nicht durch Drehung der Magnetisierung der Weiß'schen Bezirke, sondern durch Blochwandverschiebungen.

## Empfehlung der Kritiker

In SI Beschränkung auf die Phänomenologie. Teilchenmodelle, ausgehend vom Paramagnetismus und fortschreitend zum Ferromagnetismus erst in SII erörtern.

## Didaktische Bewertung<sup>2</sup>

Gegen die Empfehlung der Kritiker spricht, dass die Schüler eine Erklärung für die geheimnisvollen Eigenschaften der Magnete haben wollen und dass sie sich mit einer rein phänomenologischen Beschreibung nicht zufrieden geben. Außerdem lesen sie zu Hause nach und stellen im Unterricht dann diesbezüglich Fragen.

Auch wenn die Schüler nicht vorauslesen, entwickeln sie, angeregt durch das sukzessive Zerbrecen des magnetisierten Stahlstabs, von selbst ein „Elementarmagnete - Modell“. Dies sollte man nicht als falsch erklären, sondern es als erstes grobes Modell akzeptieren.

Im weiteren Verlauf der Diskussion setzen die Schüler oft in Gedanken das Teilen des Stahlstabs bis auf die kleinsten Teilchen (Atome) fort und schließen daraus, dass diese Atome selbst die Magnetpole besitzen müssen und dass man letztlich nur diese Atome als „Elementarmagnete“ bezeichnen kann.

An dieser Stelle kann man die Diskussion beenden. Will man noch mehr tun, so kann man ein differenzierteres Modell mit angedeuteten Weiß'schen Bezirken besprechen. [Magnet Modell](#)

Nach der Besprechung der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes in Klasse 8 kann man erneut das Elementarmagnetmodell aufgreifen und die Vorstellung Ampères von „Molekularströmen“ erörtern.

In der Kursstufe wird man dann die wissenschaftlich korrekte Beschreibung des Ferromagnetismus vornehmen und klarstellen, dass es sich beim Ferromagnetismus um eine besondere Form des Spin-Paramagnetismus handelt, bei dem es auf den Spin der Elektronen in der Elektronenhülle und deren gegenseitige Beeinflussung im Kristallgitter ankommt.

Falls man das Elementarmagnetmodell bespricht, sollte man nicht von schwerer oder leichter Drehbarkeit irgendwelcher Teilchen sprechen, um Unterschiede bei der Magnetisierbarkeit zu deuten und die Elementarmagnete nicht allzu konkret darstellen.

## Experimentelle Hinweise:

Stahlstricknadeln sterben aus und sind auch recht ungeeignet, weil sie zu stabil sind. Beste Wahl: Laubsägeblätter. Zum Entmagnetisieren stets Spule mit 600 Wi (1000 Wi) an 24 V AC bereithalten.

## Lehrgangsskizze

*Inhalt von Naturphänomenen<sup>3</sup>*

## Magnete und ihre Eigenschaften (P)

Einstiegsvarianten:

- Wir werden uns mit einem neuen Gebiet beschäftigen: Magnetismus. Was weißt du über Magnete? Welche Fragen und Probleme interessieren dich in diesem Zusammenhang?
- **V: Magnetisches Spielzeug**

<sup>2</sup> Siehe auch . Kuhn: Das Elementarmagneten - Modell, PdN-Ph. 8/44. Jg. W 1995

<sup>3</sup> Bei Behandlung in den Naturphänomenen entfällt dieser Teil und reduziert sich auf eine geeignete Wiederholung und Präzisierung.

- Technische Anwendungen wie z.B. die Magnetschwebbahn<sup>4</sup>.
- Ergebnis: Man sollte mehr über Magnete und ihre Wirkungen wissen.

Problem: Wir haben kein Sinnesorgan für magnetische Wirkungen. Wir benötigen zu ihrer Untersuchung Testkörper.  
Erinnerung an das Pendelkugeln als Testkörper zum Nachweis von Schwingungen der Schallquelle in Akustik.

Erarbeiten einer geeigneten Vorgehensweise:

Untersuchung der Wirkung von Magneten auf Körper, die keine Magnete sind:

**SV:** Dazu und auch zur Abstandsabhängigkeit der Kräfte.

**Oder SV mit Euromünzen** [☞ BestandteileEuro.doc](#)

Ergebnis: Man beobachtet Anziehung zwischen Magneten und Eisen, Nickel und Kobalt, sog. **ferromagnetischen Stoffen**. Je kleiner der Abstand, desto größer die magnetischen Kräfte. Keine Wechselwirkung zwischen Magneten und Cu, Pb,.... Silber. Gold,....

Folgerung: Geeignete Testkörper: Kleine Eisenstücke, Nägel, Eisenfeilspäne.

**V:** Anwendung: Nachweis, dass es sich bei einem Magnetstein um einen magnetischen Körper handelt.

Untersuchung eines Magneten mit Testkörpern:

**V:** Großen Magneten in Eisennägel tauchen.<sup>5</sup>

Ergebnis: Die magnetischen Kräfte sind nicht an allen Stellen des Magneten gleich stark. Die Stellen stärkster magnetischer Wirkung heißen **Pole**.

Frage: Sind die magnetischen Pole gleichartig oder verschiedenartig.

Erörterung: Für alle verwendeten Testkörper sind sie gleichartig. Aber Magnete können sich auch abstoßen.

Wechselwirkung zwischen Magneten:

**V:** Abstoßung zwischen Magneten demonstrieren. Die Schüler selbst spüren lassen.

**V:** Drei Stabmagneten (z.B. LEU) ohne Farbmarkierung. Bei zwei Magneten die bezüglich einem Pol des dritten Magneten gleichartigen Pole mit Tesaband markieren. Dann beim dritten Magneten zeigen, dass er keine weiteren andersartigen Pole hat.

Ergebnis: Es gibt zwei Arten von Polen. Gleichartige Pole stoßen sich ab, ungleichartige ziehen sich an.

**V:** Einen der Magneten frei drehbar aufhängen.

Namengebung.

Farbcode: rot - nord; süd - grün. Früher: rot - heiß - Süden - Südpol; blau - kalt - Nordpol.

Neue Testkörper: Magnetnadeln.

**V:** Magnetnadeln zeigen, auch kardanisch aufgehängte.

Frage: Wenn es zwei Arten von Polen gibt, können sie sich dann in ihrer Wirkung aufheben?

**V:** Zusammenwirken von Magnetpolen **D7/8** 146, B1

Ergebnis: Gleichartige Pole verstärken sich, ungleichartige Pole schwächen sich in ihrer Wirkung nach Außen hin.

## Magnetisierung (P), Elementarmagnetemodell (W)

**SV:** Magnetisieren eines unmagnetischen Laubsägeblatts. Zerteilen, ...<sup>6</sup>

Ergebnis: Es gibt keine magnetischen Monopole.

Erklärung mit einer geeigneten Modellvorstellung zum Magnetismus.

**V:** Demonstration magnetischer Bezirke mit Mikroobjekt<sup>7</sup> (siehe Darstellungen Weiß'scher Bezirke in der Fachliteratur)

Mögliche Information für die Schüler [☞ Magnet Modell](#)

<sup>4</sup> Kostenloses Video über die Magnetschwebbahn erhältlich bei der Thyssen Transrapid System GmbH, Henschelplatz 1, 34127 Kassel, Tel. 0561/801-6448

<sup>5</sup> Magneten und Nägelgröße müssen aufeinander abgestimmt sein. Magnet noch ohne farbige Enden und möglichst schwach. Nägel eher größer.

<sup>6</sup> **D7/8** S 165 V2

<sup>7</sup> Wurde unter der Nr. 11819.00 von PHYWE vertrieben, **leider nicht mehr lieferbar**

Alternativer Lehrgang mit Lernzirkel

Die Wiederholung der Inhalte aus Naturphänomenen sowie die Erarbeitung der weiteren zu behandelnden Inhalte können in einem Lern- und Praktikumszirkel von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden.

☛ Lernzirkel zum Magnetismus: Magnetismus.docx

Zeitdauer: 5 - 6 Unterrichtsstunden

Sozialform: Partnerarbeit

Der Lernzirkel besteht aus elf Praktikumsstationen 1 – 11 und vier Lesestationen A – D sowie einigen Leerstationen und einem Laufzettel. Die Lesestationen beziehen sich auf [DB1].

Dieser Lernzirkel wurde für eine Gruppe von 32 Schülerinnen und Schülern entwickelt. Die Lesestationen können mehrfach ausgelegt werden, so dass mehrere Teams gleichzeitig arbeiten können. Die Schülerinnen und Schüler arbeiten in Partnerarbeit und fertigen einen eigenen Heftaufschrieb an. Jedes Team darf einmal eine Leerstation aufsuchen, um Versäumtes im Heft nachzutragen. Für jede Praktikumsstation wurde eine Zeit von 10 min veranschlagt, eine Lesestation benötigt 20 min.

Schwierigkeiten: Die Praktikumsstationen 3, 4, 5 und 9 sowie die Lesestation B und D beschäftigen sich insbesondere mit neuem Stoff, dem „Magnetfeld“. Für das Verständnis der Schülerinnen und Schüler wäre eine festgelegte Reihenfolge der Abarbeitung sinnvoll: B – 3 – 4 – 5 – D – 9 oder 3 – 4 – B – 5 – D – 9. Dies setzt jedoch voraus, dass die anderen Stationen in ausreichender Anzahl – je nach Klassenstärke – vorhanden sind. Aus organisatorischen Gründen wurde der Lernzirkel jedoch ohne diese Vorgabe erprobt. Der Lehrer stand den Schülerinnen und Schülern bei schwierigen Stationen helfend zur Seite.

Weitere Schülerversuche zum Magnetismus

Zum Beispiel: [U1, S. 231, S. 235]

Lehrgang**Magnete und ihre Eigenschaften (P)**

Selbstständige Wiederholung des Stoffs aus den Naturphänomenen  
Präzisierung durch den Lehrer

Alternativer Lehrgang mit Lernzirkel (siehe oben)**Das magnetische Feld (P)**

Leitproblem: Wir untersuchen nun Größe und Richtung der magnetischen Kräfte in der Umgebung eines Dauermagneten.

**V:** Magnetnadel an verschiedene Punkte in der Umgebung eines Magneten stellen.

Ergebnis: Größe und Richtung der Kräfte auf die Nadel ändert sich, wenn man sie im Raum verschiebt.

**V:** Magnet verschieben, Nadel stehen lassen.

**V:** Nadel mit dem Magneten verschieben.

Ergebnis: Um den Magneten herum wirken die gleichen Kräfte wie vorher, nur jetzt an einer anderen Stelle im Raum, weil sich der Magnet an einer anderen Stelle im Raum befindet.

Folgerung: Der Magnet ist mit etwas fest verbunden, das seine Umgebung verändert: Es ist die Möglichkeit, auf Magnetpole in seiner Umgebung Kräfte auszuüben. Man sagt, der Magnet sei von einem magnetischen Feld umgeben.

**V:** Magnetnadel unter dem Rezipienten. [D7/8] S. 168, V1

Ergebnis: Das magnetische Feld existiert auch im Vakuum.

Merksatz: Werden in allen Punkten eines Raumgebiets auf Magnetpole Kräfte ausgeübt, so sagt man, dort bestehe ein magnetisches Feld. Jeder Dauermagnet ist von einem magnetischen Feld umgeben, das er mit sich mitnimmt, wenn man ihn verschiebt.

Neue Aufgabe: Es soll Richtung und Größe der magnetischen Kräfte in der Umgebung eines Stabmagneten untersucht werden. Pole, mit denen man das Feld untersucht, nennen wir Probepole, den Magneten, dessen Feld untersucht wird, nennen wir felderzeugenden Magneten.

Problem 1: Probepole hat zwei Pole. Dadurch Untersuchung kompliziert. Lösung: Ein "Probenordpol".

Problem 2: Es gibt keine. Lösung: Man bringt den anderen Pol weit weg.

Problem 3: Wie macht man die Kraft sichtbar? Lösung: Probenordpol beweglich machen.

**V:** [D7/8 S. 168 V2], schräg gestellter Spiegel oder FS-Kamera: Am besten: Versuchsaufbau „von oben“ mit der Schwanenhalskamera und einem Beamer an die Wand projizieren

Vor der Durchführung fragen: Was für eine Bewegung des Probenordpols erwartest du?

S: Geradlinig auf den Südpol zu.

**V:** Stricknadel schwimmen lassen, Bahn mit Beamer an Tafel projizieren, ein Schüler malt die Bahn mit Kreide an der Tafel nach.

Erklärung der gekrümmten Bahn: Die gleichzeitige Einwirkung zweier Kräfte in verschiedene Richtungen wirkt sich so aus, als ob nur eine Kraft in Richtung der Bahn wirken würde. Im Tafelbild: 1. Feldlinie. Richtung der Feldlinie ist die Bewegungsrichtung eines Probenordpols. 2. Kraft auf Probenordpol stets tangential zur Feldlinie.

Merksatz: Linien, auf denen sich ein frei beweglicher "Probenordpol" bewegt, wenn er der magnetischen Kraft folgen kann, heißen magnetische Feldlinien. Feldlinienrichtung: Bewegungsrichtung des Probenordpols. In jedem Punkt wirkt die magnetische Kraft auf den Probenordpol stets tangential zur Feldlinie.

Problem: Um mehrere Feldlinien darzustellen, sollte man eine bequemere und genauere Methode haben.

Idee: Mit Magnetnadeln.

Frage: Wie benimmt sich eine Magnetnadel an einer Stelle der Feldlinie?

**V:** Glasplatte auf das Gefäß legen. Mit Magnetnadel an der zuvor gezeichneten Feldlinie entlangfahren oder mehrere kleine Magnetnadeln an der zuvor an die Tafel projizierten und nachgezeichneten Feldlinie aufstellen.

Ergebnis: Die Magnetnadel stellt sich stets tangential zur Feldlinie durch ihren Fußpunkt ein.

**V:** Schwachen Magneten auf das Magnetnadelmodell von Leybold legen.

L: Mit noch mehr Magnetnadeln kann man die Feldlinien noch deutlicher sehen. Wie? Eisenfeilspanmethode erläutern (Influenz, Orientierung, Kettenbildung)

**V:** Feldlinienbild des Stabmagneten ergänzen, Hufeisenmagnet: "homogenes Feld". Räumliches Feldlinienbild, Eintauchen eines Stabmagneten in Eisenfeilspäne.

Unterschied zwischen dem Eisenfeilspänebild und dem gezeichneten Feldlinienbild erläutern: Feldlinien sind durchgezogene Linien. Nur so viele zeichnen, dass die Struktur des Feldes deutlich wird.

**V:** Feldlinienbilder zweier (mehrerer) etwa gleich starker felderzeugender Magnete, die gegenseitig Kräfte aufeinander ausüben.

Ergebnis: Aus dem Feldlinienbild von zwei felderzeugenden Magneten kann man die Richtung der Kräfte ablesen, die sie aufeinander ausüben. Das geht einfach, wenn man sich - nur zu diesem Zweck - vorstellt, die Feldlinien hätten das Bestreben, sich zu verkürzen oder zu verdrängen.

**V:** Räumlich: zwei in Feilspäne getauchte Pole nähern.

**Zusammenfassung:** [08Mag-FeldL.doc](#)

Dieses Arbeitsblatt zum magnetischen Feld ist Ausgangspunkt für das spätere Aufzeigen von Analogien zwischen dem magnetischen und dem elektrischen Feld sowie dem Gravitationsfeld. Es wird im Sinne der Nachhaltigkeit angefertigt und später wieder aufgegriffen und erweitert.

# Allgemeine Bemerkungen zur Elektrizitätslehre

## Fachwissenschaftliche Bemerkungen

### Elektrische Stromstärke und Ladung

Im SI-System ist die elektrische Stromstärke als vierte Grundgröße festgelegt. Die Einheit 1 A ist über die magnetische Stromwirkung definiert: 1 A ist diejenige Stromstärke, die in einer Leiteranordnung von zwei unendlich langen, geraden, zueinander parallelen Stromleitern von vernachlässigbar kleinem Querschnitt im Abstand  $r = 1 \text{ m}$  auf einen gleich großen Strom pro Längeneinheit 1 m die Kraft  $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$  ausübt.

Die Ladung 1 C scheidet beim Durchfluss durch eine verdünnte  $\text{AgNO}_3$ -Lösung 1,118 mg Ag ab (Bis 1.1.1948 Festlegung von 1 C). Bei der Elektrolyse von Wasser entstehen unter Normbedingungen ( $0^\circ \text{C}$ , 1013 mbar)  $0,174 \text{ cm}^3$  Knallgas. Bei "Zimmertemperatur" ( $20^\circ \text{C}$ , 1000 mbar) sind es  $0,19 \text{ cm}^3$  Knallgas. Die Knallgasmenge hängt nur von Q, das Knallgasvolumen aber auch von den atmosphärischen Bedingungen ab.

### Elektrische Spannung, elektrisches Potenzial

Im elektrostatischen Feld und im stationären Feld eines stromdurchflossenen Leiters ist längs eines jeden geschlossenen Weges das Wegintegral  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$ . Somit lässt sich die elektrische Spannung und das elektrische Potenzial folgendermaßen definieren:

Die Spannung zwischen zwei Punkten A und B:  $U_{A,B} = \frac{W_{A,B}}{q}$ . Dabei ist  $W_{A,B} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s} = q \cdot \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$  die Arbeit der elektrischen Feldkräfte beim Transport der Probeladung q von Punkt A nach Punkt B, die so genannte *Überführungsarbeit*.  $U_{A,B} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$

Das elektrische Potenzial eines jeden Punktes P im elektrischen Feld ist nach Wahl eines Bezugspunktes  $P_0$  definiert als die Überführungsarbeit der elektrischen Feldkräfte beim Transport der Probeladung q von P nach  $P_0$  pro q:

$$\Phi(P) = \Phi_{P_0}(P) = \frac{1}{q} \int_P^{P_0} \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_P^{P_0} \vec{E} \cdot d\vec{s} = U_{P,P_0}$$

Für die Spannung zwischen zwei Punkten folgt dann:

$$U_{A,B} = \int_A^{P_0} \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_{P_0}^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_A^{P_0} \vec{E} \cdot d\vec{s} - \int_B^{P_0} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \Phi(A) - \Phi(B)$$

unabhängig von  $P_0$ .

Befindet sich die Probeladung q im Raumpunkt P des elektrischen Feldes, so lässt sich das Wegintegral  $\int_P^{P_0} \vec{F} \cdot d\vec{s}$  als (elektrische) potenzielle Energie  $E_{\text{pot}}(q, P)$  der Ladung q im Punkt P auffassen.

Das elektrische Potenzial in P ist dann die (elektrische) potenzielle Energie der Einheitsladung in P:  $\Phi(P) = \frac{E_{\text{pot}}(1, P)}{1}$ .

Das Vorzeichen von  $E_{\text{pot}}(q, P)$  hängt vom Vorzeichen von q ab, das Vorzeichen des Potenzials in P hängt nicht vom Vorzeichen von q ab, sondern nur von der Lage von P relativ zu  $P_0$  ab.

Das Potenzial nimmt in Richtung von fort schreitend ab und zwar unabhängig von der Wahl des Bezugspunktes  $P_0$ .

Für den Stromkreis bedeutet das:

Der + Anschluss der Quelle hat stets höheres Potenzial als der - Anschluss. Deshalb wird der - Anschluss der Quelle häufig als Bezugspunkt  $P_0$  mit  $\Phi(P_0) = 0$  gewählt und mit dem Symbol für die Gehäusemasse versehen.



## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Allgemeine fachdidaktische Bemerkungen

#### Pädagogische Leitlinien

Die meisten Schüler werden wohl keine Physiker werden, sie werden aber der Physik weiterhin ständig begegnen. Ein Hauptlernziel der Unterrichtseinheit sollte deshalb der Aufbau einer Alltagskompetenz für Laien sein.

Fehlvorstellungen zur Elektrizitätslehre halten sich bekanntlich hartnäckig und verbauen häufig den Zugang zu den Naturwissenschaften. Ihre Vermeidung bzw. ihr Abbau sollte ein weiteres vorrangiges Lernziel sein.

#### Das Kommunikationsproblem<sup>8</sup>

Jede Verständigung zwischen Lehrer und Schüler und damit jeder Lernfortschritt setzt eine gemeinsame Sprache voraus. Im Unterricht ist sie zunächst durch die Umgangssprache gegeben. Sie erschließt einen Bereich, in dem man sich gut genug verständigen kann, um auf das dort herrschende Verständnis aufbauend, neue Bereiche zu erschließen. Das Erschließen neuer Bereiche hat eine Verschärfung der Begriffe ... zur Folge (C. F. v. Weizsäcker). Das Ziel ist dann eine zweite Ebene der Verständigung, die Fachsprache.

Da die Umgangssprache Alltagserfahrungen, die Fachsprache hingegen physikalische Erfahrung umfasst, ist es nicht verwunderlich, dass gleich lautende Begriffe, die auf beiden Sprachebenen verwendet werden, dort unterschiedliche Bedeutung aufweisen.

Die didaktische Lösung des Kommunikationsproblems liegt darin, dass sich der Lehrer zunächst über die umgangssprachliche Bedeutung der Begriffe, die eingeführt werden sollen, klar wird. Daraufhin sollte man die physikalischen Zusammenhänge zunächst in einer möglichst alltagsnahen Sprache darstellen und dabei durch geeignete Wortwahl versuchen, Fehlinterpretationen der Schüler zu vermeiden. Die Fachbegriffe werden mit einer vorläufigen Semantik in die Alltagssprache eingebunden um dann allmählich mit der fachlich formalen Struktur verknüpft zu werden.

Dabei sollte herausgearbeitet werden, dass viele Begriffe der Umgangssprache im alltäglichen Leben eine zweckmäßige Bedeutung haben, dass es aber ebenso zweckmäßig ist, ihnen in der Physik zur schärferen Abgrenzung gegen ähnliche Begriffe eine eingeschränkte oder sogar andere Bedeutung zuzusprechen.

Die Bereitschaft der Schüler, die Begriffe der Umgangssprache für den Gebrauch im Physikunterricht schärfer zu fassen oder umzudeuten setzt voraus, dass ein Interesse an den Inhalten des Unterrichts aufgebaut und erhalten wird, dass eine Beziehung zwischen den Inhalten und dem Erfahrungsbereich der Schüler hergestellt wird und dass die Inhalte in altersgerechter Form veranschaulicht und mit Bedeutung gefüllt werden.

#### Die Bedeutung einiger Begriffe der Elektrizitätslehre in der Umgangssprache und Fachsprache

##### Ladung

##### Umgangssprache:

Eine Ladung ist etwas, das von einem dafür eigens hergestellten Transporter befördert wird. Vor dem Beladen ist der Transporter leer, nach dem Entladen ist er wieder leer. Es muss dazugesagt werden, um welche Art von Ladung es sich dabei handelt. Außerdem wird das Wort Ladung für explosive Stoffe verwendet: Gewehr, Kanone laden,... Ist ein Mensch geladen, so kann er leicht „in die Luft gehen“.

Fachsprache: Nach DIN 58122 sind die Begriffe „elektrische Ladung“ und „Elektrizitätsmenge“ synonym. Beide Begriffe stehen für eine elektrische Substanz. Zur Entstehung des Ladungsbegriffs siehe C3, S. 288.

Im Unterricht wird der Begriff „elektrische Ladung“ in dreifacher Bedeutung verwendet:

Die elektrische Ladung ist eine Eigenschaft, die die Elementarteilchen, aus denen alle Körper aufgebaut sind, besitzen können. Es gibt zwei Erscheinungsformen dieser Eigenschaft, die man positive und negative Ladung nennt. Sie hat Mengencharakter. Für sie gilt ein Erhaltungssatz.

In der Elektrostatik im Sinne von Überschussladung. Unter der Ladung eines Kondensators meint man den Betrag der Überschussladung einer Kondensatorplatte.

<sup>8</sup> H. Muckenfuß, A. Walz: Neue Wege im Elektrikunterricht, Aulis-Verlag, ISBN 3-7614-1431-5

Mit dem Begriff „Ladungen“ meint man sowohl die Ladungsträger (Elektronen), als auch geladene Körper, z.B. „Kraft zwischen Ladungen“.

Ein unbewusster Wechsel des Lehrers zwischen den einzelnen Bedeutungen im Mittelstufenunterricht kann das Verständnis sehr erschweren.

## Der elektrische Strom

### Umgangssprache

**Energetischer Prozess:** Beschreibt den Energiefluss oder die Energiestromstärke von der Quelle zum Verbraucher. Diese Bedeutung wird am häufigsten verwendet.

**Bsp.:** Stromerzeugung, Verstromung, Strom aus ..., Stromverbrauch, Stromzähler Strom sparen, ..

Fachwissenschaftlich wird dieser Energiestrom als die mit Hilfe der Elektrizität übertragene elektrische Energie  $W_{el}$  bezeichnet. Sie fließt vom ersten Energiewandler, der „Quelle“, zum zweiten Energiewandler, dem „Verbraucher“.

Ihre Einheit ist 1 J. Messgerät: Strom-Zähler.

Es ist sinnvoll und praktisch, den elektrischen Strom in der Umgangssprache in diesem Sinne zu verwenden und auch von Stromerzeugung und Stromverbrauch zu sprechen. Schließlich wird elektrische Energie für sich gesehen aus einer anderen Energieform in der Quelle erzeugt. Die Quelle ist im wahrsten Sinne des Wortes eine Quelle elektrischer Energie. Für den Verbraucher und den damit verbundenen Sprachgebrauch gilt entsprechendes. Eine Formulierung im Sinne von „Umwandlung elektrischer Energie“ wäre hier umständlich und wenig sinnvoll.

Dagegen ist es in der physikalischen Fachsprache ebenso sinnvoll und praktisch, von der Umwandlung elektrischer Energie und einer Energiestromstärke zu sprechen.

Keine der beiden Beschreibungen ist falsch. Die Fachsprache sollte als Bereicherung angesehen werden, die neue Formen des Gedankenaustauschs ermöglicht.

### Elektrische Substanz:

**Bsp.:** In der Steckdose ist Strom. Ein Gerät, an dem man sich elektrisiert, steht unter Strom. Man bekommt einen Stromschlag. In der leeren Batterie ist kein Strom mehr, ..

Zur Beschreibung eines elektrischen Prozesses, nämlich der zirkularen Elektrizitätsströmung, wird der Begriff elektrischer Strom umgangssprachlich praktisch nicht verwendet!

### Fachsprache

Ausschließlich zur Beschreibung eines elektrischen Prozesses: Die durch Ladungsträger im Stromkreis bewegte elektrische Ladung nennt man einen elektrischen Strom.

Man beschreibt damit einen elektrischen Vorgang, nicht die elektrische Substanz. Der Strom als Subjekt hat keine Alternative. Ein Auto fährt. Wenn es nicht fährt, steht es still. Das gilt nicht für den elektrischen Strom. Im Anfängerunterricht ist es besser, von einer Strömung zu sprechen.

## Das elektrische Potenzial

**Umgangssprache:** Gesamtheit der zur Verfügung stehenden Kräfte und Mittel; Leistungsfähigkeit: Er hat das Potenzial, das Gymnasium zu besuchen.

### Fachsprache:

Der Plusanschluss der elektrischen Quelle hat gegenüber dem Minusanschluss ein höheres elektrisches Potenzial  $\varphi$ . Zwischen beiden herrscht eine Potenzialdifferenz  $\Delta\varphi$ .

## Die elektrische Spannung

**Umgangssprache:** *Stärke des elektrischen Stromes.* Unterstützt durch Worte wie Stromspannung, Starkstrom, Schwachstrom, Strom mit der Stärke von 110 kV, ..

Das ist ein Grund dafür, weshalb so häufig Stromstärke mit Spannung verwechselt wird.

### Fachsprache:

Im Gleichstromkreis:  $U = \Delta E_{el}/Q = P/I$ . Sie ist ein Maß dafür, wie viel Energie die Quelle liefern kann.

Ein anderer Begriff für Potenzialdifferenz bzw. Potenzialunterschied.

In Stromkreisen, in denen  $I \sim U$  ist, ist sie ein Maß für die Stromtreibfähigkeit der Quelle.

Nennspannung: Spannungsangabe auf elektrischen Geräten: Wird dieses Gerät bei dieser Spannung betrieben, so liefert es die (auch auf dem Gerät angegebene) maximale Leistung.



## Der elektrische Widerstand

**Umgangssprache:** Semantisch enthält das Wort so etwas wie entgegengerichtet. Widerstand gegen etwas bilden.

**Fachsprache:**

Elektrisches Bauteil

Physikalische Größe:  $R = U/I$

## Konsequenzen für den Sprachgebrauch

Der gerichtete Energiestrom, an den zunächst die meisten Schüler bei der Verwendung des Wortes „Strom“ denken, sollte von Anfang an angesprochen werden. Er sollte stets durch das Wort *Energiestrom* vom elektrischen Strom unterschieden werden.

Der Begriff *elektrischer Strom* beschreibt die im Kreis strömende Elektrizität. Möglichst das Wort *Strömung* verwenden. Man sollte so lange wie möglich den Begriff Elektrizität statt Ladung gebrauchen, denn er wird weder von der Umgangssprache, noch von der Fachsprache in einem anderen Sinne verwendet und ist sehr treffend. Statt von einem *starken* oder *schwachen* Strom sollte man lieber von einem *kleinen* oder *großen* Strom sprechen.

Später kann man von *fließender elektrischer Ladung* sprechen.

Statt von einem *geladenen* Körper zu sprechen, sollte man lieber sagen, der Körper *trägt Ladung*.

Erörtert man die *Ladungsträger*, so sollte man für sie nicht das Wort *Ladungen* verwenden.

Die elektrische Quelle ist dazu da, um die Elektrizität *anzutreiben*. Die elektrische Spannung der Quelle ist ein Maß dafür, wie sehr sie die Ladungsträger *antreiben kann*.

Das elektrische Gerät stellt ein Hindernis (Widerstand) für die Elektrizität dar. Es *behindert* bzw. *hemmt* die Elektrizitätsströmung.

## Die Genderproblematik

Mädchen bringen häufig starke irrationale Ängste vor der Elektrizität mit. Oft beobachtet man ein ambivalentes Verhalten. Einerseits möchten sie auch auf diesem Gebiet den Jungen nicht nachstehen, andererseits sind sie vorsichtiger und ängstlicher als Jungen. Häufig bringen die Mädchen die Überzeugung mit, die Elektrizitätslehre wäre nichts für sie, sie würden sie sowieso nicht verstehen. Allein die Ankündigung des neuen Stoffgebiets bewirkt bei vielen Mädchen eine Abwehrhaltung.

Abhilfe:

- Inhalte möglichst im Zusammenhang mit Themen vermitteln, die die Mädchen besonders ansprechen: Phänomene, Probleme aus der Humanmedizin, dem Haushalt, der Erfahrungswelt der Mädchen und Jungen, berufsbezogene Probleme, Probleme aus der Umwelt und dem sozialen Bereich.
- Für Mädchen interessante Anwendungen trotz Zeitnot behandeln.
- Übungsaufgaben aus den genannten Bereichen.
- Ansprechende realitätsnahe Übungsaufgaben sowie andere Übungsformen wie experimentelle und schriftliche Übungen<sup>9</sup>
- Durch ausreichend viele Übungsphasen Zutrauen schaffen.
- Methodenvielfalt! Es sind zwar keine typisch weiblichen Methoden bekannt, aber unterschiedliche Methoden erreichen u.U. unterschiedliche Schülergruppen. Aktivität der Schüler, insbesondere auch mechanische Tätigkeiten sind zu fördern: Schülerexperimente, Schülerpraktika, Teamarbeit, Lernzirkel, Gruppenpuzzle, Einzel- und Partnerarbeit, Freiarbeit.
- Bei Gruppenarbeit sind anfangs geschlechtshomogene Gruppen empfehlenswert.
- Bei Gruppenpuzzle empfehlen sich geschlechtshomogene Expertengruppen.
- Mädchen wie Jungen gleichartige Hilfestellung geben.

<sup>9</sup> Üben im Physikunterricht in PdN-Ph. 1/42. Jg. 1993

## Allgemeine methodische Bemerkungen

### Veranschaulichung der Vorgänge im elektrischen Stromkreis

Bei der Elektrizitätslehre handelt es sich um einen unanschaulichen Phänomenbereich, für den es kein Sinnesorgan gibt. Die Schüler lernen, dass auch solche Vorgänge durch geeignete Methoden erfasst und beschrieben werden können.

In diesem Alter können die Schüler in zunächst einfachen Fällen auf die Ebene des abstrakten Denkens überwechseln. Jede Abstraktion basiert allerdings auf konkreten Vorkenntnissen.

Zur Veranschaulichung sollte den Schülern ein Modell zur Verfügung gestellt werden, das ihnen hilft, den Schritt vom konkreten zum abstrakten Denken zu vollziehen.

### Anforderungen und Grenzen

Ein Modell für den elektrischen Stromkreis sollte insbesondere in wesentlichen Punkten Entsprechungen zum Original aufweisen, eine Eigengesetzlichkeit haben, aufgrund von Analogieschlüssen Voraussagen über das Original ermöglichen, einfacher, vertrauter, anschaulicher und leichter zugänglich sein, als das Original, auf den heutigen Wissenstand erweiterbar sein, d.h. es darf nicht Aussagen über das Original machen, die man dann zu einem späteren Zeitpunkt als falsch erklären muss, Fehlvorstellungen vermeiden, ökonomisch sein, d.h. die Lernziele trotz des Umwegs über das Modell sollten schneller und effektiver erreicht werden können.

Modelle für den elektrischen Stromkreis unterscheiden sich in einem Punkt grundlegend von anderen im Physikunterricht verwendeten Modellen. Üblicherweise nimmt man Idealisierungen und Vereinfachungen vor und stellt Beziehungen zwischen diesen Objekten auf. Die realen Objekte kommen zumindest in der Schülervorstellung den idealisierten Objekten sehr nahe. Die zentrale Argumentation bei solchen Modellen lautet: „Wenn wir uns vorstellen, dass ..., dann können wir folgendes erklären ...“.

Bei Modellen für den elektrischen Strom werden völlig andere reale Systeme betrachtet, bei denen die Analogie, die Veranschaulichung entscheidend sind. Die Argumentation lautet hier: „Beim elektrischen Stromkreis verhält es sich wie ...“.

### Wassermodelle

Wassermodelle sind zur Veranschaulichung des elektrischen Stromes besonders geeignet. Sie sind einfach, anschaulich, vertraut, haben eine Eigengesetzlichkeit und verfügen über eine Vielzahl von Entsprechungen:

Elektrische Stromstärke -	Wasserstromstärke
Elektrisches Potenzial -	Druck
Elektrische Spannung -	Druckdifferenz

Auch die Kirchhoff'schen Regeln und das Ohm'sche Gesetz lassen sich für Wasserstromkreise formulieren.<sup>10</sup> Sie wurden bereits in den 80er Jahren intensiv diskutiert.

Je nach didaktischer Zielsetzung wurden verschiedene Modelle von ganz unterschiedlicher Komplexität entwickelt:

### Einfache Modelle

Sie zeigen nur eine einzige Analogie auf: Bilder oder Realisierungen eines geschlossenen Wasserstromkreises (D7/8 S. 179, B3) zur Veranschaulichung der strömenden Elektrizität; Bilder von Wasserpumpen zur Veranschaulichung der Spannung als Höhendifferenz (D7/8 S. 204, V1), ..

Der Einsatz der „einfachen Modelle“ hat sich bewährt und ist zur Veranschaulichung isolierter Begriffe und Gesetzmäßigkeiten auf jeden Fall sehr gut geeignet.

### Komplexe Modelle

Prinzipiell zu unterscheiden sind offene und geschlossene Wassermodelle. Bei offenen Modellen lassen sich Potenziale durch die Höhe der Flüssigkeit in Steigrohren darstellen. Die Wasserstromstärke kann dann wegen der geringen Druckdifferenzen nur schwer beobachtet werden. Bei geschlossenen Modellen lässt sich zwar die Stromstärke quantitativ gut erfassen (z.B. durch einen Strömungswächter „Aquamobil“ Leybold 667196),

<sup>10</sup> H. Schwarze: Druckdifferenz und Flüssigkeitsstrom, PdN-Ph. 7/43. Jg. 1994 (31-37)

Druckdifferenzen lassen sich dann schwerer zeigen. Komplexe Modelle wurden wegen der weitgehenden Analogie zu eigenständigen Untersuchungsobjekten, an denen vor dem eigentlichen Lehrgang zur Elektrizitätslehre alle notwendigen Begriffe eingeführt und ihre Zusammenhänge quantitativ untersucht wurden. Trotz mehrjähriger Bemühungen<sup>11</sup> war der Erfolg enttäuschend.

#### Probleme:

Nur ein sehr geringer Teil der Schüler hat die Begriffe beim Wasserstromkreis richtig verstanden und richtig übertragen können. Ein etwa gleich großer Schüleranteil hat zwar die Begriffe beim Wasserstromkreis richtig verstanden, konnte sie aber auf den elektrischen Stromkreis nicht übertragen. Der überwiegende Anteil hat bereits die Begriffe beim Wasserstromkreis nicht richtig verstanden. Fazit: „Wassermodelle können sehr kompliziert sein. Die Frage ist berechtigt, ob das Lernen des Wassermodells nicht schwieriger ist, als das Lernen der Stromkreise selbst“.<sup>12</sup>

Will man bei Wasserstromkreisen die zum elektrische Stromkreis analogen Größen messen, so nimmt ihre Komplexität und Unanschaulichkeit derart zu, dass sie ihre heuristische Funktion verlieren.

Stromverzweigungen bei Flüssen und bei Kreisläufen, die durch eine Pumpe angetrieben werden, machen falsche Voraussagen über den verzweigten elektrischen Stromkreis. Grund: Man hat es hier mit Konstantstromquellen zu tun. Die elektrischen Stromquellen sind üblicherweise Konstantspannungsquellen:

- Eröffnet man dem fließenden Wasser einen zusätzlichen Weg, so bleibt die Stromstärke in der Zuführung gleich. Im elektrischen Fall nimmt sie in der Zuleitung zu.
- Vergrößert man den Strömungswiderstand bei einer Wasserströmung, so steigt die Druckdifferenz am Widerstand so lange an, bis die konstante Wasserstromstärke fließt. Für eine Pumpe (insbesondere das menschliche Herz) bedeutet eine Verengung der Leitung einen größeren Energieaufwand. In einem elektrischen Stromkreis sinkt bei konstanter Spannung mit zunehmendem Widerstand die Stromstärke und somit die Leistung. Für die elektrische Quelle bedeutet das einen geringeren Energieaufwand.

### **Einfaches Wassermodell**

Ein gut geeignetes Wassermodell kann man sich aus zwei Rundbehältern aus Kunststoff mit Bohrungen für Gummistopfen, (zwei Cola – Flaschen oder ELWE 84 104 10), durchsichtigen Schläuchen, einem Strömungswächter und Steigrohrchen selbst bauen. Die Darstellung von Druckdifferenzen und Wasserstromstärke stellt einen Kompromiss dar, geht aber. Dieses Modell findet in der Lehrgangsskizze Anwendung.

### **Tübinger Wassermodell**

Am Tübinger Seminar wurde von Frau Dr. Betsch ein für den Elektrizitätslehreunterricht der Klasse 8 geeignetes Wassermodell entwickelt.<sup>13</sup> Es besteht aus einer Wasserquelle, bei der auf einfache Weise eine konstante Höhendifferenz eingestellt und variiert werden kann sowie aus fünf Vertikalaufbauten, bei denen sich die Wasserstromstärke quantitativ ermitteln lässt. Damit lassen sich folgende Sachverhalte sehr gut veranschaulichen: Die zirkuläre Strömung und der damit verbundene verzögerungsfreie lineare Energietransport, die völlige Gleichzeitigkeit aller Bewegungsänderungen im Kreislauf, die Stromstärke – Definition, der Zusammenhang zwischen der Stromstärke und der in einer bestimmten Zeit geflossenen Wassermenge, die Kontinuitätsgleichung, der Zusammenhang zwischen Antrieb und Behinderung.

Bei den verwendeten „Wasserkreiseln“ handelt es sich um Labor-Strömungswächter zur Kontrolle des Kühlwasserdurchflusses in Destillationsanlagen und ähnlichen Vorrichtungen. Sie sind nicht für die Messung der Durchflussmenge konzipiert. Ihre Umdrehungszahl hängt deshalb nicht nur von der durchflossenen Wassermenge, sondern auch von der Strömungsgeschwindigkeit ab. Die Reproduzierbarkeit ist bei jedem Kreisel gut, die Anzahl der Umdrehungen bei gleicher Durchflussmenge und Stromstärke weicht jedoch von Kreisel zu Kreisel deutlich ab. Ein analoger Versuch zum Ohm'schen Gesetz lässt sich quantitativ nicht durchführen. Bei doppelter Höhendifferenz zeigen die Kreisel nicht die doppelte Wasserstromstärke an. Qualitativ lässt sich aber der Zusammenhang zwischen Stromstärke, Antrieb und Behinderung sehr schön zeigen.

### **Andere Wassermodelle**

<sup>11</sup> H. Muckenfuß, A. Walz: Neue Wege im Elektrikunterricht, Aulis-Verlag, ISBN 3-7614-1431-5

<sup>12</sup> E. Kirchner: Analogmodelle für den elektrischen Stromkreis, PU 2 - 1984 (46-60)

<sup>13</sup> Dr. Betsch: Schriftliche Prüfungsarbeit 1995, Seminar Tübingen: *Der Einsatz eines selbsterstellten Wassermodells im Elektrizitätslehre - Unterricht der Klasse 8*

Siehe Conatex „Analogiemodelle zur Hydraulik“ Nr. 108.0751 und 108.0700. Sie sind gut geeignet, aber sehr teuer.

## Andere Modelle

Mechanische Transmissionen (Cornelsen, experimenta, Nr. 54 855), Kettenantrieb beim Fahrrad (beide sehr zu empfehlen), Simulationsprogramme.

## Ungeeignete Modelle

Modelle, die eine Konstantstromquelle als Antrieb besitzen,  
Luftkreisläufe, da hier die Inkompressibilität nicht gegeben ist;  
„Lastwagenmodell“, bei dem die Elektronen mit Energie beladen werden, weil sie das Verständnis verbauen.

## Gefahren des elektrischen Stromes

Es muss auf die Gefahren des elektrischen Stromes hingewiesen werden. Neben einer Belehrung zu Beginn der Unterrichtseinheit ist dies bei jeder passenden Gelegenheit vorzunehmen und **im Tagebuch festzuhalten**.

### Belehrung der Schüler:

Die Schüler dürfen sich nicht ohne Lehrer im Fachraum aufhalten.

Geräte und Schaltungen, die auf dem Experimentiertisch stehen, dürfen von den Schüler ohne Aufforderung nicht berührt werden.

Die Schüler müssen über das Bestehen der Not-Aus-Anlage informiert und in ihre Bedienung eingewiesen werden.

Die Schüler bis einschließlich Klasse 10 dürfen nur mit Wechselspannungen kleiner 25 V und Gleichspannungen kleiner 60 V experimentieren.

Die Nachahmung gefährlicher Versuche ist verboten. Stets bei einem solchen darauf hinweisen.

Keine blanken Stellen an Leitungen - auch außerhalb der Schule - berühren.

Bei Hochspannungsleitungen ist schon die Annäherung lebensgefährlich (Drachen, Masten besteigen).

Den Schülern muss (an passender Stelle) immer wieder mitgeteilt werden, welche Spannungen und Stromstärken für sie lebensgefährlich sein können!

...

## DIN - Schaltzeichen

Die Darstellung der Schaltsymbole wird in DIN 40700 ... 40716 festgelegt. Obwohl das allgemeinbildende Gymnasium der DIN - Normierung nicht unterliegt, ist ihre Verwendung dringend anzuraten. [☞ DIN Symbole](#)

## Schülerexperimente

Durch mannigfaltige Erfahrungen mit der Elektrizität in komplexer Form (emotional, sprachlich, experimentell) haben sich tief verwurzelte Fehlvorstellungen ausgebildet, die geändert werden müssen. Die alten Vorstellungen für falsch zu erklären hilft überhaupt nicht. Vielmehr ist eine ähnlich tiefe, vielschichtige Verankerung der neuen Konzepte notwendig. Dazu gehören Schülerexperimente.

Schülerexperimente bieten sich an folgenden Stellen der Elektrizitätslehre in Klasse 7/8 an, wenn nicht bereits in den Naturphänomenen behandelt:

*Leiter und Isolator:* Schülerversuche bzw. Hausexperimente zur Leitfähigkeit fester und flüssiger Stoffe.

*Der elektrische Stromkreis:* Schülerexperimente bzw. Hausexperimente zu einfachen Schaltungen mit bestimmten Eigenschaften (UND-, ODER-, Wechselschaltung,...)

*Wirkungen des elektrischen Stromes:* Schülerexperimente zur Wärmewirkung und magnetischen Wirkung

*Stromstärke, Spannung:* Messung von Stromstärke und Spannung im einfachen und verzweigten Stromkreis im Zusammenhang mit elektrischen Widerständen

...

## Versuchsaufbauten

Wenn Demonstrationsversuche, dann möglichst in Vertikalaufbau mit DIN-gerechten Steckelementen.

## Stoffauswahl

### Bildungsplan

#### Naturphänomene

#### Kompetenzen und Inhalten für Naturphänomene Klasse 6:

**2. Themenkreis Magnetismus und Elektrizität:** Die SuS können elektrische Bauteile – Batterie, elektrischer Leiter, Schalter und Lampe – als Bestandteile elektrischer Stromkreise benennen, einfache Stromkreise aufbauen und auf ihre Funktionsfähigkeit überprüfen, herausfinden, ob ein Material Elektrizität leitet oder nicht.

#### Kompetenzen und Inhalte zur Elektrizitätslehre Klasse 7/8

##### 8. Grundlegende physikalische Größen

Die SuS können mit grundlegenden physikalischen Größen umgehen. Inhalte:

Elektrische Stromstärke, Elektrisches Potenzial, Elektrische Spannung; qualitativ: Elektrische Ladung

##### 9. Strukturen und Analogien

Die SuS können Strukturen und Analogien erkennen.

Inhalte:

Qualitativ: Energiespeicher, Beschreibung von mechanischen und elektrischen Energietransporten

Qualitativ: Strom, Antrieb (Ursache) und Widerstand

##### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

a) Die SuS können elementare Erscheinungen in der Natur und wichtige Geräte funktional beschreiben.

b) Die SuS können physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einsetzen.

Inhalte:

Mensch: Sicherheitsaspekte

Alltagsgeräte (z.B. Elektromotor)

Energieversorgung: Kraftwerke und ihre Komponenten (z.B. Generator) – auch regenerative Energieversorgung (z.B. Solarzelle, Brennstoffzelle)

### Schulbuchvergleich

#### Klasse 7/8

Dorn-Bader [D7/8]	Impulse [I7/8]	Fokus [FC1]	Duden [DP1]	Universum [U1]
Stromkreis, Leiter, Isolator	Leiter, Isolator, Volt, keine Spannung aber Nennspannung	Elektrische Energieübertragung, Berechnung der elektrischen Energie, Energiestrom, Energiestromstärke, Energiesparen, Energieübertragungsketten	Elektronen, negativ und positiv geladen Elektrischer Strom: Bewegung von Elektronen Vergleich mit Wasserstromkreis	Elektrischer Stromkreis, Umgang mit Elektrizität, Kurzschluss
Elektrische Ladung, Strom: fließende elektrische Ladung	Schaltpläne	Elektrostatische Energieübertragung durch Stromkreise, Analogie	Stromkreis, Leiter Isolator	Leiter, Nichtleiter
Elektrostatik: Positive und negative Ladung Q	Wasser - fließende Elektrizität	Elektrische Energieübertragung durch Stromkreise, Analogie	Wirkungen des elektrischen Stromes	Umgang mit Schaltplänen
Kräfte, Elektroskop, Neutralisation	Druckdifferenz -Potentialdifferenz	Wasserstromkreis – Elektrischer Stromkreis, Elektrische Energiequellen, Elektronen	Stromstärke, Definition und Messgerät, Messvorgang	Wirkungen des elektrischen Stromes: Wärmewirkung, magnetische Wirkung, Lichtwirkung, chemische Wirkung
Influenz	Druckmesser-Spannungsmesser	Wirkungen des elektrischen Stromes:		
Glühlampe, Effekt, Elektronen, Elektronenleitung, Stromrichtungen	Energiestrom		Druckunterschied-Höhenunterschied, Elektrische „Höhe“, Potenzial, Spannung	Kreislauf, Elektrische Ladung, Wasserstromkreis
Wechselstrom	Potenzial, ... bei Reihen- und Parallelschaltung von Lämpchen		Messgerät	Elektrische Stromstärke,
Magnetische Wirkung, keine Wärmewirkung	Elektronen als Elektrizitätsportionen			
Elektrische Stromstärke				

<p><math>I=Q/t</math>, Messen mit Strommessern</p> <p>Stromstärke bei Parallelschaltung, Kurzschluss</p> <p>Potenzial, Spannung</p> <p>Nullpunkt des Potenzials</p> <p>Je größer die Spannung, desto größer die Energie.</p> <p>Schaltung von Quellen</p> <p>Analogie: Strom, Antrieb, Widerstand</p> <p>Ohm'sches Gesetz</p> <p>Widerstand, ... von Drähten</p> <p>Parallel- und Reihenschaltung</p> <p>Gefahren</p>	<p>Ladung als Menge von Elektronen</p> <p>Stromstärke, Einheit</p> <p>Messgerät</p> <p>Stromstärke bei Parallel- und Reihenschaltung</p> <p>Elektrischer Widerstand, Ohm'sches Gesetz</p> <p>NTC, PTC</p> <p>Längenabhängigkeit</p> <p>Wirkungen:</p> <p>Magnetische Wirkung, Wärmewirkung, Gefahren</p> <p>Teilspannungen</p> <p>Elektrostatik:</p> <p>Positive, negative Ladung, Kräfte zwischen Ladungen</p> <p>Neutralisation</p> <p>Strom: fließende elektrische Ladung</p>	<p>Magnetische Wirkung, Wärmewirkung</p> <p>Messung der Stromstärke: I, Messgeräte</p> <p>Elektrische Ströme in Lebewesen</p> <p>Leiter, Nichtleiter</p> <p>Parallelschaltung</p> <p>Elektrische Spannung: <math>U=P/I</math>, Analogie:</p> <p>Elektrisches Potenzial - Druckdifferenz</p> <p>Parallel- und Reihenschaltung</p> <p>Leistung</p> <p>Alltagsbezüge</p>	<p>Ohm'sches Gesetz, Elektrischer Widerstand, Widerstand von Drähten</p> <p>Parallel- und Reihenschaltung</p> <p>Magnetismus und Elektromotor</p>	<p>Elektrische Ladungsmenge, Messung der elektrischen Stromstärke</p> <p>Antrieb des Stromes, Elektrische Spannung, Elektrisches Potenzial, Analogie</p> <p>Wasserstromkreis – Elektrischer Stromkreis</p> <p>Messung der elektrischen Spannung</p> <p>Elektrischer Widerstand, Definition</p> <p>Kennlinien elektrischer Geräte</p> <p>Widerstände in der Technik</p> <p>Schaltungen verstehen und planen, Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen, Vorwiderstand, Schaltungen mit Dioden</p> <p>Mensch: Sicherheitsaspekte</p> <p>Elektrische Energieübertragung, Leistung und Wirkungsgrad</p> <p>Elektrische Energiequellen, Motor, Generator, Leuchtdiode, Solarzelle, Knallgas-Brennstoffzelle, Energieübertragungsketten</p> <p>Batterie, Akkumulator, Schaltung von Energiequellen</p> <p>Elektromotor und Generator (Funktionsprinzip)</p> <p>Elektrische Energieversorgung: Kraftwerke im Vergleich</p>
---	--	---	---	--

## Kompetenzen und Inhalte zur Elektrizitätslehre für die Klasse 9/10<sup>14</sup>

### 8. Grundlegende physikalische Größen

Die S. kennen technische Möglichkeiten zum „Energiesparen“ und zur Reduzierung von „Entropieerzeugung“.

Die S. können mit weiteren grundlegenden physikalischen Größen umgehen.

Inhalte:

Elektrische Stromstärke, elektrisches Potential, elektrische Spannung; qualitativ elektrische Ladung (Ladungserhaltung)

### 9. Strukturen und Analogien

Die S. können kennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten.

Inhalte:

Qualitativ: Energiespeicher, Beschreibung von elektrischen Energietransporten

Qualitativ: Strom, Antrieb (Ursache) und Widerstand

Qualitative Beschreibung von Feldern (Gravitationsfeld, magnetisches Feld, elektrisches Feld)

### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

Die S. können elementare weitere Erscheinungen in der Natur und wichtige Geräte funktional beschreiben.

Die S. können sind immer mehr in der Lage, physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einsetzen.

Inhalte:

Erde: atmosphärische Erscheinungen, Treibhauseffekt, Erdmagnetfeld

Mensch: Sicherheitsaspekte

Alltagsgeräte (z.B. Elektromotor)

Energieversorgung: Kraftwerke und ihre Komponenten (z.B. Generator) – auch regenerative Energieversorgung (z.B.

Solarzelle, Brennstoffzelle)

Informationstechnologie und Elektronik – auch einfache Schaltungen mit elektronischen Bauteilen

## Schulbuchvergleich

### Klasse 9/10

Dorn-Bader [D9/10]	Impulse [I9/10]	Fokus [FC2]	Duden [DP2]	Universum (noch nicht erschienen)
Energetischer Aspekt der elektrischen Spannung: $U = W/Q$ , Elektrische Energie, Elektrische Leistung Wechselspannung Gefahren und Schutzmaßnahmen Magnetisches – elektrisches Feld - Gravitationsfeld Kraft auf stromdurchflossenen Leiter, Induktion Transformator, Energieübertragung Elektronik	Elektromotor, Generator Wiederholung, Vertiefung Elektrische Ladung, Elektron, Wirkungen des elektrischen Stromes Messverfahren für die elektrische Stromstärke Elektrisches Feld Energetischer Aspekt der elektrischen Spannung: $U = \Delta E/Q$ , Elektrische Energie, Elektrische Leistung Reihen- und	Widerstand, Ohm'sches Gesetz Schutzmaßnahmen Felder Elektromotor, Generator, Induktion, Transformator Elektronik	Wiederholung und Vertiefung dabei auch Braun'sche Röhre Felder Elektrische Energie: Mitteilung: $E = UIt$ , Elektrische Leistung Induktion, Transformator Elektronik	

<sup>14</sup> Die gegenüber der Klassenstufe 7/8 neu hinzugekommenen Inhalte sind blau dargestellt, weggefallene Formulierungen sind durchgestrichen.

	Parallelschaltung von Widerständen  Glühelektrischer Effekt Braun'sche Röhre  Kraft auf stromdurchflossen en Leiter, Elektromotor  Induktion, Generator, Transformator, FI- Schutzschalter  Elektronik, Sensoren			
--	--	--	--	--

## Diskussion wichtiger Aspekte

### Stoffumfang

Der Bildungsplan fordert verbindlich nur die Behandlung von Stromstärke, Potenzial und Spannung und qualitativ Ladung sowie Strom – Antrieb – Widerstand. Trotzdem gehen alle Schulbücher in ihrem Stoffumfang weit über diese Vorgaben hinaus. Die Gründe liegen auf der Hand:

- Ein geschlossener Unterrichtsgang ohne zusätzliche Inhalte ist nicht möglich.
- Die zeitliche Enge in Klasse 9/10 und die Stofffülle erlauben es kaum, die Inhalte in Klasse 9/10 zu belassen.

### Wirkungen des elektrischen Stromes

Bei den Wirkungen des elektrischen Stromes stehen die magnetische Wirkung und die Wärmewirkung im Vordergrund. Die chemische Stromwirkung kann hier i.A. noch nicht erarbeitet werden, da die zugehörigen Modellvorstellungen (Elektronen, einfaches Atommodell) noch fehlen.

Dem 10. Kompetenzbereich entsprechend wird man der Behandlung von Alltagsgegenständen einen hohen Stellenwert beimessen.

### Technische Anwendungen

Im 10. Kompetenzbereich „Naturerscheinungen und technische Anwendungen“ wird ausdrücklich gefordert, dass die Schüler technische Geräte wie Elektromotor und Elemente der Energieversorgung wie Generator, Solarzelle und Brennstoffzelle funktional beschreiben können. Die KMK-Standards erfordern darüber hinaus auch die Behandlung des Transformators (beim Transport und der Nutzung von Energie) und des Akkumulators (in Zusammenhang mit der Energieerhaltung).

#### Elektromotor

Der Elektromotor lässt sich durch die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes beschreiben und erklären. Die Behandlung der Lorentzkraft ist dazu nicht notwendig. Die Spule des Ankers wird dabei als Elektromagnet identifiziert. Das genügt völlig zur funktionalen Erklärung.

Man kann den Elektromotor gleich als Anwendung der magnetischen Stromwirkung behandeln oder aber auch am Ende der Einheit aus der Funktion der Drehspulinstruments entwickeln. Für den Gleichstrom – 2 T – Anker Motor mit einem Permanentmagnet als Stator einer Spule als Rotor und Kommutator muss man eine Stunde einplanen. Für den Allstrom-Motor benötigt man dann noch einmal eine Stunde. Da die Klasse 7 und 8 mit Stoff bereits reichlich überfrachtet ist, wird man große Schwierigkeiten haben, diese Inhalte dort auch noch unterzubringen.

#### Energieversorgung

Die Komponenten der Energieversorgung kann man nur unter dem Aspekt der Energieumwandlung betrachten. Eine funktionale Erklärung ist hier nicht möglich. Sie erfolgt im nächsten Jahr in den Gebieten Induktion und Halbleiter.

### Elektrische Ladung



Die Einführung der elektrischen Ladung als Basisgröße über ein Messverfahren gehört der Vergangenheit an.

Es gibt zwar gute Gründe dafür:

Die elektrische Ladung  $Q$  ist die physikalisch grundlegendere Größe.

$Q$  ist eine Erhaltungsgröße.

$I$  beschreibt das Fließen von  $Q$ , kommt also sachlogisch gesehen nach der Einführung von  $Q$ .

Das Messgerät Knallgaszelle ist einfacher als das Drehspulinstrument (zur Einführung von  $I$ ).

Festlegung von Maßeinheit und Maßvielfachheit ergibt sich zwanglos aus den atomistischen Vorgängen bei der Elektrolyse.

Aber:

Das einzig praktikable Messverfahren zur Einführung von  $Q$  ist das elektrolytische Messverfahren. Dabei handelt es sich aber gerade um eine Wirkung bewegter elektrischer Ladung, also um eine Wirkung des elektrischen Stromes.

Das führt zur Verwechslung von Ladung und Stromstärke. Die Schüler haben Schwierigkeiten einzusehen, dass die Zeit bei der Festlegung des Messverfahrens für  $Q$  keine Rolle spielt.

Dass die elektrolytische Wirkung des elektrischen Stromes zur Festlegung des Messverfahrens besonders geeignet ist, sieht man nur ein, wenn man die atomistischen Vorgänge bei der Elektrolyse genau kennt. Die konnte man aber höchstens per Lehrermitteilung vermitteln. Bleiben dem Schüler diese Vorgänge unklar oder erscheinen sie ihm schwierig, was ziemlich sicher ist, so wird er auch  $Q$  und  $I$  als etwas Undurchschaubares empfinden. *Ohne Beschreibung der atomistischen Vorgänge bei der Elektrolyse wird dem Schüler aber überhaupt nicht klar, weshalb gerade diese Wirkung des elektrischen Stromes herangezogen wird* (Knallgasmenge  $\sim Q$ ).

In der Praxis wird die Ladung so gut wie nie gemessen und wenn dann nicht elektrolytisch.

Es ist für den Schüler nicht einsichtig, weshalb der Lehrer ausführlich komplizierte Messmethoden erörtert, die er dann nicht einmal selbst benützt.

Die Festlegung von 1 C über ein Knallgasvolumen von  $0,19 \text{ cm}^3$ , das zudem noch von Temperatur und Druck abhängt, muss dem Schüler geradezu als unsinnig erscheinen. Auch ein Hinweis auf historische Zusammenhänge dürfte wohl wenig helfen, zumal die abgeschiedene Ag-Menge keinen glatten Wert ergibt.

Knallgasexperimente sind außerordentlich gefährlich. Funkenbildung beim Ein- und Ausschalten kann zu heftigen Explosionen führen. Falls man Knallgas entzünden will, sollte man einige wenige Bläschen in Seifenwasser auffangen und diese entzünden. Spritzer von Natron - oder Kalilauge führen fast sicher zur Erblindung. Keine Schülerexperimente!

Dieses Vorgehen kommt mit Recht in keinem einzigen Schulbuch mehr vor!

## Elektrische Stromstärke

Die elektrische Stromstärke lässt sich gut über ein Messverfahren einführen. Dabei lernt der Schüler das Drehspulinstrument als geeignetes Messgerät kennen. Die Festlegung der Einheit 1 A ist eine methodisch unwichtige Angelegenheit. Ihre Realisierung über die magnetische Stromwirkung ist Aufgabe der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt).

Vorteile

Der Schüler lernt exemplarisch, wie man eine Basisgröße einführt.

Die Notwendigkeit, ein Messverfahren für die Vielfachen der Einheitsstromstärke festzulegen, wird den Schülern klar.

Die Festlegung des Messverfahrens wird an Geräten vorgeführt, die dann tatsächlich als Messgeräte benutzt werden. Das Verfahren macht Gebrauch vom Erhaltungssatz der elektrischen Ladung.

Nachteil: Führt man zuerst  $I$  als Basisgröße ein, so besteht das Hauptproblem im Zusammenhang zwischen  $I$  und  $Q$ . Die Schulbücher stellen diesen Vorgang zum Teil sehr verkürzt dar. Bei Zeitmangel kann man diesen Vorschlägen folgen. Als Minimum sollte man dann aber folgende Schritte einhalten:

Ausführliche umgangssprachliche Erörterung, welches Merkmal – hier die Stärke des elektrischen Stromes – quantitativ erfasst werden soll. Dabei wird die Analogie zur Wasserstromstärke ausgenutzt.

Diskussion, dass das Merkmal unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann und woran man das erkennt – hier an den Wirkungen des elektrischen Stromes.

Das Drehspulinstrument vorstellen, bei dem die magnetische Stromwirkung ausgenutzt wird.

Einheit 1 A mitteilen und erläutern.

Messvorgang einüben.

## Elektrisches Potenzial, elektrische Spannung

Die elektrische Spannung ist eine Gerätekonstante der Quelle.

Die Spannung ist ein Maß für die "Stromtreibfähigkeit" der Quelle.

**Je größer die Spannung  $U$  der Quelle, desto größer die Stromstärke  $I$  im Stromkreis.**

(Für  $R = \text{konst.}$  ist bekanntlich  $I \sim U$ .)

Die Spannung ist ein Maß für die "energetische Leistungsfähigkeit" der Quelle.

Je größer die Spannung  $U$  der Quelle, desto größer die Energie, die pro Coulomb verschobener Ladung an den Stromkreis abgegeben wird.

Die Forderung des Bildungsplans nach der Behandlung des elektrischen Potenzials und der Spannung sowie der Analogie „Strom-Antrieb-Widerstand“ (qualitativ) sowie die zeitlichen Rahmendbedingungen lassen nur folgendes Vorgehen zu:

Es wird nur der Aspekt der Stromtreibfähigkeit in Klasse 7/8 erarbeitet.

Die Einführung als abgeleitete Größe mit der Invariantenmethode ist somit nicht möglich. Die Einführung muss propädeutisch über die Analogie zum Wasserstromkreis Höhe (bzw. Druck) – elektrisches Potenzial – Höhendifferenz (bzw. Druckdifferenz) – Potentialdifferenz – Spannung erfolgen. Um die korrekte Analogie zum Druck und zur Druckdifferenz herzustellen, ist die vorhergehende Behandlung des Druckbegriffs (Schweredruck) zwingend erforderlich!

Der energetische Aspekt der Spannung kann dann in Klasse 9 behandelt werden und führt dort in einem ersten Ansatz zur wissenschaftlichen Definition der elektrischen Spannung und zu einem tieferen und weitergehenden Verständnis des Spannungsbegriffs. Dieser Aspekt wird vom Bildungsplan nicht gefordert, ist aber für das Verständnis der elektrischen Spannung von grundlegender Bedeutung.

Großer Nachteil dieses Vorgehens: Die Frage, was denn nun die Spannung ist und über welche Wirkung sie das Voltmeter misst, kann man an dieser Stelle nicht beantworten!

Der Potenzialbegriff ist für viele Anwendungen durchaus hilfreich. Dazu müssen die Schülerinnen und Schüler mit diesem Begriff in besonderem Maße vertraut gemacht werden. Dabei steht die Angabe von Potenzialwerten in Schaltungen im Vordergrund. Sehr sinnvoll hat sich die Benutzung von unterschiedlichen Farben für hohes bzw. niedriges Potenzial erwiesen (vgl. [DB1, S. 201, Beispiel]). Hier wird die Farbe Rot für niedriges, die Farbe Blau für hohes Potenzial verwendet. Da es jedoch auf elektrischen Geräten üblich ist, den Minusanschluss, das niedrige Potenzial, blau, und den Plusanschluss, das hohe Potenzial, rot zu kennzeichnen, erscheint auch diese Farbwahl im Schülerheft und an der Tafel sinnvoll. So wird es auch in [U1, S. 269 u.a.] gemacht. Die Farbkennzeichnung wird schwieriger, wenn neben hohem und niedrigem Potenzial weitere Potenzialwerte auftreten, hier wäre eine farbige Abstufung denkbar (vgl. [U1, S. 271f., S. 282]). Unerlässlich ist es jedoch, die Potenzialwerte an den interessierenden Stellen zu notieren.

## Messen

Schüler haben bis zum Abitur bei der Messung von  $I$  und  $U$  die größten Schwierigkeiten. Auch im Hinblick auf NwT muss das richtige und sichere Messen der beiden Größen ein wichtiges Ziel der Unterrichtseinheit sein.

## Elektrostatik - Elektronenvorstellung

D[7/8], [DP1] und [I7/8] führen das Elektron in unterschiedlicher Tiefe noch vor Ladung und Stromstärke ein. Sie können dann 1 C als die Ladung von vielen Elektronen darstellen und die Stromstärke  $I$  als das Fließen dieser Ladung beschreiben. Damit kommen sie alle in unauflösbaren Konflikt bei dem geforderten Analogieschluss vom Wasserstromkreis zum elektrischen Stromkreis: Beim Wasserstromkreis fließt das Wasser vom höheren Potenzial zum niedrigeren, im metallischen Leiter fließen die Elektronen den Potenzialberg hinauf! Die entsprechenden Zeichnungen in den Schulbüchern zeigen das Dilemma.

Will man die Analogie zwischen dem Potenzial im Wasserstromkreis und dem elektrischen Potenzial benutzen, so darf man vor der Einführung der Stromstärke noch keine Elektrostatik und kein Elektronenmodell behandeln. Man beschreibt das im Stromkreis zirkulierende Fluidum als „strömende Elektrizität“ bzw. „elektrische Ladung“. [U1] geht als einziges Schulbuch diesen Weg. Schüler, die früher schon das Elektron ins Spiel bringen, kann man auf die Elektrostatik im Anschluss an das Kapitel vertrösten. Dort muss man dann zeigen, dass das Fließen von  $-Q$  vom Minusanschluss zum Plusanschluss der Quelle vollkommen gleichwertig ist mit dem Fließen von  $+Q$  in entgegengesetzter Richtung. Außerdem ist bei der Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten keine Fließrichtung ausgezeichnet.

## Ohm'sches Gesetz – elektrischer Widerstand, Schaltung von Widerständen

Die quantitative Beschreibung von „Strom, Antrieb und Widerstand“ wird vom Bildungsplan erst für die Klassenstufe 9/10 gefordert. Die Behandlung des Ohm'schen Gesetzes ist gar nicht verlangt. Eine quantitative Behandlung des Ohm'schen Gesetzes und des elektrischen Widerstands wird jedoch von fast allen Schulbüchern, außer [C1]. Gründe, die dafür sprechen, sind:

- Es handelt sich um die quantitative Formulierung des qualitativ erarbeiteten Zusammenhangs.
- Gefahren der Elektrizität, Kurzschluss sind sonst nicht befriedigend behandelbar.
- Die Stofffülle und Zeitknappheit in Klasse 9/10 legen nahe, diese Themen bereits in Klasse 7/8 zu behandeln.

Bis auf [17/8] behandeln auch alle Schulbücher die Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung am Ende der Einheit in Klasse 7/8. Die Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung sind im Hinblick auf den Alltagsbezug und auf NwT prinzipiell unverzichtbar. Sie passen gut an das Ende der Einheit, erhöhen aber die Stofffülle nochmals beträchtlich. Der vorgestellte Lehrgang behandelt das Ohm'sche Gesetz und die elektrischen Widerstand in Klasse 7/8 quantitativ. Die Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung werden wie in [17/8] hingegen erst in Klasse 9/10 behandelt. Die Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung sind für das grundlegende Verständnis (Messung von Spannung und Stromstärke, Einfluss des Messwerkzeugs dabei, Bedeutung des Innenwiderstands von Messgeräten), für den Alltagsbezug (Parallelschaltung von Geräten im Haushalt), für die Einheit Elektronik (Vorwiderstand bei der Leuchtdiode) und für den NwT-Unterricht notwendig.

In Klasse 9/10 kann dann auch der Zusammenhang zwischen den Methoden Induktion und Deduktion bei der Erarbeitung der Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung aufgezeigt werden.

## Mögliche Stoffanordnung

In der Tabelle sind diejenigen Inhalte, die durch die Vorgaben der KMK-Standards, des Bildungsplans 2004 Baden-Württemberg und durch die Mustercurricula als verpflichtend angesehen werden. Die nicht fettgedruckten u Inhalte dienen zur weiteren Vertiefung im Sinne eines Schulcurriculums. Die Art und Weise der didaktisch-methodischen Behandlung der jeweiligen Inhalte und Themen unterliegt in jedem Fall der didaktischen Freiheit der Lehrerin und des Lehrers, die vorgestellte Lehrgangsskizze stellt nur einen möglichen Vorschlag zur Behandlung im Unterricht dar. Da der vorgestellte Lehrgang eine in sich geschlossene, logische und aufeinander aufbauende Einheit darstellt, sind bei der Entnahme einzelner Stunden die jeweiligen Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schüler zu berücksichtigen. Die angegebene Stundenzahl ist als eine Minimalstundenzahl anzusehen.

In der Lehrgangsskizze selbst sind die verpflichtenden Inhalte in den Überschriften schwarz gedruckt und zusätzlich mit P gekennzeichnet, die nicht verpflichtenden Inhalte sind in den Überschriften grau gedruckt und zusätzlich mit W gekennzeichnet.

### Klasse 7/8

Themen und Inhalte	Stunden	Summe
<b>Der elektrische Stromkreis – Strom, Antrieb (Ursache), Widerstand – Begriff</b>	<b>1</b>	<b>20</b>
<b>der elektrischen Ladung</b>		+
<b>Leiter, Isolator</b>	<b>1</b>	11
Anschlüsse der Quelle	1	
<b>Energieübertragungsanlagen – Beschreibung elektrischer Energietransporte (Kraftwerke und ihre Komponenten)</b>	<b>2</b>	
<b>Wirkungen des elektrischen Stromes: Wärmewirkung und magnetische Wirkung sowie ihre Anwendungen</b>	<b>2</b>	
<b>Elektrische Stromstärke in Analogie zur Wasserstromstärke („Strom“)</b>	<b>3</b>	
<b>Messinstrumente, Übungen zum Messen</b>		
<b>Elektrische Ladung</b>	<b>1</b>	
<b>Antrieb des elektrischen Stromes: Elektrisches Potenzial, Potenzialdifferenz, Spannung, Messungen</b>	<b>2</b>	

<b>Der Nullpunkt des Potentials, Darstellung von Potentialen</b>	<b>1</b>	
Die Nennspannung	1	
<b>Messung von Potentialen und Spannungen bei Reihen- und Parallelschaltung elektrischer Quellen</b>	<b>2</b>	
<b>Das Ohm'sche Gesetz - Der elektrische Widerstand</b>	<b>1 - 1</b>	
Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	1	
Messung des Widerstands von Drähten, Anwendungen	1	
<b>Kennlinien von elektrischen Geräten bzw. Bauteilen</b>	<b>2</b>	
<b>Elektrostatik: Zwei Arten elektrischer Ladungen, Kräfte zwischen Ladungen,</b>	<b>2</b>	
Elektroskop		
Elektrische Neutralisation und elektrische Influenz	1	
Der glühelektrische Effekt, Elektronen, Braun'sche Röhre	1	
Elektrostatik im Elektronenbild	1	
Elektronenleitung in Metallen, Ionenleitung, Stromrichtungen	1	

## Klasse 9/10

Themen und Inhalte	Stunden	Summe
<b>Das elektrische Feld in Analogie zum magnetischen Feld</b>	<b>2</b>	
Energetischer Aspekt der elektrischen Spannung	2	
<b>Elektrisch übertragene Energie</b>	<b>1</b>	
<b>Wirkungsgrad und Energiemessungen</b>	<b>1</b>	
<b>Elektrische Energiequellen und elektrische Energiespeicher,</b>	<b>2</b>	
<b>Energieübertragungsanlagen</b>		
<b>Der Elektromotor</b>	<b>1 - 1</b>	
<b>Der Generator – Die elektromagnetische Induktion</b>	<b>2</b>	
<b>Der Transformator</b>	<b>1</b>	
<b>Parallelschaltung von Widerständen, Ladungserhaltung</b>	<b>2</b>	
<b>Reihenschaltung von Widerständen</b>	<b>2</b>	<b>17</b>
Vertiefung: Potenzial und Potenziometerschaltung	1	+
Der Vorwiderstand	1	13
Anwendungen	1	
<b>Die Halbleiterdiode als richtungsabhängiger Widerstand</b>	<b>1</b>	
<b>Die Solarzelle</b>	<b>1</b>	
Reine Halbleiter	1	
Die Dotierung von Halbleitern	1	
Aufbau der Halbleiterdiode und Erklärung der Ventilwirkung	1	
<b>Der Transistor als steuerbarer Widerstand – Der Feldeffekttransistor</b>	<b>1</b>	
Kennlinien des FET	1	
Anwendungen des FET zum Steuern, als Sensor und Verstärker	1	
<b>Vertiefung: Kennlinien elektrischer Geräte und Bauteile</b>	<b>2</b>	

## Verbindliche Inhalte

Für den Unterricht in der Sekundarstufe I sind die im Bildungsplan 2004 Baden-Württemberg geforderten Kompetenzen und Inhalte verbindlich sowie die von der Kultusministerkonferenz formulierten KMK-Standards für den mittleren Bildungsabschluss<sup>15</sup>. Im jeweiligen Kerncurriculum der Mustercurricula für die Klassen 7/8 und 9/10 werden diese Inhalte konkretisiert und versuchen, dem Unterricht in Baden-Württemberg einen einheitlichen Rahmen zu geben. Darüber hinaus kann jede Schule in ihrem Schulcurriculum über diese geforderten Inhalte hinaus gehen.

➡ [Verbindliche Inhalte zur Elektrizitätslehre in der Sekundarstufe I](#) .Eine mögliche Zuordnung von Inhalten zu den im Bildungsplan formulierten Kompetenzen findet sich hier: ➡ [Zuordnung Kompetenzen und Inhalte Klasse 7/8](#) und ➡ [Klasse 9/10](#).

<sup>15</sup> [http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf)

# Lehrgangsskizze in Klasse 7/8

Vorschlag für einen Lehrgang zum elektrischen Stromkreis und zu Leiter und Isolator, falls das Thema Elektrizität nicht in den Naturphänomenen unterrichtet wurde [ElStromkreis](#)

## Der elektrische Stromkreis – Strom, Antrieb (Ursache), Widerstand – Begriff der elektrischen Ladung (P)

Wiederholung der Inhalte aus den Naturphänomenen<sup>16</sup>

Methodische Varianten: Planarbeit, Erstellung einer Mindmap, Lernzirkel oder

**S-V: Experimentelle Aufgabe oder vorbereitende Hausaufgabe im Team** (Es bietet sich der

Schülerexperimentierkasten der Fa. Mekruphy „Elektrik 1“ an.) Das Thema eignet sich auch für das Einüben der Kompetenz „Experimente unter Anleitung selbstständig planen“ – siehe ZPG I: Material von M. Renner zur Planung von Experimenten.

**Physik Kl. 8 / Teamaufgabe zur Leitfähigkeit** Name: \_\_\_\_\_ gemeinsam mit Name: \_\_\_\_\_

Geräte: 1 Flachbatterie, 2 Krokodklemmen, 3 Kabel, 1 Lämpchen, 1 Fassung,

Aufgabe: **Untersuche die Leitfähigkeit verschiedener Stoffe.**

(1) Entwirf einen Versuch, mit dem mit dem Du feststellen kannst, ob ein Stoff die Elektrizität leitet oder nicht. Zeichne einen Schaltplan

(2) Untersuche die Leitfähigkeit von möglichst vielen festen Stoffen. Stelle das Ergebnis in folgender Tabelle dar:

<i>gute Leiter</i>	<i>schlechte Leiter</i>	<i>Nichtleiter</i>

(3) Untersuche die Leitfähigkeit von möglichst vielen Flüssigkeiten. (z.B. Leitungswasser, Salzlösung, d.h. Salz in Wasser gelöst, Zuckerlösung, Essig, Öl, ...) Stelle das Ergebnis in einer entsprechenden Tabelle dar.

Wiederholung, Präzisierung

Falls notwendig, experimentelle Klärung, ob auch in der Quelle und im elektrischen Gerät eine leitende Verbindung bestehen muss, damit Strom fließt:

**V: Am OHP (Overheadprojektor) oder Präsentier Glühlampe ohne Sockel zeigen.**

**V: Am OHP defekte durchsichtige Glühlampe zeigen. Nachprüfen, dass sie defekt ist.**

**V: Am OHP intakte durchsichtige Glühlampe zeigen und Funktion überprüfen.**

**V: Am OHP die leitende Verbindung durch das Lämpchen zeichnen.**

Beobachtung: Die leitende Verbindung muss auch im Lämpchen bestehen.

**V: Spule als Stromquelle**

Geräte: 1 Solar - Glockenanker - Motor (0,15 V/1 mA)<sup>17</sup>, ca. 100 Windungen Draht auf ein Pappe- oder Kunststoffröhrchen gewickelt, Leybold - Spule 1000 Windungen, Stabmagnet

Durchführung: Die Enden des Drahts werden mit dem Motor verbunden und der Magnet in das Röhrchen geschoben. Dann wird der Draht abgerollt. Im Anschluss kann zur Verdeutlichung des Effekts die Drahtwicklung durch die Leybold - Spule ersetzt werden.

**V: Zitrone als Stromquelle**

Geräte: 1 Solar - Glockenanker - Motor 0,15 V/1 mA, 1 Cu - und 1 Fe - Elektrode ca. 3 cm x 5 cm, 1 Zitrone

Durchführung: Die Elektroden werden mit dem Motor verbunden und in die Zitrone gesteckt. Schneidet man die Zitrone zwischen den Elektroden durch, so bleibt der Motor stehen. Presst man sie wieder zusammen, so dreht sich der Motor weiter.

Beobachtung: Die leitende Verbindung muss auch in der elektrischen Quelle bestehen.

Ergebnis:

Ein elektrischer Stromkreis besteht aus einer elektrischen Quelle (Batterie, ...), aus einem elektrischen Gerät (Lämpchen, ...) und Leitungen. Die elektrische Quelle stellt den Antrieb, das elektrische Geräte und die Leitungen einen Widerstand dar. Der Stromkreis ist geschlossen, wenn eine nicht unterbrochene, leitende Verbindung zwischen den Anschlüssen der Quelle und des Geräts sowie in der Quelle und im Gerät selbst besteht.

Die Quelle treibt dann eine elektrische Substanz durch den Leiterkreis, die wir **strömende Elektrizität** oder **strömende elektrische Ladung** nennen wollen. Wir sagen auch: **Es fließt elektrischer Strom.**

Das Lämpchen dient uns als Nachweisgerät für die strömende Elektrizität.

Impuls: Um die Vorgänge im geschlossenen Stromkreis besser veranschaulichen zu können, kann man ihn mit einem

<sup>16</sup> Voraussetzung: Elektrizitätslehre in den Naturphänomenen gemäß Bildungsplan

<sup>17</sup> <http://www.lemo-solar.de>

geschlossenen Wasserkreislauf vergleichen:

**V: Wassermmodell mit einem Wasserkreisel zum einfachen Stromkreis.**

Schüler finden die Entsprechungen:

**Antrieb:** Der elektrischen Quelle entspricht die Pumpe.

**Widerstand:** Dem elektrischen Gerät entspricht die Turbine, den Drähten entspricht die Wasserleitung.

**Strom:** Der strömenden Elektrizität bzw. der strömenden elektrischen Ladung entspricht das strömende Wasser. Dem Schalter entspricht das Absperrventil. So wie das strömende Wasser im Stromkreis nicht erzeugt wird und auch nicht verloren geht, wird auch die Ladung nicht erzeugt und geht auch nicht verloren. Die Quelle pumpt die Ladung unter Aufwand von Energie durch den Stromkreis hindurch.

## Leiter und Isolator (P)

Ergebnis: Zusammenstellung guter Leiter und Isolatoren bei festen Stoffen.

**Ergänzung, falls Zeit:** Ergänzende Versuche zur Überprüfung der Leitfähigkeit bei Flüssigkeiten und Gasen:

**V Leitfähigkeit des menschlichen Körpers.**

1. Demonstrations- Drehspulinstrument in Reihe mit 2 V-Akku und 2,5 V-Lämpchen schalten und so demonstrieren, dass das Drehspulinstrument ebenfalls ein Nachweisgerät für den elektrischen Strom ist. Mitteilung, dass seine Funktionsweise später noch untersucht wird.

2. Zur Demonstration Leitfähigkeit des menschlichen Körpers: Stromkreis aus 2V-Akku, Demonstrations-Drehspulinstrument 300  $\mu$ A, erst trockene, dann nasse Lehrerhand (C 117.19).

**V Leitfähigkeit von Leitungswasser, destilliertem Wasser. (Mit dem Aufbau des vorangegangenen Versuchs)**

**V: Demonstration: Salz und destilliertes Wasser sind Isolatoren, Salzwasser leitet**

Ergebnis: Leiter: Salzlösungen, Essiglösungen, Laugen,... Isolatoren: Destilliertes Wasser, Öl.

Merke: Die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten beruht auf den in der Flüssigkeit gelösten Stoffen.

**V: Leitfähigkeit von Gasen: 1. Offener Schalter: Gase sind unter "normalen Bedingungen" Isolatoren.**

**2. Gasentladungsröhre in Reihe mit 1 mA-Motor 3. Glimmlampe, 4. Erörterung Funken und Blitze.**

Ergebnis: Gase sind unter Umweltbedingungen Isolatoren. Sie können jedoch unter besonderen Umständen leiten. Dabei senden sie Licht aus. Die Glimmlampe ist ein weiteres empfindlicheres Nachweisgerät für strömende Elektrizität.

## Anschlüsse der Quelle (W)

**V: Glimmlampe UR 110 an ein variables Hochspannungsnetzgerät mit  $I_{\max} = 3 \text{ mA}$  ohne Lämpchen und Vorwiderstand. Anschlüsse der Quelle vertauschen.**

Ergebnis: Beim Anschluss einer Glimmlampe an eine Quelle leuchtet das Gas nur um die Elektrode, die mit einem bestimmten Anschluss der Quelle verbunden ist. Man bezeichnet ihn als den negativen Anschluss der Quelle, den anderen als den positiven Anschluss.

**V: Glimmlampe an Wechselspannungsquelle („Volksoszilloskop“)**

Ergebnis: Gleichspannungsquelle: Anschlüsse bleiben gleich; Wechselspannungsquelle: 50 mal in der Sekunde ist ein Anschluss positiv, dazwischen negativ. Bild [D7/8] S. 185, B 2b

## Energieübertragungsanlagen - Beschreibung elektrischer Energietransporte (P)

Frage: Welche elektrischen Anlagen kennt ihr? Wofür dienen elektrische Anlagen?

Erörterung: Elektrische Anlagen dienen

a) zur Energieübertragung

b) zur Informationsübertragung.

Da auch bei der Informationsübertragung ein Energietransport stattfindet und weil die Informationsübertragung wesentlich komplizierter ist, sollten wir uns zunächst mit der Energieübertragung beschäftigen.

Frage: Wie wurde früher Energie übertragen?

**M: Bilder alter Fabrihallen aus dem 19. Jahrhundert.**

**V: Demonstration einer mechanischen Transmission**

Frage: Kennst du noch weitere Energieübertragungssysteme? Gibt es eine allgemeine Struktur?

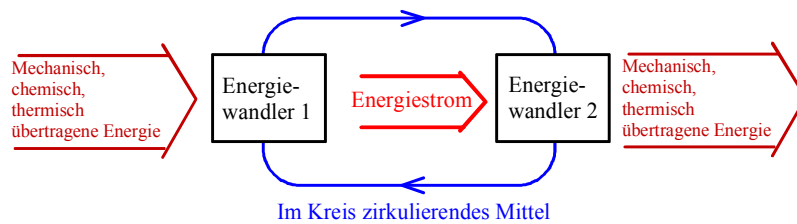
Erörterung: Kettenantrieb beim Fahrrad, Wasserkreislauf, Blutkreislauf, Windmühlen und Wasserräder.

**V: Demonstration des Fahrradketten - Modells mit einem Ritzel.**

**M: Bilder: Blutkreislauf<sup>18</sup>, Wasserkreislauf in einem Kraftwerk: DMb 100.1**

<sup>18</sup> PdN-Ph. 7/43 Jg. 1994 (34)



Ergebnis:

Bei allen betrachteten Energieübertragungsanlagen überträgt ein im Kreis strömendes Mittel Energie vom Energiewandler 1 („Quelle“) zum Energiewandler 2 („Verbraucher“, „elektrisches Gerät“). Im Energiewandler findet ein Wechsel der Energieformen statt (z.B. mechanische Energie in elektrische Energie im Energiewandler 1, elektrische Energie in mechanische Energie im Energiewandler 2). Dabei geht keine Energie verloren, der Energieerhaltungssatz gilt. Unter Umständen wird jedoch Entropie erzeugt.

Unabhängig von der Art des zirkulierenden Mittels (Riemen, Kette, Wasser, Luft, Elektrizität) bewirkt der Kreislauf einen kontinuierlichen Energiestrom von der Quelle zum Verbraucher.

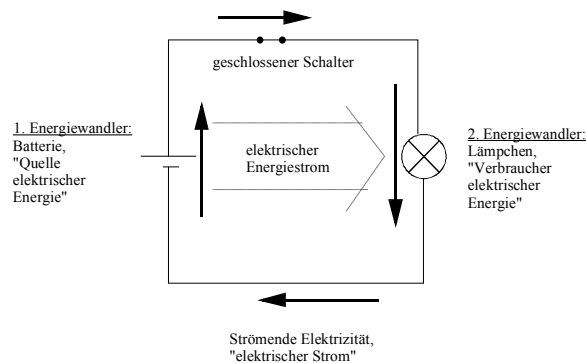
Meinen wir diesen Strom, so wollen wir in Zukunft stets das Wort **Energiestrom** dafür verwenden. Die pro Sekunde übertragene (und in einem Energiewandler umgesetzte) Energie wird mit **Leistung P** oder **Energistromstärke** bezeichnet. Es gilt:

$$\text{Leistung} = \frac{\text{übertragene Energie}}{\text{zeit}} \text{ bzw. } P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Bemerkung: Ein quantitativer Umgang mit dieser Gleichung ist hier noch nicht erforderlich.

Einheit: 1 W (Watt)

Konkretisierung im elektrischen Stromkreis:



**Praktikum:** Energie- bzw. Leistungsmessungen an Alltagsgeräten: Einübung des Umgangs mit Messgeräten zur Messung elektrischer Energie bzw. elektrischer Leistung (Messgeräte als Black-Box)

**Dazu erforderlich:**

**Einheit der Energie**

1 Kilowattstunde:	1 kWh = ... = 3 600 000 J
1 Megawattstunde	1 MWh = ...
1 Wattsekunde	1 Ws = 1 J

**Einheiten der Leistung**

1 Kilowatt	1 kW = 1000 W = 1000 J/s
1 Megawatt	1 MW = ...
1 Watt	1 W = 1 J/s

## Elektrische Energiequellen und elektrische Energiespeicher (P)

Ich-Du-Wir-Methode: Welche elektrischen Quellen kennt ihr? Nennt Gemeinsamkeiten und Unterschiede!

Mögliche Antworten: Batterie, Akkumulator, Generator, Solarzelle, Knallgaszelle, Brennstoffzelle

Gemeinsamkeiten und Unterschiede: Energiespeicher, Energiewandler, wiederaufladbar, nicht wiederaufladbar, mechanisch, chemisch, ...

**SV:** [U1, S. 282] Elektrische Energiequellen erzeugen eine Spannung durch Bewegung, durch Licht, durch Stoffumwandlung oder [CF1, S. 175]

Ergebnis: In einem geschlossenen Stromkreis wird die Ladung von der Energiequelle durch den Stromkreis getrieben. Innerhalb der Energiequelle muss die Ladung jedoch auch fließen. Dazu muss sie vom Minuspol zum Pluspol gepumpt werden. Im Generator geschieht dies durch geschicktes Bewegen des Magneten in der Spule, in der Solarzelle durch das Licht und in der Batterie und dem Akku durch chemische Reaktionen der enthaltenen Stoffe. Einen Akku kann man wieder aufladen, dazu muss man ihm Energie durch elektrischen Strom zuführen. Beim Entladen gibt er die Energie wieder ab.

**DV:** [U1, S. 281, Bild 03] Energieübertragung aus Solarzelle, Knallgaszelle, Brennstoffzelle und Motor

Eine Erklärung der Funktion (funktionale Erklärung bezüglich der Energieumsetzung) genügt: Beispiel: Die Solarzelle als Energiewandler (Quelle) wandelt die von der Sonne übertragene Energie in elektrische Energie um.

Evtl. Erweiterung im LV: Einfache Erklärung der Knallgaszelle und Brennstoffzelle: Fließt Ladung durch die Knallgaszelle, so wird Wasser in seine chemischen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. In der Brennstoffzelle entsteht aus Wasserstoff und Sauerstoff aufgrund einer chemischen Reaktion wieder Wasser. Dabei wird die Ladung vom Minuspol zum Pluspol gepumpt.

Partnerarbeit: Welche Energieübertragungen finden statt? Benenne die Energiewandler! Zeichne eine Energieübertragungskette!

Ergebnis: [U1, S. 281, Bild 02] oder [DB1, S. 220]

Energiespeicher: [CF1, S. 138f.]: Batterie und Akkumulator sind elektrische Energiespeicher: In Energiespeichern kann Energie über einen längeren Zeitraum aufbewahrt werden. Elektrische Energie wird in Elektrizitätswerken durch Verbrennung von Kohle, Erdöl oder Erdgas gewonnen. Fossile Brennstoffe sind sehr gute Speicher chemischer Energie.

Evtl. Diskussion der Problematik der Speichermöglichkeit elektrischer Energie: Reichweite von Elektrofahrzeugen, Sinn von Hybrid-Fahrzeugen

Evtl. Besprechung weiterer Speichermöglichkeiten für die verschiedenen Energieformen [CF1, S. 139]

**AA:** Teamarbeit oder Schülerreferate zur Energieversorgung:

- Kraftwerke und ihre Komponenten. Diskussion von Generator und Elektromotor unter energetischem Aspekt (funktionale Erklärung bezüglich der Energieumsetzung genügt).
- Regenerative Energieversorgung (Solarzelle, Windkraftwerk, Brennstoffzelle – funktionale Erklärung bezüglich der Energieumsetzung genügt)

## Wirkungen des elektrischen Stromes (P)

### Die Wärmewirkung

Variante 1: Eigenständige Erarbeitung mit selbstständiger Planung von Experimenten: [☛ Wärmewirkung des elektrischen Stromes \(Experimente planen Beispiele.doc\)](#)

Variante 2:

Problemstellung: Bei der eingangs geführten Diskussion zu den Anwendungsbereichen elektrischer Anlagen wurden unter anderem die verschiedensten elektrischen Heizgeräte genannt. Wie funktionieren sie? Was haben sie gemeinsam?

**PA:** Teamarbeit oder Lernzirkel zur Untersuchung alter defekter elektrischer Alltagsgeräte: Haartrockner, Bügeleisen, Heizstrahler, Heizplatten, Toaster,...

Ergebnis: Alle Geräte enthalten einen mehr oder weniger stark gewendelten, dünnen Draht. Er wird vom elektrischen Strom zum Glühen gebracht. Elektrische Energie wird hier in thermische Energie umgewandelt. Es wird Entropie erzeugt.

Falls Zeit: Weitergehende Untersuchungen [☛ Wärmewirkung.doc](#)

**Anwendungen:** (Mensch: Sicherheitsaspekte) [☛ E\\_Lehre-Gefahren.doc](#)



Schmelzsicherung:

**V: Kurzschluss:** Konstantendraht 0,1 mm zwischen Isolierstäbe in Reihe mit 12 V/0,3 A - Lämpchen an Netzgerät. Beim Betrieb Lämpchen überbrücken. Der Draht brennt durch.

**Erklärung:** Durch den kurzen Drahtbügel findet die Elektrizität zusätzlich einen „bequemen“ Nebenweg. In der Zuleitung fließt ein zu großer Strom.

**V: Überlastung:** Statt zu überbrücken, weitere gleichartige Lämpchen parallel zum obigen Lämpchen schalten, bis der Faden schmilzt.

**Erklärung:** Die Lämpchen bilden für die Elektrizität zusätzliche Nebenwege. In der Zuleitung fließt ein zu großer Strom.

**M: Demonstration verschiedener Schmelzsicherungen.**

**M: Demonstration von Bimetallschaltern insbesondere in Sicherungsautomaten.**

**Experimentelle Hausaufgabe:** Bau eines Styroporschneiders (C1 118.9).

Falls Zeit:

**M: Demonstration der Doppelwendel in einer Halogenglühlampe.**

**Frage:** Was bringt das für einen Vorteil?

**V:** Nicht gewendelten, einfach gewendelten und doppelt gewendelten Konstantendraht 0,2 mm (Stricknadel umwickelt) erstellen, die Drähte in Reihe an Trenntransformator (Man benötigt eine Spannung bis zu 100 V).

**Ergebnis:** Der Draht ist gewandelt, damit sich benachbarte Drahtstücke gegenseitig aufheizen können. Dadurch wird er so heiß, dass er hell glüht und damit leuchtet.

**Die magnetische Stromwirkung**Stromdurchflossener Leiter

**V:** Oersted-Versuch

**V:** Magnetfeld eines geraden Leiters.

**Linke - Faust - Regel:** Umfasst man den stromdurchflossenen Leiter mit der linken Hand so, dass der Daumen in Richtung vom Minus- zum Plusanschluss der Quelle weist, so zeigen die Finger die Richtung der magnetischen Feldlinien an.

**Evtl. Hinweis auf eine entsprechende Rechte-Faust-Regel.**

Spule

**Ergebnis:** Im Innenraum ein homogenes Magnetfeld mit starken magnetischen Kräften. Im Außenraum ein Feld, das dem eines Stabmagneten gleicht. Scheinbar vorhandene Pole, trotz geschlossener Feldlinien.

**V:** Demonstration der die Magnetkraft verstärkenden Wirkung eines Eisenkerns

**Experimentelle Hausaufgabe:** Bau eines Elektromagneten

Anwendungen

**SV:** Schülergruppen bauen die einzelnen Versuche auf und führen sie der ganzen Klasse vor:

Relais, elektrische Sicherung, elektrische Klingel (Aufbau mit Stativmaterial, möglichst groß), Lasthebemagnet; Lautsprecher

**Die elektrische Stromstärke (P)**

**Leitproblem:** Wir wollen die Stärke des elektrischen Stromes messen.

**Erinnerung** an die Definition der Stromstärke am Ende der Einheit zum Druck.

$$\text{Stromstärke } I = \frac{\text{Menge des strömenden Mittels, das eine Messstelle passiert}}{\text{dafür benötigte Zeit}}$$



Messstelle

**Wasserstromkreis:** Die groß, wenn pro Sekunde eine große Messstelle vorbeiströmt:  $I_{\text{Wasser}} = V_{\text{Wasser}} / t$ .

Wasserstromstärke  $I_{\text{Wasser}}$  ist Wassermenge  $V_{\text{Wasser}}$  an einer

Analoges Übertragen auf den elektrischen Strom: Es fließt ein großer elektrischer Strom, wenn viel Elektrizität bzw. Ladung pro Zeiteinheit eine Messstelle (Leiterquerschnitt) passiert.

Problem: Wir sehen den elektrischen Strom nicht.

Lösung: Wir sehen seine Wirkungen.

Festlegung: Es fließt ein großer elektrischer Strom, wenn eine seiner Wirkungen (Wärmewirkung, magnetische Wirkung) besonders groß ist. Dann fließt viel Elektrizität bzw. Ladung pro Sekunde durch einen Leiterquerschnitt.

### Variante 1 bei extrem wenig Zeit

**V:** Drehspulinstrument in Reihe mit Lämpchen an 1,5 V-Batterie, dann an 4,5 V-Flachbatterie.

Mitteilung: Da wir die Ladung, die an einer Messstelle vorbeikommt, nicht direkt messen können, nutzen wir in den Stromstärkemessgeräten eine ihrer Wirkungen aus, hier die magnetische Wirkung. Bei einem großen Strom – ersichtlich am hell leuchtenden Lämpchen – erhalten wir einen großen Zeigerausschlag, bei einem kleinen Strom einen kleinen.

Merke: Die elektrische Stromstärke gibt an, wie viel Ladung pro Zeit durch einen beliebigen Leiterquerschnitt fließt. Messgeräte sind Amperemeter. In ihnen werden die Wirkungen des elektrischen Stromes zur Messung ausgenutzt. Das Größensymbol für die elektrische Stromstärke ist  $I$ .

Die Einheit der elektrischen Stromstärke ist ein elektrischer Strom, bei dem eine genau bestimmte magnetische Wirkung gemessen wird. Sie heißt **1 Ampere = 1 A**.

### Variante 2: „Als Erfinder tätig:“

Ziel: Wir wollen ein Gerät erfinden, mit dem wir die elektrische Stromstärke messen können. Ein großer Strom soll einen größeren Zeigerausschlag bewirken als ein kleiner Strom.

Einziges, bislang bekanntes „je - desto - Messgerät“: Glühlämpchen.

Ideensammlung: Ich – Du – Wir – Methode

## **Das Hitzdrahtinstrument**

**V:** Vorversuch Konstantandraht ( $D = 0,2 \text{ mm}$ ) durch Wägestück ( $m = 50 \text{ g}$ ) beschwert, in Reihe mit Lämpchen (12V/35W) an 25 V.

**V:** Demonstration eines Hitzdrahtinstruments.

Erg.: Je größer der Strom, desto heißer und somit länger der Draht, desto größer der Zeigerausschlag.

## **Das Drehspulinstrument**

**V:** Vorversuch nach **DMb 150.3**

**V:** Demonstration eines Drehspulinstruments und seine Erklärung

Erg.: Je größer der elektrische Strom, desto größer die magnetische Kraft, desto größer der Zeigerausschlag.

## **Kalibrieren der Skala (W)**

Leitproblem: Um mit einem der Instrumente die Größe des elektrischen Stromes messen zu können, benötigen wir noch eine Skala.

Die Maßeinheit der elektrischen Stromstärke: Die Einheit der elektrischen Stromstärke ist ein elektrischer Strom, bei dem eine genau bestimmte magnetische Wirkung gemessen wird. Sie heißt **1 Ampere = 1 A**.

Die 1 A - Marke kann man sich bei der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig an einem Messinstrument anbringen lassen (Maßeinheit).

Anbringen der 1 A - Marke: (Analogie zum Wasserstromkreis nutzen)

Frage: Angenommen man hat ein Gerät mit einer 1 A - Marke. Wie erhält man die 1 A -Marke auf noch nicht kalibrierten Messgeräten?

S-Vorschlag: Das zu kalibrierende Gerät soll mit diesem in Reihe geschaltet werden.

**V:** Ein Drehspulinstrument besitzt die 1 A - Marke<sup>19</sup>, zwei andere, sowie das demonstrierte Hitzdrahtinstrument besitzen noch keine Marke. Mit Schablonen Skalen abdecken.

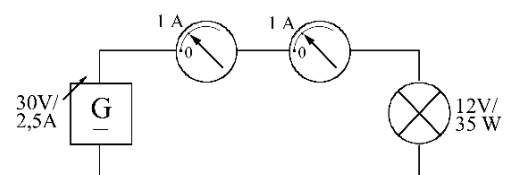
Anbringen des 1 A - Strichs auf allen anderen Instrumenten.

Überprüfung, ob die Methode sinnvoll ist:

**V:** Schaltung aller Instrumente in Reihe

Festlegung: Fließt in einem Stromkreis durch ein Messgerät ein Strom der Stärke 1 A, so fließt er auch durch jedes andere, dazu in Reihe geschaltete Gerät.

Anbringen der 2 A - Marke:



<sup>19</sup> Skalen der Instrumente werden mit einer Schablone abgedeckt [Schablone01](#)

S-Vorschlag: Verdopplung des Ausschlagwinkels der zur 1 A - Marke gehört.

V: Am Hitzdraht- und Drehspulinstrument wird durch Verdoppeln des Ausschlagwinkels die 2 A - Marke angebracht. Schaltet man die beiden Geräte (mit dem 12V/35W - Lämpchen) in Reihe, so zeigen sie nicht bei der selben Stromstärke 2 A an.

Ergebnis: Die Methode führt bei verschiedenen Instrumenten zu verschiedenen Werten für I bei der 2 A - Marke.

Folgerung: Man muss sich unabhängig von den Messgeräten überlegen, wann in einem Leiter ein Strom der Stärke 2 A fließt.

Betrachtung beim Wasserstromkreis:

Frage: Wie kann man beim Wasserstromkreis einen doppelt so großen Wasserstrom erzeugen?

S-Vorschlag: Zwei Leitungen von je 1 SE zusammenführen.

V: Demonstration am Wassermmodell, Aufbau (3) Parallelschaltung und quantitative Überprüfung: In den beiden Zweigen zeigt jeder Kreisel die gleiche Stromstärke an, in der Rückleitung zeigt der Kreisel die doppelte Stromstärke an.

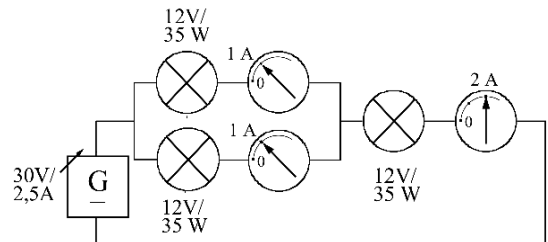
Betrachtung beim elektrischen Stromkreis:

S-Vorschlag:

V: Elektrisches Analogon

Ergebnis: Es ist sinnvoll, die Stärke dieses Summenstromes 2 A zu nennen (Maßvielfachheit).

Lernzielkontrolle: 0,5 A ?



Festlegung: Unter der Stromstärke 2 A (3 A, 4 A,...) verstehen wir die Stärke des Summenstroms, der in einer Leitung fließt, in der 2, 3, 4, ...Ströme von je 1 A zusammenfließen. Das Größensymbol für die elektrische Stromstärke ist I (Intensität).

Weiterführung des Lehrgangs

## Elektrische Stromstärke und elektrische Ladung (P)

**Bemerkung:** Die elektrische Ladung muss in Klasse 7/8 nur qualitativ behandelt werden.

Leitproblem: Wie kann man mit Hilfe der elektrischen Stromstärke angeben, wie viel Ladung in einer bestimmten Zeit durch ein elektrisches Gerät geflossen ist?

Betrachtung beim Wasserstromkreis:

Erinnerung: Wie konnte man bei gegebener Wasserstromstärke auf die in einer bestimmten Zeit geflossene Wassermenge schließen?

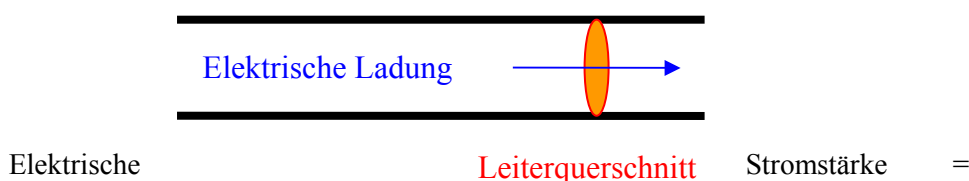
Ergebnis:  $I_W = \frac{V_W}{t}$  und  $V_W = I_W \cdot t$

Betrachtung beim elektrischen Stromkreis:

Analoge Begriffsbildung:

<i>Wasserstromkreis</i>	≡	<b>elektrischer Stromkreis</b>
Wasserstromstärke $I_W$	≡	elektrische Stromstärke I
Durchflossene Wassermenge $V_W$	≡	elektrische Ladungsmenge Q
Durchflussdauer t	≡	Durchflussdauer t
$V_W = I_W \cdot t$	≡	$Q = I \cdot t$

Merke:



durch einen beliebigen Leiterquerschnitt geflossene Ladung  
dafür benötigte Zeit

$$I = \frac{Q}{t}$$

und damit

$$Q = I \cdot t$$

Die Einheit der elektrischen Ladung ist 1 As oder 1 Ah = 3600 As.

Zur Abkürzung für 1 As ist international die Bezeichnung 1 Coulomb = 1 C üblich.

Somit: 1 As = 1 C; 1 A = 1 C/s.

Die elektrische Stromstärke gibt an, wie viel Ladung je Sekunde durch einen beliebigen Leiterquerschnitt fließt.

Erläuterung des Vorgehens beim Messen der elektrischen Stromstärke (Besonders gelungen bei [C1, S. 180], sonst [DB2, S. 195])

Zunächst analoge Stromstärkemessgeräte vorstellen, Teile benennen (dazu ein Messgerät auf den Kopierer legen und Kopien für Schüler und eine OHP-Folie anfertigen) und Schüler beschriften lassen. Messbereiche besprechen, Messübungen durchführen

Vorgehen beim Strommessen als Arbeitsblatt in den **Methodenordner**

☛ [Messen\\_von\\_Stromstaerke\\_und\\_Spannung.doc](#)

PA: Einübung: Welche Gesetzmäßigkeiten gelten für die Stromstärke in einer Reihenschaltung und Parallelschaltung von Lämpchen? Plane zu jedem Schaltungstyp einen Versuch. Zeichne eine Schaltung. Stelle anhand des Wassermodells Vermutungen auf, wie sich die Stromstärke in den Schaltungen verhält. Führe die Versuche durch und protokolliere die Ergebnisse. (Vgl. [I7/8, S. 204])

Übungsaufgaben wie [D7/8, S. 195] „Interessantes“ und zu  $Q = I t$  und entsprechenden Umformungen.

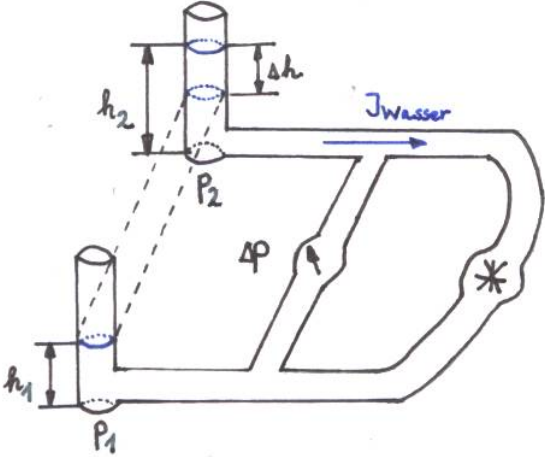
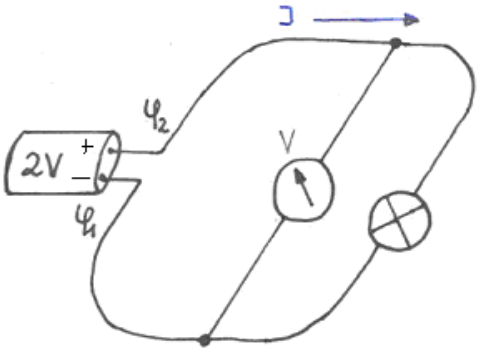
## Der Antrieb des elektrischen Stromes: Elektrisches Potenzial, elektrische Spannung (P)

Frage: Was bedeutet die Voltzahl auf den Batterien oder an der Steckdose?

V: Drehspulinstrument in Reihe mit Lämpchen an 1,5 V-Batterie, dann an 4,5 V-Flachbatterie. Oder Erinnerung

Beobachtung: Bei größerer Voltzahl größere Stromstärke.

Erarbeitung: Zum Verständnis kann auch hier der Wasserstromkreis hilfreich sein: [☛ 10AnalogieDruckPotential](#)

Wasserstromkreis	Elektrischer Stromkreis
	
Die Behälter 1 und 2 sind bis zur Höhe $h_1$ bzw. $h_2$ mit Wasser gefüllt.	Dem Druck entspricht im elektrischen Stromkreis das so genannte <b>elektrische Potenzial <math>\phi</math></b>

An den Öffnungen der Behälter herrscht der Druck $p_1$ und $p_2$ .	An den Anschlüssen der Batterie herrscht ein bestimmtes elektrisches Potenzial $\varphi_1$ und $\varphi_2$ .
<b>1. Fall:</b> Beide Behälter sind gleich hoch mit Wasser gefüllt: An den Anschlüssen der Leitungen herrscht der gleiche Druck $p_1 = p_2$ . Die Druckdifferenz $\Delta p = 0$ . Es fließt kein Wasserstrom: $I_{\text{Wasser}} = 0$ .	<b>1. Fall:</b> Ohne Batterie oder bei „leerer“ Batterie: An beiden Anschlüssen herrscht gleiches Potential: $\varphi_1 = \varphi_2$ . Die Potenzialdifferenz $\Delta \varphi = 0$ Es fließt kein elektrischer Strom: $I = 0$ .
<b>2. Fall:</b> In Behälter 2 ist die Höhe des Wasserstandes größer als in Behälter 1: $h_2 > h_1$ . Am Anschluss von Behälter 2 herrscht ein größerer Druck als am Anschluss von Behälter 1: $p_2 > p_1$ . Die Druckdifferenz ist größer als Null: $\Delta p = p_2 - p_1 > 0$ . Es fließt Wasser von Reservoir 2 zu 1 $I_{\text{Wasser}} > 0$ .	<b>2. Fall:</b> Mit intakter Batterie Das Potenzial am Plusanschluss ist größer als das Potential am Minuspol der Batterie: $\varphi_2 > \varphi_1$ . Die Potenzialdifferenz ist größer als Null: $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 > 0$ . Es fließt elektrische Ladung vom Plus- zum Minusanschluss der Batterie: $I > 0$ . Statt Potenzialdifferenz sagt man auch <b>elektrische Spannung U</b> . Die Einheit ist 1 V (Volt).
Eine Druckdifferenz zwischen den beiden Anschlüssen ist notwendig, damit Wasser von einem zum anderen Behälter fließen kann.  Die Druckdifferenz ist ein Maß für den Antrieb des Wasserstroms	Eine Potenzialdifferenz also eine Spannung zwischen den beiden Anschlüssen ist notwendig, damit elektrische Ladung von einem Anschluss zum anderen fließen kann.  Die Potenzialdifferenz bzw. Spannung ist ein Maß für den Antrieb des elektrischen Stroms.
Die Druckdifferenz misst man mit einem Druckmessgerät, wenn man es „parallel“ zu den Reservoirs in den Wasserstromkreis einbaut.	Die elektrische Spannung misst man mit einem Spannungsmessgerät (Voltmeter), wenn man es „parallel“ zu den Anschlüssen der Batterie in den elektrischen Stromkreis schaltet.

**Bemerkung:** Übliche Quellen wie Batterien, Netzgeräte und auch die Netzsteckdose im Haushalt sind Quellen, die die Potenzialdifferenz und damit die Spannung konstant halten. Das würde beim Wasserstromkreis einer Vorrichtung entsprechen, die unabhängig von der Wasserstromstärke die Höhendifferenz konstant hält.

**Merke:** Die elektrische Spannung  $U$  bzw. die Potenzialdifferenz zwischen den Anschlüssen einer elektrischen Quelle ist ein Maß für den Antrieb (Ursache) des elektrischen Stromes. Ihre Einheit ist 1 V (Volt).

Sie entspricht der Druckdifferenz im Wasserstromkreis.

## Der Nullpunkt des Potentials – Darstellung von Potentialen (P)

Zu erarbeiten (Vgl. [D7/8] S. 2001):

Es kommt nur auf die Potenzialdifferenz zwischen den Anschlüssen einer Quelle an.

Für die leitende Erde legt man willkürlich das Potenzial 0 V fest.

Zum Vergleich von Potentialen in elektrischen Schaltungen verbindet man häufig den Anschluss mit dem niedrigeren Potential (Minusanschluss) mit der Erde. Dadurch erhält er das Potenzial 0 V.

Darstellung von Potentialen als Potentialgebirge über den Stromkreisen oder als Balken neben den Leitungen.

**M:** Simulationsprogramm Crocodile Physics (Yenka)<sup>20</sup> (Vgl. DP1 S. 198 )

PA: Einübung:

Messung von Potentialen und Spannungen bei Reihen- und Parallelschaltung von Batterien, Formulierung der Ergebnisse, Zeichnen von Potentialgebirgen. (Versuch planen, Schaltplan zeichnen, Hypothesen aufstellen, mit

<sup>20</sup> <http://www.yenka.com/de/Home/> : Das Programm kann kostenlos daheim genutzt werden (Mac oder PC). Eine Klassenraumlizenz „Yenka Physik mit Elektronik“ kostet 310 € (für 16 Benutzer) und ist absolut empfehlenswert.

Crocodile Physics (Yenka) simulieren, experimentell überprüfen, protokollieren)

Messung von Potenzialen und Spannungen bei Reihen- und Parallelschaltung von Lämpchen, Formulierung der Ergebnisse, Zeichnen von Potenzialgebirgen. (Versuch planen, Schaltplan zeichnen, Hypothesen aufstellen, mit Crocodile Physics (Yenka) simulieren, experimentell überprüfen, protokollieren)

Viele Übungen: Potenziale und Potentialdifferenzen bestimmen, in Schaltungen Potenziale farblich kennzeichnen (vgl. [DB1, S. 201 und S. 219])

## Die Nennspannung (W)

**SV: Vergleich verschiedener elektrischer Alltagsgeräte: Lampen, Haushaltsgeräte.**

Ergebnis: Neben der Leistungsangabe tragen sie ebenfalls eine Voltzahl.

Frage: Was haben diese Voltzahlen zu bedeuten?

S-Vermutungen: Die Voltzahlen von Quelle und Gerät müssen zusammenpassen.

**V: 230 V - Lampe an 4,5 V - Batterie anschließen. 4V - Lämpchen an 24 V anschließen.**

Ergebnis: Die *Nennspannung* auf elektrischen Geräten (Verbrauchern) gibt die Spannung der Quelle an, an die das Gerät bei normalem Betrieb angeschlossen werden muss. Es fließt in diesem Fall der häufig auf Lämpchen aufgedruckte *Nennstrom*. Ist die Spannung der Quelle geringer als die Nennspannung des Geräts, so fließt ein zu geringer Strom. Das Gerät funktioniert dann nicht richtig. Ist die Spannung der Quelle größer als die Nennspannung des Geräts, so fließt ein zu großer Strom. Das Gerät kann zerstört werden.

## Analogien

	Strömendes Wasser	Strömende Elektrizität
<b>Strömendes Mittel</b>	Wasser	Elektrische Ladung bzw. Elektrizität
<b>Maß für den Antrieb</b>	Druckdifferenz $\Delta p = 0 \Rightarrow I = 0$ $\Delta p > 0 \Rightarrow I > 0$ Je größer $\Delta p$ , desto größer $I$	Potentialdifferenz bzw. Spannung $\Delta \phi = 0$ bzw. $U = 0 \Rightarrow I = 0$ $\Delta \phi > 0$ bzw. $U > 0 \Rightarrow I > 0$ Je größer $\Delta \phi$ , desto größer $I$
<b>Widerstand</b>	Wasserleitung Je länger, desto größerer Widerstand, desto kleiner $I$ Je kleiner die Querschnittsflächen, desto ...	Leiter Je länger, desto größerer Widerstand, desto kleiner $I$ Je kleiner die Querschnittsflächen, desto ... Hängt vom Material ab

## Reihen- und Parallelschaltung elektrischer Quellen (W)

**V: Geöffnete 4,5 V-Flachbatterie zeigen, Potentialdifferenz einer einzelnen Monozelle messen**

Beobachtung: Drei einzelne Monozellen zu je 1,5 V sind so geschaltet, dass der Pluspol der einen Monozelle mit dem Minuspol der anderen Monozelle verbunden ist. Dabei addieren sich die Spannungen.

Erörterung: Analogiebetrachtung zum Wassermodell: Eine Pumpe kann Wasser eine bestimmte Höhe  $h$  hoch pumpen, zwei Pumpen übereinander pumpen Wasser doppelt so hoch. Vgl. [DB1, S. 204]<sup>21</sup> Die Druckdifferenz verdoppelt sich. Analog dazu die Potentialdifferenz an den Anschlüssen der Batterie.

Ergebnis: Um die Spannung elektrischer Quellen zu erhöhen, muss man den Pluspol der einen Quelle mit dem Minuspol der anderen Quelle verbinden. Man sagt, die Quellen sind in Reihe geschaltet. Dabei addieren sich die Einzelspannungen.

Schaltplan der Reihenschaltung von Batterien: vgl. [U1, S. 282]

Frage: Welche andere Möglichkeit der Schaltung von Batterien kann man sich vorstellen?

**V: Glühlämpchen wird zunächst an eine Batterie, dann an zwei parallel geschaltete Batterien angeschlossen**

Beobachtung: Das Lämpchen leuchtet in beiden Fällen gleich hell.

Erörterung: Analogiebetrachtung zum Wassermodell: Schaltet man zwei Pumpen parallel, so befördern beide das Wasser in dieselbe Höhe wie eine Pumpe allein. Vgl. [DB1, S. 204]. Damit ändert sich beim Parallelschalten von

<sup>21</sup> Eine Betrachtung des energetischen Aspekts kann in Klasse 9 erfolgen, wenn der Spannungsbegriff dementsprechend erweitert wurde.



Pumpen die Druckdifferenz nicht. Analog dazu ändert sich die Potenzialdifferenz an den Anschlüssen der Batterie nicht.

Ergebnis: Beim Parallelschalten elektrischer Quellen bleibt die Spannung gleich.

Schaltplan der Parallelschaltung von Batterien: vgl. [U1, S. 282]

Frage: Worin besteht dann der Nutzen einer Parallelschaltung elektrischer Quellen?

Erörterung: Analogiebetrachtung zum Wassermodell: vgl. [DB1, S. 204, B2]: Zwei Pumpen können die doppelte Menge an Wasser während der gleichen Zeit in die Höhe  $h$  befördern, dass dann zur Antrieb der Turbine zur Verfügung steht. Zwei parallel geschaltete Batterien können pro Sekunde mehr Ladungen vom niedrigen zum hohen Potenzial pumpen als eine Batterie. Das ist wichtig, wenn das angeschlossene Gerät eine große Stromstärke benötigt.

**Übungsaufgaben:** [U1, S. 283]

# Das Ohm'sche Gesetz, der elektrische Widerstand

## Fachwissenschaftliche Bemerkungen

### Das Ohm'sche Gesetz

Georg Simon Ohm fand bei der von ihm untersuchten Anordnung<sup>22</sup>  $I \sim U$ . Er untersuchte für seine Erstveröffentlichung 1826 Leiterstücke aus "plattiertem Kupferdraht" und fand, was er eigentlich nicht hätte finden dürfen, da  $R$  bei Kupfer temperaturabhängig ist. Grund: Der von ihm verwendete Thermoelement - Generator lieferte nur einige mV, der Leistungsumsatz betrug einige mW und erwärmte die Leiter nicht merklich. Sein Ergebnis lautete:  $X = a / (b + x)$  mit  $X = I$ ,  $a = U$ ,  $b =$  Widerstand von Quelle und Leitungen,  $x =$  Widerstand der variierten Leiterstücke. In späteren Veröffentlichungen untersuchte er aber auch die Temperaturabhängigkeit des Widerstands.

Korrekt lautet das **Ohmsche Gesetz** also: Es ist  $I \sim U$  für metallische Leiter bei konstanter Temperatur.

Übliche Ausdrucksweise: **Gilt für einen Stromkreis  $I \sim U$ , so sagt man, für ihn gelte das Ohmsche Gesetz.** Davon zu unterscheiden ist die Definition des Widerstandsbegriffs  $R = U/I$ .

Das Wort Widerstand wird in der physikalischen Fachsprache mehrdeutig verwendet: Zum einen für ein Gerät: Schichtwiderstand, Schiebewiderstand, zum anderen für den Quotienten  $U/I$ . Man sagt also: "*Dieser Widerstand hat den Widerstand(swert) 100  $\Omega$ .*" Schüler müssen darauf hingewiesen werden.

Das Wort "Verbraucher" für das elektrische Gerät ist zwar üblich, aber ungeeignet. Der Begriff *elektrisches Gerät* ist da besser.

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Vorgehen

$I \sim U$ , d.h.  $U/I =$  konstant, gilt nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen und in der Praxis nie exakt, aber meistens in ausreichender Näherung. Es ist sehr ratsam, zunächst künstliche Versuchsbedingungen zu schaffen, bei denen im Rahmen der Messgenauigkeit  $I \sim U$  ist und dabei  $R$  einzuführen. Anschließend können dann Fälle diskutiert werden, bei denen  $R = U/I$  nicht konstant ist. Gründe für dieses Vorgehen:

Das Einfache und Wichtige zuerst.

Steht die nichtlineare Kennlinie am Anfang, so sind die Schüler geneigt, für Geräte mit solchen Kennlinien den Begriff Widerstand abzulehnen. In solchen Fällen wird ja häufig auch der differentielle Widerstand  $\Delta U/\Delta I$  betrachtet. Kennlinien von Glühlampen legen den Schluss nahe, dass für reine Metalle das Ohm'sche Gesetz überhaupt nicht gilt.  $R$  ist eine abgeleitete physikalische Größe und wird nach der **Invariantenmethode** eingeführt. Für das Vorgehen stehen bekanntlich zwei Varianten zur Auswahl:

Es wird vermutet und experimentell bestätigt, dass die Stromstärke  $I$  nur von der bereits definierten physikalischen Größe  $U$  und von einem noch nicht quantitativ erfassten Einfluss des elektrischen Geräts abhängt. Es muss nun eine physikalische Größe eingeführt werden, die den Einfluss des elektrischen Geräts quantitativ erfasst. Dazu wird zunächst bei einem bestimmten Gerät untersucht, wie  $I$  von  $U$  abhängt. Ergebnis:  $I \sim U$ ,  $U/I =$  konstant und unabhängig von  $U$  und  $I$ . Bei einem zweiten elektrischen Gerät stellt man fest, dass auch hier  $U/I$  konstant ist, aber einen anderen Wert als beim ersten Gerät hat. Somit ist  $U/I$  ein geeignetes Maß für den Einfluss des elektrischen Geräts und wird sein elektrischer Widerstand  $R$  genannt.

Zunächst steht nur die Abhängigkeit der Stromstärke  $I$  von  $U$  im Vordergrund. Man stellt fest:  $I \sim U$ ,  $U/I =$  konstant. Die Frage, ob bei einem anderen elektrischen Gerät ebenfalls  $I \sim U$  ist, macht den Einfluss des elektrischen Geräts auf  $I$  klar. Auch beim zweiten Gerät ist  $U/I$  konstant. Es wird deutlich, dass  $U/I$  den Einfluss des elektrischen Geräts auf  $I$  beschreibt. Die Gerätekonstante  $U/I = R$  wird als abgeleitete Größe in das physikalische Begriffssystem aufgenommen.

Man untersucht die Abhängigkeit der Stromstärke von der Spannung. In der Messwertetabelle und auch bei der  $U - I$ -Kennlinie ist man hinsichtlich dieser Fragestellung konsequent. Nur bei der Quotientenbildung betrachtet man  $U/I$  statt  $I/U$ . Darauf sollte man hinweisen und darauf, dass der Quotient  $I/U$  häufig auch gebildet wird, dass er allerdings eine andere Bedeutung hat und deshalb auch den Namen *Leitfähigkeit* bekommt.

Neben  $R = U/I$  sollten unbedingt auch die Abhängigkeiten  $R \sim l$  und  $R \sim 1/A$  gefunden werden. Ohne sie ist das

<sup>22</sup> Siehe Festschrift des Deutschen Museums, München 1976



grundlegende Verständnis technischer Anwendungen (Potentiometer, Einfluss langer Leitungen, Fernleitungen, verschiedene Querschnitte bei elektrischen Kabeln,...) nicht möglich.

## Gefährliche Stromstärken und Spannungen

Die Hinweise in den einzelnen Schulbüchern sind recht widersprüchlich. Grobe Abschätzung: Körperwiderstand in ungünstigsten Fällen etwa  $1\text{ k}\Omega$ ,  $I = 25\text{ mA}$  kann lebensgefährlich sein, also keine Spannungen über  $25\text{ V}$  verwenden (Niederspannungsbereich). Gute und ausführliche Darstellung in **C2** S. 67. In der Mittelstufe bis einschließlich Klasse 10 dürfen Schülerinnen und Schüler mit Wechselspannung bis  $25\text{ V}$  und Gleichspannungen bis  $60\text{ V}$  experimentieren.

## Experimentelle Hinweise

Beim zentralen Versuch zum Ohm'schen Gesetz sollte zur Variation der Spannung kein Netzgerät verwendet werden, da den Schülern nicht klar gemacht werden kann, wieso sich durch Drehen an dem Stellknopf die Spannung zwischen den Anschlüssen ändert. Besser ist eine Reihenschaltung von Batterien (bzw. 2V-Akkus).

Zur Entdeckung des Ohm'schen Gesetzes sollte auch kein Voltmeter verwendet werden, da für die Spannungsmessung die zu untersuchende Abhängigkeit im Messgerät ausgenutzt wird. Auf diese Weise ließe sich jede Gesetzmäßigkeit experimentell „finden“.

Als elektrische Geräte sollten keine Konstantdrähte verwendet werden. Es fällt den Schülern schwer, einen Draht als typisches elektrisches Gerät anzusehen und die Abgrenzung gegen die Zuleitungen, die ja auch Drähte sind, ist hier schwierig. Man verwende als elektrische Geräte lieber 230 V Tauchsieder. Bei ihnen ist bis ca.  $12\text{ V } I \sim U$  und man hat mehrere Geräte gleicher Art zur Verfügung.

## Lehrgangsskizze

### Das Ohm'sche Gesetz (W) - Der elektrische Widerstand (P)

Eigenständige Erarbeitung mit selbstständiger Planung eines Experiments: [☛ Ohm'sches Gesetz \(Experimente planen Beispiele.doc\)](#)

Sonst:

Frage: Wovon hängt die Größe des elektrischen Stromes in einem Stromkreis ab und wie hängt sie davon ab?

**PA:** Plane einen Versuch zur Untersuchung der Fragestellung!

Variante 1:

**SV:** Verschiedene Schülerteams untersuchen, wie  $I$  von  $U$  (Spannung durch Reihenschaltung von Batterien variieren) bei Tauchsieder, Glühlämpchen, Eisendraht, Konstantandraht, Graphitstab abhängt, stellen ihre Ergebnisse in Tabellen und Schaubildern dar und tragen sie vor.

Zusammenfassung und Heftaufschrieb im Plenum

Variante 2:

**V: Zentraler Versuch:  $I$  in Abhängigkeit von  $U$**

5 - 6 Dryfit - Bleiakku, 2V (frisch geladen, über Nacht parallel geschaltet),

$I$  - Messgerät mit möglichst niedrigem Innenwiderstand, den Messbereich nicht wechseln.

Elektrisches Gerät: Tauchsieder mit großer Leistung  $P = 1000\text{ W}$ .

**M:** Schüler-Arbeitsblatt [☛ Ohmsches\\_Gesetz.doc](#)

Ergebnis:  $I \sim U$ ,  $U/I = \text{Konstante}$ .

Frage: Was ist zu erwarten, wenn wir die Versuchsreihe mit einem anderen elektrischen Gerät wiederholen?

**V:** Nun mit Tauchsieder kleiner Leistung  $P = 300\text{ W}$ .

Ergebnis: Wieder  $I \sim U$ ,  $U/I$  hat jedoch einen anderen Wert.

Klärung der Bedeutung von  $U/I$ .

Merksatz: Gilt für ein elektrisches Gerät  $I \sim U$ , ist also die Stärke des durch das Gerät fließenden elektrischen Stromes  $I$  proportional zur angelegten Spannung  $U$ , so sagen wir, für das Gerät gelte das **Ohm'sche Gesetz**.

Bei einem solchen elektrischen Gerät ist der Quotient  $U/I$  eine für dieses Gerät charakteristische Konstante. Wir nennen ihn den **elektrischen Widerstand  $R$**  des Geräts.  $R = U/I$ .

Einheit, Beispiele: Widerstände der Tauchsieder; Einübung der Proportionalität, U - I - Kennlinien.

## Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands (W)

Frage: Gilt  $I \sim U$  nur für Tauchsieder, oder auch für andere Geräte, z. B. für Glühlampen?

**V:** Mit Glühlampe (z.B. 12V/30W) statt Tauchsieder.

Als Hausaufgabe:  $I(U)$ ,  $R(U)$  und  $R(I)$  zeichnen lassen!

Ergebnis:  $I$  ist nicht proportional zu  $U$ .  $R$  nimmt mit  $U$  und  $I$  zu.

Frage: Weshalb?

S-Vermutungen:

1. Im Tauchsieder befindet sich ein Spezialdraht
2. Große Temperaturzunahme des Wolframfadens.

Zur Überprüfung von 2 einen Versuch von den Schülern vorschlagen lassen:

**V:** Erwärmen von Eisendraht **D7/8 S. 208 V3**

**V:** Zentraler Versuch mit Eisendraht

Ergebnis:  $I$  nicht proportional zu  $U$

**V:** Zentraler Versuch mit Eisendraht in Wasser gekühlt. Vollständig eintauchen, falls Probleme, Magnetrührgerät verwenden

Ergebnis:  $I \sim U$

**V:** Erwärmen von Konstantandraht (60 % Ni und 40 % Cu). Evtl. auch mit Bleistiftmine.

Merksatz: Versuche zeigen:  $I \sim U$  gilt für alle metallischen Leiter bei konstanter Temperatur. Bei reinen Metallen steigt der Widerstand (bei Kohle sinkt er) mit zunehmender Temperatur. Bei Konstantan ist  $R$  über einen weiten Temperaturbereich konstant.

Anwendungen: Anhand ansprechender Beispiele werden die Gleichungen  $U = R \cdot I$ ,  $I = U/R$  eingeübt.

**Mensch: Sicherheitsaspekte:** Aufgaben zu Gefahren des elektrischen Stromes (**C2 S. 67**)

## Widerstand von Drähten, Anwendungen (W)

**V:** Dryfit - Akku, Drehspulinstrument mit möglichst geringem Innenwiderstand, Konstantandraht  $\varnothing = 1 \text{ mm}$ .

Ergebnis:  $R \sim l$ . Analogie zum Wasserstrom zeigen

**V:** Durchmesser verdoppeln,  $I$  wird viermal so groß.

Ergebnis:  $R \sim 1/A$ . Analogie zum Wasserstrom zeigen

Zu Gleichung  $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$  Man kann sie weglassen, mitteilen oder herleiten. Falls sie behandelt wird, muss sie aber auch eingeübt werden. Das bedeutet eine weitere U - Stunde.

Zu besprechen ist unbedingt:

- a) Was passiert beim "Kurzschluss"?
- b) Drehspulinstrument als Spannungsmesser.
- c) Schiebe - und Drehwiderstand.
- d) Bauformen und evtl. Farbcode technischer Widerstände.

Alternativ: Gruppenpuzzle zum Widerstand von Drähten

**[DB1, 2012, S. 229]**

## Kennlinien von elektrischen Geräten bzw. Bauteilen (P)

Die Schülerinnen und Schüler haben nun genügend Grundkenntnisse, um erste U-I-Kennlinien von Geräten in einem Praktikum selbstständig aufzunehmen. Es bieten sich folgende Geräte bzw. Bauteile an:

- a) Ohm'scher Widerstand,
- b) Glühlampe,
- c) Halogenlampe,
- d) Bleistiftmine,
- e) ...

Bestimmen von U-I-Kennlinien als Methode in den Methodenordner

☛ [Methode\\_U\\_I\\_Kennlinie.doc](#)

### Mit Strom- und Spannungsmessgeräten (analog und/oder digital)

Im Sinne der Einübung des [Umgangs mit Strom- und Spannungsmessgeräten](#) (Vielfachmessgeräten) bietet sich eine manuelle Aufnahme der U-I-Kennlinien mit derartigen Messgeräten an. Der Umgang mit Strom- und Spannungsmessgeräten und die Vorgehensweise bei der Aufnahme von U-I-Kennlinien kann im [Methodenordner](#) festgehalten werden. ☛ [Methodenordner: Messen\\_von\\_Stromstaerke\\_und\\_Spannung.doc](#)

Folgende methodischen Varianten bieten sich u.a. an:

- 1) Praktikum in Teamarbeit: Jedes Team ermittelt die Kennlinie eines Ohm'schen Gerätes und im Vergleich dazu eines weiteren Gerätes. Anschließend Vergleich und Begründung des Verlaufs der Kennlinien. Anschließend Vorstellung der Ergebnisse im Vortrag oder als Plakat
- 2) Lernzirkel: Expertengruppen für U-I-Kennlinien eines speziellen Gerätes, Vorstellung der Ergebnisse in den Basisgruppen
- 3) Praktikum in Teamarbeit: Jedes Team misst die Kennlinien aller vorgegebenen Geräte, Erstellung eines Versuchsprotokolls mit Auswertung

### Mit computerunterstützter Messwerterfassung und -auswertung

Die Aufnahme von U-I-Kennlinien eignet sich besonders für den [Einsatz eines computerunterstützten Messwerterfassungs- und -auswertesystems](#). Die Schülerinnen und Schüler können sich daheim in den Umgang mit der Software einarbeiten, gemeinsam mit dem Lehrer kann die U-I-Kennlinie eines elektrischen Gerätes (z.B. eines Ohm'schen Widerstandes) aufgenommen werden. Anschließend nehmen die Schülerinnen und Schüler in Teamarbeit die Kennlinien weiterer Geräte selbstständig auf und werten die Ergebnisse im Unterricht, im Computerraum der Schule oder daheim aus.

Beispiele dazu (speziell für Pocket-CASSY) siehe unter: M. Renner: ZPG II Physik (Kurstufe), Fachmethoden, Spezifisches Methodenrepertoire der Physik, Computerunterstützte Messwerterfassung im Schülerpraktikum:

<http://lehrerfortbildung-bw.de/faecher/physik/gym/fb2/modul2/work3/>

Alternativ dazu kann die Aufnahme von U-I-Kennlinien elektrischer Geräte und Bauteile jedoch auch im Sinne nachhaltigen Lernens nach der Behandlung der Diode in Klasse 9/10 erfolgen, so dass auch die Diode als elektronisches Bauteil einbezogen werden kann.

Weitere Praktika:

☛ [Praktikum U-I-Kennlinien 1: Praktikum\\_U-I-Kennlinien.docx](#)

☛ [Praktikum U-I-Kennlinien 2: Praktikum\\_U\\_I\\_Kennlinien\\_2.doc](#)

## Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen (P)

Falls Zeit, bietet sich hier nun die Behandlung der Gesetze an. (Lehrgang dazu siehe Manuskript zu Klasse 9/10 – dieser muss u.U. für die Klassenstufe angepasst werden – weitere Möglichkeiten sind in jedem Schulbuch zu finden.)

# Elektrostatik

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Bildungsplan 2004

Im Bildungsplan findet man keinen Hinweis auf die Elektrostatik. Weder das Vorzeichen der Ladung, noch die Begriffe Neutralisation und Influenz werden genannt. Auch das Elektron wird nicht erwähnt.

Lediglich in den KMK-Standards wird unter dem verpflichtenden Basiskonzept „Wechselwirkung“ und dem präzisierenden Aspekt „Körper können durch Kräfte aufeinander einwirken.“ als Beispiel für mögliche Konkretisierungen genannt: „Kräfte zwischen Ladungen“.

### Stoffauswahl und Gewichtung

Im Hinblick auf die Behandlung des elektrischen Feldes bereits in der Mittelstufe wird man nicht umhin kommen, zumindest folgende Themen zu behandeln:

- Zwei Arten der elektrischen Ladung
- Wechselwirkungskräfte zwischen zwei Ladungen gleichen und unterschiedlichen Vorzeichens
- Ladung eines Körpers als Überschussladung (Neutralisation)

Den Schülerinnen und Schülern ist der Begriff des Elektrons aus dem Alltag und aus dem Chemieunterricht bekannt. Es wäre sinnvoll, ihn auch aus physikalischer Sicht zu beleuchten.

Es besteht die Möglichkeit, dieses Themengebiet komplett in die Behandlung des elektrischen Feldes in Analogie zum magnetischen Feld zu integrieren.

### Faraday-Käfig

Die Erklärung des Faraday-Käfig-Effekts ist in SI nicht möglich. Er wird durch die Abstoßung gleichnamiger Ladungen nicht voll erklärt. Die Schüler argumentieren, dass die Ladungen nicht dann am weitesten entfernt sind, wenn sie an der Oberfläche des Leiters sitzen, sondern dann, wenn sie gleichmäßig über das Volumen verteilt sind.

### Der glühelektrische Effekt

#### Gedankengang

Ein Vorversuch zeigt, dass Ladung in Metallen nicht von Metallteilchen transportiert wird.

Demonstration des glühelektrischen Effekts (Edison-Effekts) mit einer Glühkathoden-Diode. Das Versuchsergebnis gibt Hinweise darauf, welche Ladungsart sich beim Stromfluss in Metallen bewegt.

Die Versuche führen zur Hypothese, dass die positive Ladung in Metallen an chemisch nachweisbare Materie gebunden ist und nicht zum Stromfluss beiträgt. Die Träger negativer Ladung bestehen dagegen aus keinem chemisch nachweisbaren Stoff. Sie sind für den Stromfluss verantwortlich und heißen Elektronen. Man schließt also von der leichten "Abdampfbarkeit" der Elektronen auf ihre leichte Beweglichkeit in Metallen.

#### Edison - Effekt

(Thomas Alva EDISON, 1847 - 1931)

Der Versuch mit der Glühkathoden-Diode nach Edison gibt Hinweise zur Beantwortung der Leitfrage, mehr aber nicht. Er wurde nicht zur Klärung dieser Frage oder zur Entdeckung des Elektrons durchgeführt.

Der Versuch wurde zum ersten Mal 1883 von Edison durchgeführt. Er hat 1879 die elektrische Glühlampe zur Serienreife entwickelt. (Siehe [C1](#) S. 120) Die von Edison konstruierte Kohlefadenlampe ging 1879 in die industrielle Fertigung. (Erfunden wurde die Glühlampe 1845 von Heinrich Goebel. Als Glühfaden verwendete er verkohlte Bambusfäden) Edison hatte große Probleme mit dem Glühfaden. Dieser wurde immer dünner und brannte durch, der Glaskolben wurde schwarz. Als Abhilfe hat er versucht, eine Metallplatte in die Lampe einzubauen und diese

elektrisch zu laden.<sup>23</sup>

## Elektron

Der Name "Elektron" wurde von George Johnstone Stoney gemeinsam mit Helmholtz bereits 1874 für das "Atom" der Elektrizität geprägt. Sie wiesen darauf hin, dass unter der Voraussetzung einer atomaren Struktur der Materie aus den Gesetzen der Elektrolyse mit großer Wahrscheinlichkeit auch auf eine atomare Struktur der Elektrizität geschlossen werden kann. Sie schätzten  $e$  durch  $e = (F)/(L)$  (Faraday-Konstante  $F$ )/(Loschmidtzahl  $L$ ) ab.

"Entdeckt" wurde das Elektron durch Klärung der Natur der Kathodenstrahlen bei der Gasentladung durch Thomson 1897. Unter der Annahme eines Teilchenstromes mit  $e$  und  $m$  konnte er durch Ablenkung im Magnetfeld  $e/m = v/(Br)$  bestimmen. Dabei hat Thomson  $v$  zunächst aus der durch die Elektronen auf eine Elektrode übertragene Wärmemenge und Ladung bestimmt. Später wurde  $v$  mittels gekreuzter  $E$ - und  $B$ -Felder ermittelt.<sup>24</sup>

## Methodische Tipps

Die Schüler den Versuch nicht entdecken lassen. Besser: „Folgender Versuch gibt Hinweise auf die Beantwortung unserer Frage ...“ oder Beschreibung, weshalb Edison den Versuch gemacht hat und mit der Bemerkung "wir wollen sehen, was er erlebte" den Versuch vorführen. Ergebnisse eindeutig formulieren, entweder als eine mögliche Erklärung der Versuchsanordnung oder als Lehrermittteilung.

## Die Braun'sche Röhre

### Gedankengang

Konkretisierung der Elektronenvorstellung durch Sichtbarmachen ihrer Flugbahn in einer evakuierten Röhre. Kennenlernen der Funktionsweise der Braun'schen Röhre, dabei Vertiefung: 1. Kräfte zwischen Ladungen, 2.

Zusammenschaltung von Anoden- und Heizstromkreis. Große technische Bedeutung der Braun'schen Röhre (Oszilloskop, ältere Fernseh- oder Computerbildschirme).

Falls Zeit: Demonstration der parabelförmigen Flugbahn.

### Karl Ferdinand Braun (1850 - 1918)

Professor in Karlsruhe und Tübingen; erhielt gemeinsam mit Marconi 1909 für einen drahtlosen Sender den Nobelpreis; weitere Entdeckungen: Gleichrichtereffekt bei Halbleitern, der erste Radioempfänger, Braun'sches Elektrometer; Mitbegründer der Fa. Telefunken.

## Elektronenleitung in Metallen

Leitproblem ist immer noch: Was geschieht in metallischen Leitern, wenn dort elektrischer Strom fließt? Der glühelektrische Effekt gab erste Hinweise auf die Ladungsträger. In der Braun'schen Röhre konnte diese Vorstellung gefestigt werden. Hier geht es nun darum, eine abschließende Antwort auf dieses Leitproblem zu geben.

Dazu ist eine Erweiterung des Teilchenmodells nötig. Die Schüler wissen, dass man sich einen Festkörper aus dicht gepackten kleinsten Teilchen, den Atomen vorstellen kann. Hier muss man nun erklären, wie man sich die Elektrizitätsleitung in einem solchen Festkörper vorstellen kann und wie es zur Wärmewirkung des elektr. Stromes kommt. Auch die Frage, wieso der Leiter überhaupt zusammenhält, stellt sich an dieser Stelle.

Man wird sich auf einen Leiter, vielleicht nur auf einen bestimmten z.B. Kupfer, beschränken. Üblich ist hier die Behandlung des Kern - Hülle - Modells unter dem Aspekt der Elektrizitätsleitung in Metallen. Die Betrachtung des Kerns geschieht dann in der Kernphysik. Eine Absprache mit dem Chemielehrer ist unerlässlich.

Die Erweiterung des Teilchenmodells kann durch Lehrer - Mitteilung oder durch selbstständiges Erarbeiten geschehen.

Die Elektronenhülle sollte nicht zu konkret, etwa als Planetenmodell, beschrieben werden. Es ist nicht nötig und erschwert nur den Zugang zur Orbital - Vorstellung.

## Schülerversuche zur Elektrostatik

Die Fa. Mekruphy bietet eine Schülerversuchskasten „Elektrik 2“ zum Thema „Ladungen und Felder, elektromagnetische Induktion“ an. Dieser Experimentierkasten enthält u.a. eine Elektroskop, Woll- und Seidentuch, PVC-Stäbe, Acrylglasstab sowie Glimmlampe mit Sockel für Elektrostatikversuche. Damit können einige der in der

<sup>23</sup> Begleitmaterial zur Valvo - Diaserie: "Die Hochvakuumdiode".

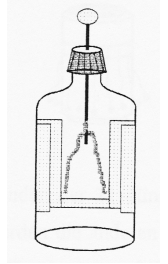
<sup>24</sup> Simonyi, S. 379

Lehrgangsskizze genannten Versuche auch von den Schülerinnen und Schülern selbstständig durchgeführt werden. Die Experimente gelingen auch bei hoher Luftfeuchtigkeit.

Die Fa. Phywe bietet einen Experimentierkasten „TESS-Elektrostatik EST“ mit 16 möglichen Experimenten zur Elektrostatik an.

Die Fa. Leybold bietet einen Experimentierkasten „Elektrostatik“ mit 28 möglichen Experimenten zur Elektrostatik an.

Einfache Elektroskope können auch von den Schülerinnen und Schülern selbst angefertigt werden. (Beispiel siehe nebenstehende Abbildung und 2. Staatsexamensarbeit Michael Renner: „Experimente mit Blechdosen und Kunststoffflaschen“, Bibliothek Seminar Tübingen) ([Bauanleitung Elektroskop: Elektroskop.jpeg](#))



## Lehrgangsskizze

### Zwei Arten elektrischer Ladung – Kräfte zwischen Ladungen (P)

**Problemstellung:** Was geschieht in metallischen Leitern, wenn dort elektrischer Strom fließt? Die in einem Leiterkreis strömende Elektrizität soll nun genauer untersucht werden.

**Erörterung:** Man sieht, hört, riecht nichts „Strömendes“. Beim Wasserstromkreis kann man die Wasserleitungen aufsägen und nachsehen, ob etwas heraus kommt. Aus einem aufgetrennten Stromkreis kann aber nichts herauslaufen, da die Luft ein Isolator ist. Man bräuchte einen "Eimer" für die elektrische Substanz.

**V: D7/8 S. 178, V1 mit Hochspannungsgleichrichter HGL, Glimmlampen und Konduktorkugel. Konduktor zunächst vom Minusanschluss zum Plusanschluss führen**

**Beobachtung:** Bei der Berührung der mit dem Minusanschluss verbundenen Glimmlampe leuchtet die Glimmlampe kurz auf. Beim anschließenden Berühren der anderen Glimmlampe leuchtet diese und eine dritte im Stromkreis kurz auf. Bei dem gleichen Versuch mit einer kleineren Kugel leuchten die Glimmlampen weniger hell auf.

**Der Versuch lässt sich folgendermaßen deuten:** Bei der Berührung der Metallkugel mit dem Minusanschluss der Quelle fließt elektrische Ladung auf die Kugel über. Man sagt: Die Kugel wird *elektrisch geladen*. Transportiert man die elektrische Ladung auf der Kugel zum Plusanschluss, so wird die Ladung abgegeben und fließt durch die Quelle wieder zum Minusanschluss. Eine größere Kugel transportiert dabei mehr Ladung, als eine kleinere.

**Evtl. V: Verbinden der beiden Glimmlampen mit einem Leiter (feuchtes Holzstäbchen).** Die Glimmlampen leuchten ständig.

**V: Im Einstiegsversuch nun Konduktorkugel vom Plusanschluss zum Minusanschluss führen.**

**Erklärung?**

Die elektrische Ladung soll nun genauer untersucht werden.

**Festlegung:** Wir unterscheiden zwei verschiedene Arten elektrischer Ladung:

Die Ladung vom Plus-Anschluss der Quelle nennen wir positive Ladung. Die Ladung vom Minus-Anschluss der Quelle nennen wir negative Ladung [E1](#)

**V: Versuche zum Mengencharakter der Ladung.** Geladenen Konduktor herumtragen, über geerdete Glimmlampe entladen, Konduktor mit neutralem Konduktor berühren, über Glimmlampe entladen, unterschiedliche Konduktoren laden und über Glimmlampe entladen.

**V: Evtl.: Nachweis, dass es sich auf dem Konduktor um ruhende elektrische Ladung handelt.**

Anschlüsse der UR 110 mit einem nicht isolierten Kabel (30 cm reichen) verbinden. Die Anordnung isoliert halten und laden. Die Glimmlampe leuchtet nicht. Nachweis der Ladung der Anordnung mit einer anderen Glimmlampe.

**Beachte:** Die leitende Kugel trägt ruhende elektrische Ladung. Mit dem elektrischen Strom bezeichnen wir fließende elektrische Ladung.

**Frage:** Wirken zwischen verschieden geladenen Körpern Kräfte, ähnlich wie bei den Polen eines Magneten?

**V: Demonstration der Wechselwirkungskräfte zwischen 2 gleichen geladenen Kügelchen**

LEU-Kügelchen an der Influenzmaschine<sup>25</sup> geladen.

<sup>25</sup> Erklärung der Influenzmaschine, z.B. in Bergmann-Schäfer



**Ergebnis:** Gleichnamig geladene Körper stoßen einander ab, ungleichnamig geladene ziehen sich an. Je kleiner der Abstand, desto größer die elektrischen Kräfte.

### V: Demonstration und Erklärung des Elektroskops

Erörterung und Demonstration, dass bei der Berührung des Elektroskops mit der geladenen Konduktorkugel nur ein Teil der Ladung auf das Messwerk übergeht.

### V: Demonstration der Wirkungsweise des Faraday – Bechers

M: Hinweis auf Blitzschutz, Hochspannungsversuch im Deutschen Museum<sup>26</sup>

## Neutralisation und Influenz (W)

### Alternativ: Planarbeit zu Influenz und elektrostatischer Aufladung

[DB1, 2012, S.209]

**Frage:** Was geschieht, wenn man zwei ungleichnamig geladene Konduktorkugeln zusammenbringt? (Erinnerung an den Magnetismus)

**V: Zwei gleich große Konduktorkugeln an 6 kV laden.** Am Elektroskop durch gleich großen Zeigerausschlag gleiche Ladungsmenge nachweisen. Geladene Kugeln an eine Glimmlampe heran schieben. Am Elektroskop zeigen, dass sie nun ungeladen erscheinen. (Der Versuch ist heikel!)

**Erg.:** Bringt man zwei gleich große, entgegengesetzte Ladungsmengen zusammen, so verschwindet ihre Wirkung nach außen hin. Dieser Vorgang heißt Neutralisation.

**Frage:** Haben sich die Ladungen vernichtet oder nur in ihrer Wirkung geschwächt? Der Folie - Platten - Versuch spricht eher für das Letztere. Man müsste versuchen, bei einem neutralisierten Leiter die Ladungen, falls noch vorhanden, wieder zu trennen.

**V: Standardversuch zur elektrischen Influenz [D7/8 S. 181, V2]** Positiv geladenen Konduktor K1 nähern: Zeigerausschlag, Konduktor K2 entfernen, Ausschlag bleibt.

**Erklärung:** Negative Ladung ist vom Elektroskop auf K2 geflossen, die fehlt nun unten: Dauerausschlag. Nachweis der Ladung von Elektroskop und K2 mit Glimmlampe  
Ladung von K2 an Elektroskop zurückgeben.

**Ergebnis und Mitteilung:** Alle Körper enthalten von vornherein positiv und negativ geladene Teilchen, sog. Ladungsträger. Sind es gleich viele von beiden Arten, so erscheint der Körper ungeladen. Wir sagen: Der Körper ist elektrisch neutral. Wenn bei einem Körper die negativen Ladungsträger in der Überzahl sind, sagen wir: Der Körper ist negativ geladen. Sind die positiven Ladungsträger in der Überzahl, so ist er positiv geladen. Mit der Ladung eines Körpers meinen wir also lediglich den Überschuss einer der beiden Ladungsträgerarten.

## Der glühelektrische Effekt, Elektronen (W)

**Leitfrage:** Welche Ladungsträger bewirken den elektrischen Stromfluss in metallischen Leitern?

**V: Vorversuch: Kupferstab und Alustab berühren sich. Sie werden von einem Strom durchflossen** (evtl während der ganzen Stunde). Anschließend kein Kupfer am Alustab und umgekehrt.

Vorstellen eines Versuchs, der Hinweise darauf gibt, was sich bei Stromfluss in einem Metallstab bewegt:<sup>27</sup>

**V: Nach Edison**  E2

**V: A und E werden positiv geladen.**

E zeigt Ausschlag. Heizstromkreis (2 V Akku) wird geschlossen: Ausschlag geht zurück.

**Diskussion:** Entweder positive Ladung von A nach K - aber an A wurde nichts getan -, oder negative von K nach A. Mögliche Erklärung: Der Glühfaden sendet negative Ladungen aus. Sie werden zur positiven Anode gezogen und neutralisieren sie.

<sup>26</sup> Das Märchen vom Faraday'schen Käfig, MNU 48/3 (1995), S. 187-188

<sup>27</sup> Die Rückleitung vom Elektroskopgehäuse zur Kathode in **DMr** S. 204, V1 ist nicht unbedingt erforderlich. Das Gehäuse des Elektroskops muss hinreichend geerdet sein. Meist ist das bereits durch das Aufstellen auf dem Experimentiertisch gegeben. Dann kann man die Leitung weglassen. Vgl. **GBM** 134.1 und 134.2

Geeignete Dioden für die Versuche: Leybold-Teltron 555 07 ( Bild G-B 134.2 ), groß aber sehr teuer. Gut und billig: LEU 910 oder PHYWE 06700.00. Der Abbildung im Dorn ähnlich. Mit LEU 910: Zum Heizen: 2V Drifit -Akku; bei 4V: Abdampfen der Wolfram-Atome. Diode stets zugentlastet anschließen!



Frage: Werden auch positive Ladungen von K emittiert?

Der Versuch liefert keine Antwort, da sie abgestoßen würden. Versuch abändern:

**V:** Anode negativ laden.

Diskussion möglicher Erklärungen.

Mitteilung: Die locker sitzenden Träger negativer Ladung in Metallen heißen Elektronen. Sie sind chemisch nicht nachweisbar. Sie haben unabhängig vom Kathodenmaterial dieselben Eigenschaften, sind also untereinander gleich.

**V:** Erhitzen des Glühfadens bis nahe zur Schmelztemperatur ( 4 V-Heizspannung ).

Ausschlag des negativ geladenen Elektroskops verschwindet.

Diode mit metallischem Niederschlag am Glaskolben zeigen.

Ergebnis: Beim Stromfluss in Drähten bewegen sich nur die locker sitzenden, negativen Elektronen. Sie sind also die einzigen Träger der bewegten elektrischen Ladung. Die positive Ladung ist an die Materieteilchen gebunden und ortsfest.

## Elektrostatik im Elektronenbild (W)

**PA:** Wichtige Experimente der Elektrostatik werden nun mit dem Elektronenbild beschrieben: Gleichspannungs: - Anschluss Elektronenüberschuss, + Anschluss, Elektronenmangel. Wechselspannungsquelle: Wechsel von Elektronenüberschuss/mangel. Positiv geladen - Elektronenmangel, negativ geladen - Elektronenüberschuss, Neutralisation, Influenz und statische Aufladung beim „Folie - Schallplatten - Versuch“.

## Braun'sche Röhre (W)

**V:** Demonstration der Braun'schen Röhre mit NEVA 6720 [D7/8 S. 182, B1]

Erklärung der Funktionsweise

Anwendung: Das Oszilloskop

Evtl.

**V:** Demonstration der Parabelbahn mit Leybold Teltron – Röhre [D7/8 S. 183, B2]

## Elektronenleitung in Metallen (W)

Atomarer Aufbau des Kupferdrahts.

Kupferdraht aus Kupferatomen, Kristallgitter (Modell aus der Chemie)

Wärmeschwingung der Atome um ihre Gitterplätze

Kupferatom (wie jedes Atom) Atomkern und Elektronenhülle, Größenordnungen (Hüllenradius ein Millionstel mm, Kernradius 1/100.000 so groß; Vergleich: Kernradius 1 dm - Hüllenradius 10 km oder Kern: Stecknadelkopf - Atomdurchmesser: Höhe des Ulmer Münsters.

Der Kern enthält mehr als 99,5 % der Atommasse.

Hülle des Kupfer - Atoms besitzt 29 Elektronen, der Kern 29 positiv geladene Protonen. Das Atom ist wie alle Atome neutral.

1 bis 3 Elektronen eines jeden Kupferatoms sind nur schwach an das Atom gebunden und können sich aufgrund ihrer Wärmebewegung ziemlich frei zwischen den Atomen bewegen. Übrig bleiben positiv geladene Atomrümpfe (Kern mit 28 bis 26 Elektronen) vgl. [D7/8 S. 186, B2]

Funktion der Stromquelle:

Hält am Minusanschluss einen Elektronenüberschuss, am Plusanschluss einen Elektronenmangel aufrecht.

Die elektrischen Kräfte wirken auf alle elektrisch geladene Teilchen im Leiter.

Elektrischer Strom im Kupferdraht:

Beim Anschluss der Quelle breitet sich das elektrische Feld und damit der Befehl "Elektronen marsch" nahezu mit Lichtgeschwindigkeit im Draht aus. Alle freien Elektronen erfahren daher gleichzeitig eine elektrische Kraft und starten in Richtung Pluspol. Durch Stöße mit den Rumpfatomen werden sie immer wieder abgebremst und durch die elektrischen Kräfte neu beschleunigt. Es entsteht eine Driftbewegung mit einer mittleren Driftgeschwindigkeit; die überraschend gering ist: Etwa 1 mm/sec.

**SV:** Die Schüler ziehen mit Bleistift und Lineal einen Strich mit dieser Geschwindigkeit.

Falls Zeit: Wahlweise einen der beiden Ionenwanderungsversuche**Ionenleitung (W)**

Leitproblem: Was geschieht in Flüssigkeiten, wenn dort elektrischer Strom fließt?

Ionenwanderungsversuche zur Demonstration des elektrischen Stromes in Elektrolyten und zur Veranschaulichung der Leitungsvorgänge in Metallen.

Erläuterung: Man kann zwar nicht in metallische Leiter hineinsehen, dafür aber in leitende Flüssigkeiten. Es gibt stark färbende, Kaliumpermanganatkristalle. In wässriger Lösung verhalten sie sich wie Salzkristalle. Sie werden zu geladenen Molekülen und transportieren dabei in der Lösung genau die gleiche Ladungsportion, wie die Elektronen in Metallen. Ihre Bahn lässt sich auf Löschpapier verfolgen:

Ionenwanderungsversuch 1:V4: Ionenwanderungsversuche mit Hilfe von Fließpapier:

Benötigt werden: Fließpapierstreifen ca. 4 cm x 15 cm (Löschpapier, Filterpapier), Alu-Folie, Glasplatte, Kroko-Klemmen, Uhr, Netzgerät (100V-200V, mind. 10 mA), Videokamera

Anionen:  $\text{KMnO}_4$ -Körner möglichst einheitlicher Größe

Elektrolyt: 0,1 - n  $\text{KNO}_3$  - Lösung (ca. 1g auf 100 ml)

Versuchsprinzip: Das Fließpapier wird mit dem Elektrolyten leitend gemacht. An den beiden Enden werden Alufolie - Streifen mittels je einer Krokodilklemme befestigt und auf die Glasplatte gelegt. Dann werden  $\text{KMnO}_4$  - Körner

daraufgestreut und eine Spannung von ca. 100 V - 200 V für 2 - 4 min angelegt. (Bei 200 V ist v etwa 2 mm/min).<sup>28</sup>

Versuche:

**V: 100 V / 2 min; 100 V / 4 min.**

Beob: Ionenwanderung von - nach +. Ionen starten gleichzeitig, legen in gleichen Zeitabschnitten gleiche Strecken zurück

Folg: Die Ladungsträger bewegen sich mit konstanter Geschwindigkeit.

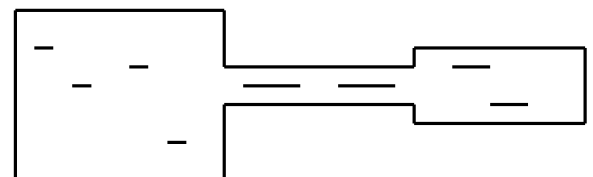
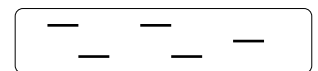
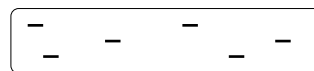
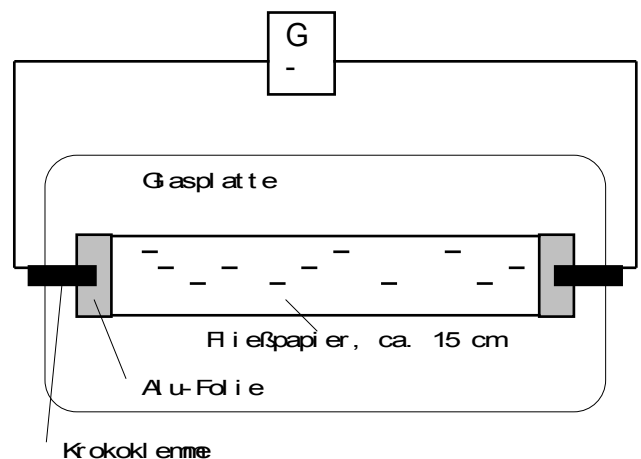
Evtl.:

**V Zu I =  $\Delta Q / \Delta t$ : Fließpapierstreifen unterschiedlicher Breite (2 cm, 1 cm, 3 cm), 100 V/2 min.**

Beob: Je schmaler die Streifen, desto größer die während der Messung zurückgelegten Strecken.

Folg: Damit durch jeden Querschnitt in der gleichen Zeit gleich viel Ladung transportiert werden kann, muss die Geschwindigkeit der Ladungsträger um so größer sein, je kleiner der Leiterquerschnitt ist.

Erg.: Auch hier gilt: Je kleiner die Querschnittsfläche, desto größer die Geschwindigkeit bei gleicher Stromstärke.

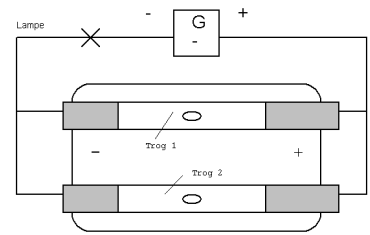


<sup>28</sup> Hinweis zur Reinigung:  $\text{KMnO}_4$  ergibt Braunsteinflecken, die sich folgendermaßen entfernen lassen: Man löst etwas Natriumthiosulfat (Fixiersalz) in Wasser und säuert leicht an, z.B. mit verdünnter Salzsäure. Diese Lösung ist ein gutes Reduktionsmittel und überführt unlösliches Mangandioxid (Braunstein) in wasserlösliche Mangan(II)salze. Die Lösung muss jeweils frisch vorbereitet werden, da sie sich ziemlich schnell zersetzt. Dabei entstehen Schwefel (Trübung der Lösung) und Schwefeldioxid (Gestank). Das Reaktionsgemisch kann durch „Kanalisisieren“ entsorgt werden.

### Ionenwanderungsversuch 2:

**V: Versuchsanordnung:** [DMr S.212, V3]. Der Elektrolyt besteht aus dem Salz "Kupferchlorid", das in Wasser gelöst ist und es blau färbt. Die Elektroden bestehen aus Kohlestiften. Mit Videokamera vor weißem Hintergrund oder durch Projektion für alle beobachtbar machen. Stromstärke ausprobieren. Lampe (4V/0,6A). Das Ergebnis hängt von I ab. Ist I zu klein, so ergibt sich ein weißlicher Kupferrückenschlag an der Kathode. Ist I zu groß, so entsteht eine schwarze Schwadenbildung.

**Versuchsergebnis:** An der Anode steigen Gasblasen auf. Es riecht nach Chlorgas. An der Kathode bildet sich ein Kupferüberzug.



**Erklärung:** Beim lösen des Salzes Kupferchlorid in Wasser zerfällt das Salz in zwei Arten von beweglichen kleinsten Teilchen (Ladungsträgern): In elektrisch positiv geladene Kupferteilchen und in elektrisch negativ geladene Chlorteilchen.

Im elektrischen Kraftfeld zwischen Anode und Kathode wandern:

- die positiv geladenen Kupferteilchen zur Kathode, werden dort entladen und setzen sich als Kupfer ab.
- die negativ geladenen Chlorteilchen zur Anode, werden dort entladen und steigen als Chlorgas auf.

**V: Bestätigungsversuch 1:** Polt man an der Quelle um, so verschwindet der Kupferüberzug an der neuen Anode und bildet sich neu an der neuen Kathode.

**V: Bestätigungsversuch 2:** Ionenwanderungsversuch mit Doppel-Ionenwanderungszelle der Fa. Hedinger

**Benötigt werden:** Doppelzelle, 4 Nickelblechelektroden, 4 Kroko-Klemmen, 3 Experimentierkabel, Lämpchen (6 V/0,03 A ) mit Fassung, Gleichspannungsnetzgerät mind. 20 V (besser 30 V – 40 V).

#### Chemikalien:

**Trog 1:** Anion:  $\text{KMnO}_4$ - Kristalle

Elektrolytlösung: 100 ml 0,1 % - ige wässrige Kaliumnitratlösung (0,1 g  $\text{KNO}_3$  in 100 ml demin.  $\text{H}_2\text{O}$ )

**Trog 2:** Kation: (a) Kupfertetramin - Kristalle:  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4$ . Die Kristalle müssen vor dem Versuch hergestellt werden, da sie sich an der Luft langsam zersetzen. Dazu 1 g Kupfersulfat  $\text{CuSO}_4$  in 5 ml  $\text{H}_2\text{O}$  lösen, 5 ml konzentrierte Ammoniaklösung ( $\text{NH}_3$ ) hinzugeben und so lange umrühren, bis das anfangs ausfallende Kupferhydroxid sich zu tiefblauem Kupfertetraminsulfat  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4$  löst. Diese Lösung in einem kleinen Schraubdeckelglas vorsichtig mit 1 ml Ethanol ( besser Propanol oder auch Ether ) überschichten und zur Kristallisation in den Kühlschrank stellen. Vorsicht: Bei Ether kann sich ein explosives Ether-Luft-Gemisch bilden. Glas dicht verschließen, tief stellen. Die Kristalle bis zum Versuch in der Lösung lassen und vor dem Versuch mit einem Spatel herausnehmen.

(b) Ohne Kristallbildung: Die konzentrierte Kupfertetraminsulfatlösung, also ohne Ethanol, kann auch direkt mittels einer Spritze in das Mittelfeld eingespritzt werden.

(c) Auch wasserlösliche ionische Farbstoffe können verwendet werden, so z. B. Methyleneblau (Kation) in 20% - 30 % - iger Harnstofflösung. Nachteil: Langsamer.

Elektrolytlösung: 100 ml 0,5 % - ige ammoniakalische Kaliumnitratlösung (0,5 g  $\text{KNO}_3$  in 70 ml demin.  $\text{H}_2\text{O}$  und 30 ml konz. Ammoniaklösung  $\text{NH}_3$ ) zugeben.

**Versuchsdurchführung:** Entweder auf dem OH-Projektor oder besser unter Einsatz der Videokamera.

Mit Folienschreiber auf der Doppelzelle die Polarität der Elektroden markieren.

Elektrolytlösungen ca. 0,5 cm hoch einfüllen (z.B. mit Insulinspritze). Elektrodenbleche einsetzen. Kristalle mit Pinzette in das entsprechende Mittelfeld von Trog 1 bzw. 2 fallen lassen. Ohne Anlegen der Spannung allseitige Diffusion innerhalb des Mittelfelds beobachten. Anlegen der Spannung: Ionenwanderung.

**Alternative:** V: Mit Doppel-U-Rohr, Glasfritten, Platinelektroden der Fa. Leybold. Siehe Versuchsbeschreibung der Fa. Leybold.

## Stromrichtung (W)

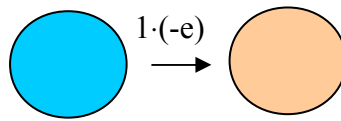
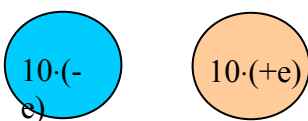
Im metallischen Leiter bewirken die negativ geladenen Elektronen den Ladungsfluss. Sie fließen von vom (-)-Anschluss zum (+)-Anschluss der Quelle.

In leitenden Flüssigkeiten sind die positiven und die negativen Ladungsträger beweglich. Die positiv geladenen Salzteilchen fließen (-)-Anschluss der Quelle, die negativ geladenen zum (+)-Anschluss. Es herrscht Gegenverkehr! Es gibt viele Experimente, bei denen man freie positive Ladungsträger erzeugt und sie – ähnlich wie in der Braun'schen Röhre – beschleunigt. Diese bewirken einen Ladungsstrom von (+) nach (-).

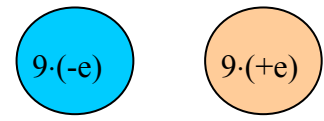
Ob negative Ladungsträger von (-) nach (+) oder positive von (+) nach (-) strömen, ist vollkommen gleichwertig.

Bsp: Zwei geladene Kugeln tragen die Überschussladung

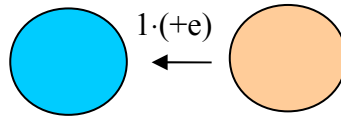
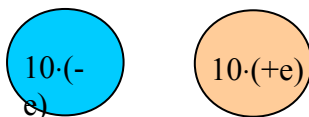
**Vorher**



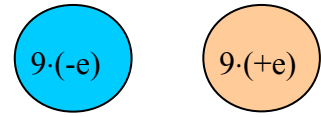
**Nachher**



**Vorher**

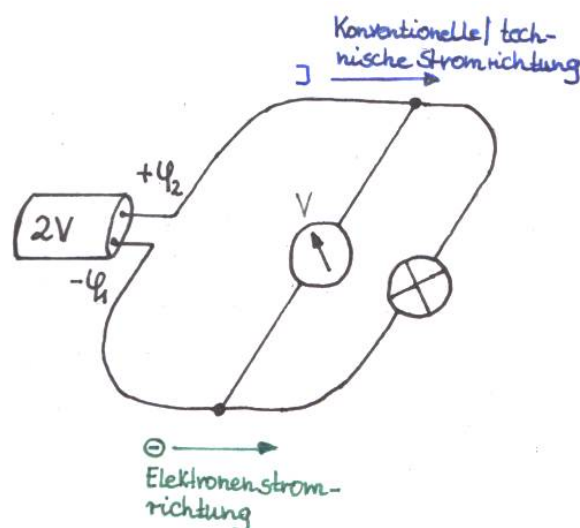


**Nachher**



Konventionelle Stromrichtung: Durch Übereinkunft (Konvention) hat man festgelegt: Unter der Richtung eines elektrischen Stromes versteht man die Richtung, in der sich positive Ladungen bewegen bzw. gegen die sich negative Ladungen bewegen, also vom Plus - Anschluss zum Minus - Anschluss der Quelle.

Elektronenstromrichtung: Bewegungsrichtung der Elektronen im Leiter, also vom Minus - Anschluss zum Plus - Anschluss der Quelle.



# Elektrizitätslehre in Klasse 9/10

## Das elektrische Feld

### Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

#### Bildungsplan 2004

#### Kompetenzen und Inhalte für die Klasse 9/10<sup>29</sup>

##### 9. Strukturen und Analogien

Die S. können ~~kennen~~ **kennen** weitere Strukturen und Analogien **und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten.**

Inhalte:

Qualitative Beschreibung von Feldern (Gravitationsfeld, magnetisches Feld, elektrisches Feld)

##### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

Die S. können ~~elementare~~ **weitere** Erscheinungen in der Natur und wichtige Geräte funktional beschreiben.

Die S. können ~~sind immer mehr in der Lage~~, physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einsetzen.

Inhalte:

Erde: atmosphärische Erscheinungen

Mensch: Sicherheitsaspekte

#### Stoffauswahl und Gewichtung

Es empfiehlt sich, das elektrische Feld wie die meisten Lehrbücher<sup>30</sup> im Rahmen der Elektrizitätslehre zu behandeln und zwar gleich im Anschluss an die Elektrostatik in Analogie zu Magneten und magnetischem Feld. Man kann dann damit einige Anwendungen erklären.

Das Gravitationsfeld sollte man hier noch nicht mit dazu nehmen. Das zerreißt zu sehr den Gedankengang. Besser die Analogie erneut am Ende von Klasse 10 aufgreifen und vertiefen.

Mögliches Vorgehen: Im Team wiederholen die Schüler die erarbeiteten Inhalte zu magnetischen Feldern. Dann wird in möglichst strenger Analogie das elektrische Feld erarbeitet. Dabei behutsamer Übergang von der Fernwirkungstheorie zur Nahwirkungstheorie und damit zum Feldkonzept. Nicht die Überschussladungen sind Ursache für elektrische Kräfte an einem bestimmten Ort, sondern das elektrische Feld an dieser Stelle.

### Lehrgangsskizze

#### Das elektrische Feld in Analogie zum Magnetfeld (P)

Einstieg:

V: „Leuchtende Plasmakugel“, Schüler verändern die Leuchterscheinung durch Berühren der Kugel.

Wie lässt sich das erklären?

Impuls: Diese Erscheinung hat etwas mit elektrischen Feldern zu tun. Du hast schon eine Feldart kennengelernt.

**Vorbereitende Hausaufgabe:** Schüler haben zu Hause die linke Seite der Analogietabelle II: Elektrisches Feld – Magnetisches Feld [08Mag-El-Feld.doc](#) (Lösungen [08Mag-El-FeldL.doc](#)) ausgefüllt und dazu die zugehörige Analogietabelle I des vergangenen Jahres herangezogen.

**PA (10'): S. vergleichen im Team ihre Einträge und ergänzen sie.**

**Leitfrage:** Inwieweit lässt sich das Wissen über magnetische Felder auf elektrische Erscheinungen übertragen?

*In Analogie zum magnetischen Feld werden die entsprechenden Inhalte zum elektrischen Feld erarbeitet:*

L: Haben gesehen, dass Permanentmagnete oder stromdurchflossene Spulen den umgebenden Raum in einen besonderen Zustand versetzen, erkenntlich daran, dass auf magnetische Probekörper an jeder Stelle eine bestimmte

<sup>29</sup> Die gegenüber der Klassenstufe 7/8 neu hinzugekommenen Inhalte sind blau dargestellt, weggefallene Formulierungen sind durchgestrichen.

<sup>30</sup> [08Schulbuchvergleich9\\_10.doc](#)

Kraft wirkt. Wir sagten, sie sind von einem magnetischen Feld umgeben. Ist es bei elektrisch geladenen Körpern auch so? Wie ließe sich das veranschaulichen?

**V: Konduktorkugel positiv (negativ) laden und mit einem positiv geladenen Pendelkugeln abtasten.**

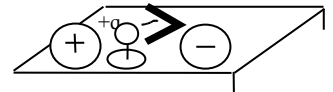
**Merksatz:** In einem Raumgebiet besteht ein **elektrisches Feld**, wenn in allen Raumpunkten auf elektrische Probekörper Kräfte wirken. Solche Kräfte heißen **elektrische Kräfte**.

*In Analogie werden elektrische Probekörper, Feld erzeugende Körper und die Definition einer elektrischen Feldlinie erarbeitet.*

**L:** Wie könnte ein zum schwimmenden Probenordpol analoger Versuch zur Definition der elektrischen Feldlinie aussehen?

**V: Schwimmende „Probeladung“ im Wassertrog**

**Exp. Hinweise:** Durchsichtige Glaswanne auf OHP, zwei Konduktorkugeln mit den Anschlüssen der Influenzmaschine verbinden, leitendes Pendelkugeln auf isolierendem Kunststoffstäbchen auf Korkstück. Die Feldlinie wird an die Tafel projiziert und ins Heft übernommen.



**Alternativ – V: Watteflocken zwischen den Konduktorkugeln der Influenzmaschine [D 9/10, S. 36]**

*Analoge Versuche zur Veranschaulichung der Struktur el. Felder*

**V: Grieskörner in Rizinusöl [D 9/10, S. 36, 37]**

**Erklärung:** Die Grieskörner werden im elektrischen Feld durch Ladungsverschiebung zu elektrischen Dipolen, Ausrichtung, Kettenbildung.

**Elektrisches Dipolfeld:** Projektion des Grieskörnerbilds an die Tafel und einzeichnen der elektrischen Feldlinien. Dabei Unterschied zwischen dem Grieskörnerbild und dem Feldlinienbild erarbeiten.

**Weitere Felder:** Feld zweier gleichnamige Ladungen. Feld eines Plattenkondensators, homogenes Feld, Radialfeld. Dabei Grieskörnerbilder demonstrieren, Schüler Pausprier auf die entsprechenden Bilder im Buch legen und Feldlinienbilder einzeichnen lassen. Dabei nur so viele Feldlinien zeichnen, dass die Struktur des Feldes klar wird.

**Mitteilung:** Wie bei den magnetischen Feldern benötigen auch die elektrischen Felder keinen „Träger“. Sie bestehen auch im Vakuum.

Neue Aspekte/Fragestellungen:

**L-Impuls:** Man kann aus den Feldlinienbildern noch weitere Informationen herauslesen!

**PA: Arbeitsauftrag**

**(A) Einzelarbeit:**

Man kann den Feldlinienbildern ansehen, an welchen Stellen die Feldkräfte größer, und an welchen kleiner sind! Betrachte deine magnetischen und elektrischen Feldlinienbilder und überlege dir, wo große und wo kleine Feldkräfte wirken. Was kann man in diesen Bereichen über die Feldlinien sagen? Formuliere schriftlich eine Hypothese. Man kann den Feldlinienbildern ansehen, ob sich die Feld erzeugenden Körper anziehen oder abstoßen. Formuliere eine Hypothese.

Betrachte Bild B3<sup>31</sup> [D 9/10, S. 38] . Was schließt du daraus?

Was befindet sich zwischen den Feldlinien?

**(B) Teamarbeit: Vergleiche deine Ergebnisse mit deinen Mitschülern im Team. Einigt euch auf gemeinsame Formulierungen.**

**(C) S. präsentieren ihre Ergebnisse.**

**Ergebnisse:** In inhomogenen Feldern ist die Feldkraft in einem Punkt um so größer, je dichter in seiner Umgebung die Feldlinien verlaufen.

Feldlinienbilder machen Aussagen über die Richtungen der Kräfte zwischen felderzeugenden Körpern.

Elektrische Felder lassen sich vollständig abschirmen, bei magnetischen Felder gelingt es gut aber nicht vollständig.

**Anwendungen** (Eine Auswahl genügt. Mindestens jedoch: **Mensch: Sicherheitsaspekte**)

**Mensch: Sicherheitsaspekte: Blitzschutz<sup>32</sup> bzw. Feld bei Spitzen:**

**Fragen:** Nachrichten: „37-jähriger Motorradfahrer wurde vom Blitz erschlagen.“ War das Zufall? Gilt das auch für Fahrradfahrer oder Fußgänger?

<sup>31</sup> Feldlinienbild bei Abschirmung elektrischer Felder

<sup>32</sup> Sehr gute Gelegenheit für eine GFS



oder: Weshalb soll man bei Gewitter hohe Bäume meiden?

oder: Wieso reicht bei einem Haus als Blitzschutz ein Fangstab und die Fangleitungen aus?

Ziehen Sie den Blitz an?

Physikalische Frage: Wie verändert ein spitzer, hoher oder herausragender leitender Körper das elektrische Feld?

### V: (Lehrerversuch) Ionenwanderungsversuche mit Fließpapier:

Benötigt werden: Fließpapier (rundes Filterpapier aus der Chemiesammlung, Löschpapier), Alu-Folie, Glasplatte, Kroko - Klemmen, Netzgerät (100V-200V, mind. 10 mA), Videokamera

Anionen:  $\text{KMnO}_4$ -Körner möglichst einheitlicher Größe mit Sieb aussortieren

Elektrolyt: 0,1 - n  $\text{KNO}_3$  - Lösung (ca. 1g auf 100 ml)

Durchführung: Die Schüler schneiden aus Alu-Folie Wolken und eine Landschaft mit herausragenden Spitzen (Baum, Turm, Person) so, dass alles auf ein kreisrundes Filterpapier passt und legen es am Pult ab. Der L. macht das Fließpapier mit dem Elektrolyten leitend und schließt Spannungsquelle an Wolken und Landschaft an. Dann werden  $\text{KMnO}_4$  - Körner darauf gestreut und eine Spannung von ca. 100 V - 200 V angelegt.<sup>33</sup>

Gemeinsame Beobachtung des Feldlinienverlaufs mittels Beamer und Videokamera.

Ergebnis: Spitzen verformen das elektrische Feld, so dass viele Feldlinien an ihnen enden. In ihrer Nähe schließen wir auf besonders große Feldkräfte.<sup>34</sup>

### V: Evtl. Demonstration der Spitzenentladung (Koronaentladung)

Ergebnis: Die elektrischen Feldkräfte können in der Nähe von leitenden Spitzen so große Werte annehmen, dass sie Ladungsträger aus der Spitze herausreißen.

Elektrisches Feld im Leiterinneren: (Entweder Mitteilung oder falls Zeit ausführlich problemorientiert)

Frage: Wie sieht das elektrische Feld im Leiterinneren aus? Wie könnten wir das mit unseren Ionenwanderungsversuchen untersuchen?

### V: Ionenwanderungsversuche mit gekrümmtem Leiter aus Fließpapier (mit konstantem Leiterquerschnitt) und auch Leiter mit unterschiedlichem Querschnitt

Ergebnis: Auch im Leiterinneren besteht ein elektrisches Feld. Es verläuft vom + zum – Anschluss der Quelle. Bei konstantem Leiterquerschnitt ist es homogen. Es ist für den Stromfluss verantwortlich. Im metallischen Leiter fließen die Elektronen entgegen der Feldlinienrichtung.

### Elektrische Influenz

V: Neutrales Pendelkugeln wird von geladener Konduktorkugel unabhängig von dessen Ladung angezogen.

### Abschirmung

V: Faraday'scher Käfig: Elektroskop im Käfig, mit dem Inneren des Metallkäfigs verbunden zeigt keinen Zeigerausschlag, wenn der Käfig geladen wird. Ein zweites außerhalb mit dem Äußeren verbunden, schlägt aus.

Ergebnis: In der Elektrostatik sind das Leiterinnere und Hohlräume im Leiter feldfrei.

### Alltagsbezug

TA, PA, S-Referate oder GFS

**Mensch: Sicherheitsaspekte:**

- Blitzschutz **Cornelsen [CF2]** S. 83
- Verhalten bei Gewitter **[CF2]** S. 86, 87

Abschirmung in der Technik (Koaxialkabel, Datenleitungen, ...)

Rauchgasfilter **[CF2]** S. 81, Lackiertechnik mit Hilfe elektrischer Felder (Google), ...

### Feld als Energiespeicher

L: Felder haben auch etwas mit Energie zu tun.

<sup>33</sup> Hinweis zur Reinigung:  $\text{KMnO}_4$  ergibt Braunsteinflecken, die sich folgendermaßen entfernen lassen: Man löst etwas Natriumthiosulfat (Fixiersalz) in Wasser und säuert leicht an, z.B. mit verdünnter Salzsäure. Diese Lösung ist ein gutes Reduktionsmittel und überführt unlösliches Mangan(IV)oxid (Braunstein) in wasserlösliche Mangan(II)salze. Die Lösung muss jeweils frisch vorbereitet werden, da sie sich ziemlich schnell zersetzt. Dabei entstehen Schwefel (Trübung der Lösung) und Schwefeldioxid (Gestank). Das Reaktionsgemisch kann durch „Kanalieren“ entsorgt werden.

<sup>34</sup> Wertvoll für das Verständnis des Geiger-Müller-Zählrohrs



V: Kondensator am besten mit Dynamot laden und damit Motor antreiben.

V: Kondensatorplatten laden und über Glimmlampe entladen, dann erneut laden auseinander ziehen und wieder über Glimmlampe entladen.

V: Magneten voneinander lösen und wieder zusammenfahren lassen.

Mitteilung: Solche und andere Versuche legen die Vorstellung nahe, dass elektrische und magnetische Felder Energie enthalten.

Felder umgeben uns überall: SuS veranschaulichen das Magnetfeld der Erde, das elektrische Feld der Erde (und falls schon behandelt das Gravitationsfeld) durch verschiedenfarbige Luftschlangen im Physikraum (genügend Luftschlangen mit drei verschiedenen Farben, Magnetnadel zur Messung des Inklinationwinkels)

# Elektrische Spannung, Energie, Leistung

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Bildungsplan 2004

Kompetenzen und Inhalte für die Klasse 9/10<sup>35</sup>

#### 2. Physik als theoriegeleitete Wissenschaft

a) Die SuS können die naturwissenschaftliche Arbeitsweise Hypothese, Vorhersage, Überprüfung im Experiment, Bewertung, ... ~~in ersten einfachen Beispielen~~ anwenden.

#### 3. Formalisierung und Mathematisierung in der Physik

b) Die SuS können ~~einfache~~ funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen, die z. B. durch eine Formel vorgegeben werden, verbal beschreiben und interpretieren.

#### 4. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik

a) Die SuS können ~~einfache~~ Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen untersuchen.

b) Die SuS können ~~erste~~ Experimente unter Anleitung planen, durchführen, auswerten, grafisch veranschaulichen und ~~angeben, welche Faktoren die Genauigkeit von Messergebnissen beeinflussen~~ und einfache Fehlerbetrachtungen vornehmen.

e) Die SuS können die Methoden der Deduktion und Induktion an einfachen im Unterricht behandelten Beispielen erläutern.

#### 5. Anwendungsbezug und gesellschaftliche Relevanz der Physik

b) Die SuS können ~~erste~~ physikalische Grundkenntnisse und Methoden für Fragen des Alltags sinnvoll einsetzen

d) Die SuS kennen charakteristische Werte der behandelten physikalischen Größen und können sie für sinnvolle physikalische Abschätzungen anwenden.

#### 8. Grundlegende physikalische Größen

Neu hinzugekommen:

b) Die SuS kennen technische Möglichkeiten zum „Energiesparen“ und zur Reduzierung von „Entropieerzeugung“.

#### 9. Strukturen und Analogien

Die SuS ~~können~~ kennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten.

Inhalte:

~~Qualitativ:~~ Energiespeicher, Beschreibung von elektrischen Energietransporten

#### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

a) Die SuS können wichtige Geräte funktional beschreiben.

Inhalte:

Mensch: Physikalische Abläufe im menschlichen Körper, Sicherheitsaspekte

Alltagsgeräte

### Bemerkungen zu den Kompetenzen

2a) und 4 a), b).: Bei der Erarbeitung des energetischen Aspekts der elektrischen Spannung kann die Kompetenz bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung des Experiments gefestigt werden

9: Die Beschreibung elektrischer Energiespeicher und Energietransporte ist der zentrale Inhalt der Einheit. Diese Kompetenz kann nur hier erarbeitet werden.

3b) Verständnis und korrekte verbale Beschreibung der Gleichung  $U = \Delta E/Q$

5 a), 8b) : Der Anwendungsbezug und die Bedeutung für das Energiesparen ist offenkundig.

5 d): Charakteristische Werte sind die Netzspannung 230 V sowie typische Spannungswerte elektrischer Batterien sowie berührungsgefährliche Spannungswerte.

<sup>35</sup> Die gegenüber der Klassenstufe 7/8 neu hinzugekommenen Inhalte sind blau dargestellt, weggefallene Formulierungen sind durchgestrichen.

#### 4 e): Deduktion der Gleichung für P

#### 10: Funktionale Erklärung des „Stromzählers“ und Kenntnis der Gefahren der Elektrizität

### Stoffauswahl und Gewichtung

Frage der Gewichtung von Erarbeitung und Anwendung

Eine zentrale Forderung des Bildungsplans ist die Anwendbarkeit.

Für die internationale PISA - Studie haben die Fachdidaktiker die physikalische Grundbildung folgendermaßen festgelegt:

Die SuS sollen **naturwissenschaftliche Konzepte** kennen und sie auf realistische Fragestellungen aus Leben, Gesundheit, Erde, Umwelt, Technologie anwenden können.

Sie sollen **naturwissenschaftliche Fragestellungen** als solche erkennen, Informationen zur Klärung auswählen und verwenden, Schlussfolgerungen ziehen, und mitteilen.

Diese Forderung findet man in den Leitgedanken zum Bildungsplan wieder. Gleich der erste Satz lautet: „Durch eine physikalische Grundbildung sollen SuS in die Lage versetzt werden, erworbenes physikalisches Wissen anzuwenden“. Und weiter unter didaktischen Grundsätzen: „Das im Rahmen der physikalischen Grundbildung an speziellen Beispielen erworbene Wissen über Fakten und begriffliche Strukturen sowie die dabei entwickelten Fähigkeiten müssen auf neue Fragestellungen anwendbar sein.“

Um diese Forderung innerhalb des zur Verfügung stehenden zeitlichen Rahmens erfüllen zu können, gehen die Schulbücher zunehmend dazu über, die fachsystematische und gründliche Erarbeitung zu Gunsten der Anwendungsbeispiele zu reduzieren. Das reicht von der korrekten Erarbeitung über eine mehr oder weniger nachvollziehbare Plausibilitätsbetrachtung bis hin zur reinen Mitteilung. [08Schulbuchvergleich9\\_10.doc](#).

Andererseits definiert der Bildungsplan „ein Kerncurriculum, das die Anschlussfähigkeit an die Hochschule garantiert.“

In diesem Spannungsfeld befindet man sich bei der Planung der Unterrichtseinheit.

Unverzichtbare Lernziele der Einheit

Die Gleichung  $U = \Delta E / Q$  (oder  $U = P / I$ ) verstehen, kennen und anwenden können.

Die Gleichungen  $\Delta E = U \cdot I \cdot t$  und  $P = U \cdot I$  kennen und anwenden können.

Mit den Einheiten kW und kWh sicher umgehen können.

Gleichungen auf Probleme des Alltags anwenden können.

Gefahren des elektrischen Stromes sowie Schutzmaßnahmen kennen.

Charakteristische Werte auswendig wissen: Netzspannung 230 V, berührungsgefährliche Spannungen über AC 25 V, DC 60 V.

### Die elektrische Spannung

#### Zwei Aspekte des Spannungsbegriffs:

##### Die Stromtreibfähigkeit der Quelle

Der Spannungsbegriff wurde in Klasse 8 propädeutisch in Analogie zur Druckdifferenz im Wasserstromkreis als Maß für den Antrieb des elektrischen Stromes eingeführt.

**Je größer die Spannung U der Quelle, desto größer die Stromstärke I im Stromkreis.**

Quantitativ wurde dieser Zusammenhang durch das Ohm'sche Gesetz formuliert:  $I \sim U$  bzw.  $I = U / R$ . Eine Definition der elektrischen Spannung fand in Klasse 8 noch nicht statt.

##### Definition und der energetische Aspekt

Eine Definition der elektrischen Spannung als Quotient aus der Überführungsarbeit der Feldkräfte und der Probeladung ist für diese Klassenstufe natürlich zu abstrakt.

Man wird den energetischen Aspekt in der Gleichstromlehre einführen und dabei eine erste Definition der elektrischen Spannung vornehmen. Dabei muss der wesentliche Aspekt des Spannungsbegriffs erfasst werden und eine Erweiterung bis hin zu einer wissenschaftsnahen Definition möglich sein.

Auf dieser Klassenstufe wird nur ein "Spezialfall" behandelt: Die Wanderung von Elektronen in einem metallischen Leiter in einem geschlossenen Stromkreis unter dem Einfluss elektrischer Kräfte, die im Leiterinneren wirksam sind. Von Probeladungen ist hier keine Rede. In diesem Fall hat die Spannung  $U_{12}$  zwischen den Anschlüssen  $P_1$  und  $P_2$  der

Quelle folgende Bedeutung:

$U_{12} = \Delta E_{el}/Q$  ist ein Maß dafür, wie viel Energie die Quelle beim Fließen elektrischer Ladung liefert. Jedes Mal, wenn 1 Coulomb elektrischer Ladung die Quelle bei  $P_1$  verlassen hat und bei  $P_2$  wieder 1 Coulomb in sie eingetreten ist und damit auch jeden beliebigen Leiterquerschnitt durchströmt hat, wird im Stromkreis ein bestimmter Energiebetrag freigesetzt. Seine Größe hängt nicht von der Art des Stromkreises, sondern ausschließlich von der Art der Quelle ab.

**Je größer die Spannung  $U$  der Quelle, desto größer die Energie, die pro Coulomb verschobener Ladung an einen beliebigen Stromkreis abgegeben wird.**

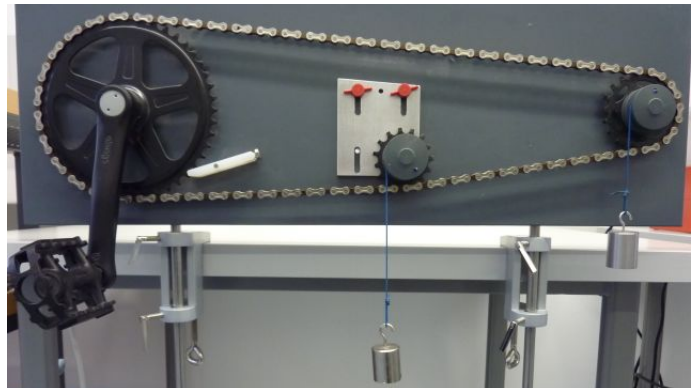
$\Delta E_{el}/Q$  hat einen eigenen Namen, die *elektrische Spannung*  $U$ , und eine eigene Einheit  $1 \text{ J/C} = 1 \text{ V}$ .  $U$  charakterisiert die elektrische Quelle, sie ist eine Gerätekonstante.

Diese Definition kommt der wissenschaftlichen sehr nahe, bereitet die Definition in der Kursstufe fachdidaktisch reduziert vor und erlaubt die Anschlussfähigkeit an die Hochschule. Die in [CF1, S. 196] angegebene und durch Experimente plausibel gemachte Definition  $U = P/I$  ist dagegen weit von der wissenschaftlichen Definition entfernt.

### Typische Schülervorstellungen

Da den Schülerinnen und Schülern der Begriff des elektrischen Feldes sowie der Energietransport in Feldern i.A. noch nicht zur Verfügung steht, muss der Lehrer Fehlvorstellungen beim Energietransport und bei der Interpretation der Gleichung  $U = \Delta E_{el}/Q$  vorbeugen. Der Zusammenhang  $\Delta E \sim Q$  stellt zwar eine Beziehung zwischen der übertragenen elektrischen Energie und der transportierten Ladung her, sagt aber nicht aus, dass die Energie von den Ladungen transportiert wird. Eine typische Fehlvorstellung ist, dass die Ladungen an der Quelle mit Energie „beladen“ werden, diese dann zum elektrischen Gerät transportieren und dort abgeben, so dass sie dann „energieleer“ wieder zur Quelle wandern („Rucksackmodell“). Diese Fehlvorstellungen impliziert weitere falsche Vorstellungen und Fragen, denen man von vornherein begegnen muss.

Dabei hat sich die Analogiebetrachtung zum Fahrradkettenmodell (siehe nebenstehende Abbildung) bewährt. Überträgt man aufgrund seiner Muskelkraft Energie auf die Fahrradpedale, setzen sich alle Kettenglieder gleichzeitig ohne Zeitverzögerung in Bewegung. Dadurch wird das Zahnrad angetrieben und ein Körper der Masse  $m$  hochgehoben. Die durch die Muskeln auf die Pedale übertragene Energie ist gleich der Höhenenergie des Körpers, der um die Höhe  $h$  angehoben wurde. Dabei ist sofort klar, dass die Kettenglieder nicht mit Energie beladen sind und diese am Zahnrad abgeben. Die Kettenglieder sind jedoch zur Energieübertragung notwendig, ohne sie kann die Übertragung nicht stattfinden. Schaltet man ein zweites Zahnrad in das System, wird die Energie auf beide Zahnräder übertragen, ohne dass ein Kettenglied am ersten Zahnrad „weiß“, dass noch ein zweites Zahnrad folgt. Hat man ein Fahrrad mit Leerlauf zur Verfügung, so kann man zeigen, dass eine kurzes mehrfaches Vorwärts- und Rückwärtstreten der Pedale dazu führt, dass Energie übertragen wird, ohne dass sich ein Kettenglied, welches sich an den Pedalen (an der „Quelle“) befindet, jemals bis zum Antriebsrad hin bewegt. Eindrucksvoll kann man diese Art der Energieübertragung auch zeigen, wenn man einer Schülerin oder einem Schüler ein Seil um den Unterarm wickelt und an den Enden des Seils vorsichtig hin- und herzieht. Auch hier wird Energie übertragen, ohne dass die Teile des Seils, die sich an der „Quelle“ befinden, jemals am Unterarm vorbeikommen.



### Erweiterungen des Spannungsbegriffs

Gleich im Anschluss an die Einführung des Spannungsbegriffs wird man erörtern, dass er auch dann noch sinnvoll zur Charakterisierung der energetischen Qualität einer Quelle angewandt werden kann, wenn sie keine Ladungen durch den Stromkreis pumpt. Man spricht dann von der Energie, die die Quelle je verschobener Ladung liefern **kann**.

Als nächstes erweitert man den Spannungsbegriff auf den von der Quelle losgelösten Begriff der **Teilspannung**. Sie ist einem Teil des Stromkreises als die Energie je Coulomb zugeordnet, die die elektrischen Feldkräfte in diesem Teil des Stromkreises umsetzen. Die Quelle spielt nur noch insofern eine Rolle, als sie dort das elektrische Feld erzeugen muss.

Hier kann man auch den energetischen Aspekt des elektrischen Potentials als „elektrische Lageenergie“ je  $C$  an einer Stelle des Stromkreises vertiefen.

Die abschließende Erweiterung des Spannungsbegriffs zu einer wissenschaftsnahen Definition erfolgt in der Elektrostatik der Oberstufe.

## Methodisches Vorgehen

Die Spannungsdefinition  $U = \Delta E / Q$  ist sehr abstrakt und für die Schüler sehr schwer. Eine reine Mitteilung verbietet sich.

Eine Plausibilitätsbetrachtung wie in [I9/10, S. 20] ist wenig erhellend.

Die Erarbeitung über  $U = P / I$  – auch mit Schülerversuchen – ist möglich<sup>36</sup>. Siehe auch [SP2, S. 54]

Bei wenig Zeit kann man den Weg von [D9/10, S. 27] gehen: In einem Gedankenexperiment kann man plausibel machen, dass  $\Delta E \sim Q$  ist. Im Demonstrationsversuch bestimmt man für einen Tauchsieder  $\Delta E / Q$  zu 230 J/C und führt damit die Spannung als  $U = \Delta E / Q$  ein.

Bei etwas mehr Zeit kann man durch eine Messreihe mit einem Energiemessgerät („Stromzähler“ aus dem Haushalt – im Lehrmittelhandel für den Unterricht kalibriert zu erwerben) zeigen, dass  $\Delta E_{el} \sim Q$  ist.

$\Delta E / Q$  hat bei einer bestimmten Quelle einen konstanten Wert unabhängig von  $\Delta E_{el}$ , von  $Q$  und von der Art des Stromkreises.

Für eine andere Quelle erhält man einen anderen konstanten Wert. Um den Anwendungsaspekt zu erhöhen, bietet sich ein Vergleich des europäischen Netzes (230 V) mit dem amerikanischen Netz (110 V) an. Die Unterschiede in den Spannungswerten sind den SuS in den meisten Fällen aus eigenen Urlaubserfahrungen bekannt.

Nach Klärung der Bedeutung der Konstanten wird der Spannungsbegriff um den energetischen Aspekt erweitert und so eine erste Definition der elektrischen Spannung vorgenommen.

Im Manuskript wird der letztgenannte Weg vorgestellt. Gründe für einen solchen Lehrgang:

Die Schüler haben das induktive Vorgehen nach der Invariantenmethode nach der Einführung der Spannung in Klasse 8 in der Regel erst beim Ohm'schen Gesetz angewandt. Eine Einübung ist wegen der seltenen Gelegenheit äußerst wichtig.

Das Messen von  $\Delta E_{el}$  mit dem „Energiezähler“ ist gut nachvollziehbar, die Proportionalität lässt sich experimentell sehr gut zeigen.

Der „Energiezähler“, der jeder Schülerin und jedem Schüler aus dem Haushalt bekannt ist, kann wegen des Anwendungsbezugs nicht fehlen. Er wird deshalb von jedem Schulbuch behandelt. Dadurch ist der zusätzliche Zeitaufwand gegenüber dem Weg [D9/10, S. 27] gering.

Der alternative Weg von [D9/10, S. 27] ist dort so gut beschrieben, dass er hier nicht nochmals dargestellt werden muss.

## Elektrische Energie und elektrische Leistung

Die Gleichungen für die elektrische Energie und die elektrische Leistung lassen sich aus der Definitionsgleichung der elektrischen Spannung leicht deduktiv mit  $P = \Delta E / t$  ableiten. Das Skript geht in dieser Weise vor (siehe auch [DB2, S. 28], [I2, S. 20]). Aus  $U = P / I$  gelingt dies noch einfacher [CF1, S.201]. Einige Schulbücher gehen hierbei anders vor: [DP2, S.196f.] teilt die Formeln lediglich mit. [U1, S. 277] führt  $P = U \cdot I$  durch Plausibilitätsbetrachtung anhand von Experimenten mit Lämpchen und Generatoren ein. Sollte die Definitionsgleichung für die Spannung nicht zur Verfügung stehen, kann man auch nach Art dieser Schulbücher vorgehen. In jedem Fall müssen die Gleichungen angewendet und an konkreten Beispielen eingeübt werden, speziell im Zusammenhang mit weiteren Energie- und Leistungsmessungen an Alltagsgeräten.

<sup>36</sup> Schriftliche Prüfungsarbeit von Frank Schiebel am Seminar Tübingen.

Auch in [SP2, S. 54]. Da die Lämpchen in der Ausführung stark variieren, kann man von der gleichen Helligkeit nur sehr unbefriedigend auf den gleichen Energieumsatz schließen.

## Lehrgangsskizze

### Elektrische Energie (P) – Energetischer Aspekt der elektrischen Spannung (W)

#### Hinführung:

L: Hochaktuelles Thema: Klimaschutz und Energiesparen (Pressemitteilung, ...). Um eine Veränderung der Gewohnheiten herbeizuführen, gibt es Energieberater.

L: Welche Bereiche würdet ihr als Energieberater unter die Lupe nehmen?

Sammeln: Elektrogeräte, Heizung, Dämmung, Solaranlagen: Photovoltaik, Solarthermie

L: Ordnen nach Energieformen; vorläufige Einschränkung der Betrachtung auf elektrische Energie.

L: Warum hat die Elektrizität so große praktische Bedeutung? Warum gibt es in jedem Haushalt ein elektrisches Leitungsnetz?

Wie kommt die Energie vom Kraftwerk in den Haushalt?

Energieflussdiagramm:

-

**Leitfrage:** Wovon hängt die elektrische Energie ab, die durch den elektrischen Strom geliefert wird?

Wie lässt sie sich messen und berechnen?

**V: Untersuchung mit dem Generator von Cornelsen, zwei 12 V/35 W-Glühlampen, Voltmeter, Amperemeter.**

**S-Vermutungen :** U: Je größer die Spannung U, desto größer die übertragene elektrische Energie  $\Delta E$ .

Bemerkung: Abhängigkeit von der elektrischen Quelle – im folgenden zentralen Versuch vom europäischen und amerikanischen Netz

I: Je größer I, desto größer die übertragene elektrische Energie  $\Delta E$ .

Bemerkung: Abhängigkeit vom elektrischen Gerät

t: Je länger der Vorgang dauert, desto mehr Energie wird geliefert.

L: Vorsicht: I hängt von U und R ab, also vom elektrischen Gerät!

Und:

**V: (falls Zeit): 6 V/5 A Lampe an 6 V, 230 V/100 W-Lampe an 230 V. [D9/10, S. 26, V1]**

**Ergebnis:** Ein kleiner Strom kann bei einer großen Spannung mehr Energie übertragen als ein großer.

L: Wie können wir eine so vielfältige Abhängigkeit untersuchen?

S: Nur eine Größe variieren, die anderen konstant halten.

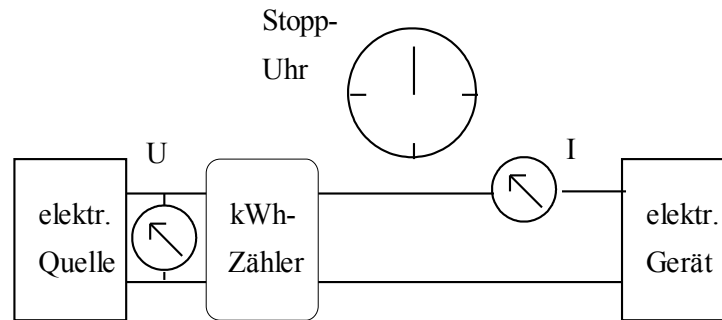
L: Außerdem benötigen wir ein viel genaueres Messgerät für die gelieferte Energie.

L: Vorstellen des zentralen Versuchs:

**V: Zentraler Versuch zur Definition von U: Netzanschluss, kWh-Zähler, Uhr, Messgeräte, Elektrische Geräte z.B. 100 W - Glühlampe und 300 W – Tauchsieder oder Haartrockner, als Netzanschluss Trenntrafo, Spannung nach dem Einschalten kontrollieren und gegebenenfalls nachregeln.**

**Bemerkung:** Nutzt man zur Untersuchung einen Reise-Haartrockner, der sich von 230 V auf 110 V umschalten lässt, lassen sich im Anschluss an den Versuch verschiedene Fragen zu elektrischen Geräten im europäischen und amerikanischen Netz anschaulich diskutieren.



Versuchsaufbau:Energiemessgerät: "Elektrizitätszähler" [D9/10, S. 27]

Anzeigeprinzip: Mit jeder Umdrehung wird eine bestimmte Energieportion geliefert

Mitteilung: Die Energieportion bei einer Umdrehung beträgt ... J.

Elektrische Geräte: 1. 100 W-Glühlampe Gl  
2. 300 W-Tauchsieder Ta

Durchführung: **V1. Wir liefern an verschiedene elektrische Geräte von derselben Quelle die gleiche Energieportion und untersuchen, wie sich die Messgrößen I und t ändern.**

Elektrische Quelle: Simulation des **Europäischen Netzes** mit  $U = 230\text{ V}$

Gerät	Anz. der Umdr.	gelieferte Energie $\Delta E_{\text{el}}$ in J	Stromstärke I in A	Zeit t in s	Ladung $Q = I \cdot t$ in C	Quotient $\Delta E_{\text{el}}/Q$ in J/C
Gl		3000				
Ta		3000				
Gl		6000				
Ta		6000				

Ergebnis: I ist bei jedem Gerät verschieden, jedoch während der Messdauer konstant. Je größer I, desto kleiner t. Das Produkt  $I \cdot t$  hat für alle Geräte denselben Wert.  $I \cdot t = Q$  gibt aber die Ladung Q an, die durch die Geräte geflossen ist.

**V2. Lieferung der doppelten Energieportion.**

Ergänzung der Tabelle, Verallgemeinerung

Folgerung: Bei unserem Netz ist  $\Delta E_{\text{el}} \sim Q$ ,  $\Delta E_{\text{el}}/Q = 230\text{ J/C}$  unabhängig vom Gerät.

Klärung der Bedeutung des Quotienten: Unser Netz (d.h. der Generator im E-Werk) liefert mit jedem Coulomb verschobener Ladung die Energie 230 J, unabhängig von der Art des angeschlossenen Elektrogeräts.

Neue Frage: Wie ist es dann bei einer anderen Quelle, z. B. dem **amerikanischen Netz**? S: Vermutungen

**V3: Wenigstens das Gerät mit der größten Leistung an Stelltrafo mit 110 V .**

Elektrische Quelle: Simulation des **Amerikanischen Netzes** mit  $U = 110\text{ V}$

Gerät	Anz. der Umdr.	gelieferte Energie $\Delta E_{\text{el}}$ in J	Stromstärke I in A	Zeit t in s	Ladung $Q = I \cdot t$ in C	Quotient $\Delta E_{\text{el}}/Q$ in J/C
Ta		3000				
Ta		6000				

Folgerung: Auch beim amerikanischen Netz ist  $\Delta E_{\text{el}} \sim Q$ , es ist  $\Delta E_{\text{el}}/Q = 110\text{ J/C}$  konstant und unabhängig vom



Gerät.

Bedeutung des Quotienten.

Ergebnis:

Bei jeder Quelle ist  $\Delta E_{\text{el}} \sim Q$ , Der Quotient  $\Delta E_{\text{el}}/Q$  charakterisiert die elektrische Quelle  $\Delta E_{\text{el}}/Q = \text{konstant}$ .

L: Es ist kein Zufall, dass die Spannungsangabe 230 V mit dem Quotienten 230 J/C übereinstimmt. Genau so wurde die Spannung festgelegt:

### **Definition der elektrischen Spannung**

In einem elektrischen Stromkreis gibt eine Quelle beim Verschieben der elektrischen Ladung  $Q$  die elektrische Energie  $\Delta E_{\text{el}}$  ab.

$$\text{Elektrische Spannung} = \frac{\text{Abgegebene elektrische Energie}}{\text{dabei verschobene Ladung}}$$

$$U = \frac{\Delta E_{\text{el}}}{Q}$$

Einheit: 1 Volt

$$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$$

L: Einbinden in bereits Gelerntes: Was wusstet ihr bisher über die elektrische Spannung?

S: Spannung als Antrieb für die Elektrizität, Spannung als Potenzialdifferenz, (Nennspannung), Einheit 1 V.

L: Fasst zusammen:

Bisher: Spannung, als Maß für den Antrieb des elektrischen Stromes. Je größer die Spannung, desto mehr Elektronen werden je Sekunde durch den Leiterquerschnitt verschoben, desto größer  $I$ .  $I \sim U$ ,  $I = U/R$ .

Neu: Spannung ist ein Maß dafür, wie viel Energie die Quelle liefern kann. Je größer  $U$ , desto mehr Energie wird mit jedem Coulomb verschobener Ladung an den Stromkreis abgegeben. Das ist ein zweiter, energetischer Gesichtspunkt des Spannungsbegriffs!

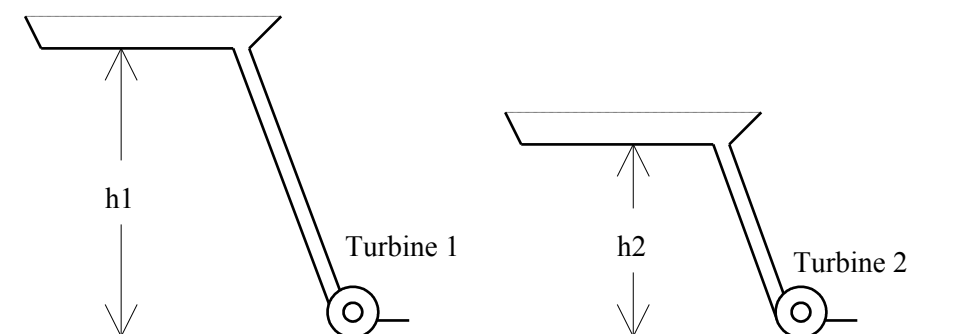
Beispiele:

Unser Netz:  $U = 230 \text{ V} = 230 \text{ J/C}$ . Es liefert mit jedem Coulomb verschobener Ladung die Energie 230 J, unabhängig von der Art des angeschlossenen Elektrogeräts.

Amerikanisches Netz:  $U = 110 \text{ V} = 110 \text{ J/C}$ . ... Was geschieht, wenn ein Haartrockner aus Europa (230 V) in Amerika betrieben wird? Was geschieht umgekehrt? Was muss geändert werden, damit die Föhne in beiden Erdteilen funktionieren? Welche Funktion hat der Spannungsumschalter bei einem Reise-Haartrockner?

1,2 V – Akku liefert beim Fließen der Ladung 1 C nur 1,2 J Energie.

### Veranschaulichung mit Hilfe des Wassermodells:



Turbine 1 liefert mehr Wasser je sec als Turbine 2 (Antrieb) und Turbine 1 liefert mit jedem  $\text{m}^3$  Wasser mehr Energie als Turbine 2 (Energie) unabhängig von der Fließgeschwindigkeit.

L: Das elektrische Potenzial?

Bisher: Spannung gemessen bezüglich eines fest gewählten Bezugspunktes.

Neu: Elektrische Lageenergie je Coulomb Ladung bezüglich einem fest gewählten Nullniveau.

Wiederholung der Parallel- und Reihenschaltung von elektrischen Quellen, nun mit energetischen Aspekten: vgl.

**[DB1, S. 204]**Falls Zeit oder BedarfKlärung des Geschehens in der Quelle:

Frage: Wie kommt es, dass beim Fluss der Ladungen Energie übertragen wird? Was geschieht in der Quelle?

**V [D9/10, S. 26, V2]: Kondensatorplatten und Glühlampe**

Klärung: Beim Trennen der Ladung in der Quelle wird gegen ihre Anziehungskräfte Energie übertragen, die beim Fließen der elektrischen Ladung an den Stromkreis abgegeben wird.

Erweiterung:

Auch einer Quelle, deren Anschlüsse mit keinem geschlossenen Stromkreis verbunden sind, schreiben wir den Spannungswert  $U$  zu. Er gibt dann an, wie viel Energie sie liefern kann.<sup>37</sup>

Teilspannungen an den Widerständen einer Reihenschaltung geben an, wie viel Energie je Coulomb verschobener Ladung dort in innere Energie umgewandelt wurde.

**Elektrisch übertragene Energie und elektrische Leistung (P)**

**L:** Antwort auf die eingangs gestellte Leitfrage: Die vom elektrischen Strom gelieferte Energie  $\Delta E_{el}$  hängt nur ab von der Spannung  $U$  der Quelle und von der dabei verschobenen Ladung  $Q$  ab. Sie lässt sich somit leicht berechnen. Da sich die geflossene Ladung nicht direkt messen lässt, ersetzen wir sie durch  $Q = I \cdot t$ :

**Abgegebene elektrische Energie**       $\Delta E_{el} = U \cdot I \cdot t$

**M: Demonstration der Aufschrift auf elektrischen Geräten.**

Technische Daten einer Energiesparlampe: 230 V / 12 W.

**L-S:** Diskussion der Bedeutung der Wattangabe: Watt ist die Einheit der Leistung. 12 W bedeutet, dass in einer Sekunde 12 J elektrischer Energie in Licht und Wärme umgewandelt werden.

Frage: Wie lässt sich das überprüfen?

**L:** Da wir eine Gleichung für die elektrische Energie haben, können wir leicht die elektrische Leistung durch elektrische Größen ausdrücken:  $P = \Delta E_{el}/t = U \cdot I$

**Elektrische Leistung**       $P_{el} = U \cdot I$

**Einheit: 1 Watt**      **1 W = 1 V · 1 A = 1 VA (sprich: Ein Voltampere)**

**PA:** Entwirf einen Versuch zur Messung der elektrischen Leistung der Energiesparlampe (Schaltplan, Welche Größen müssen gemessen werden?, Ermittlung von P).

**V:** Messung der elektrischen Leistung

**L:** Welche Spannung muss angelegt werden? Erläuterung der Nennspannung von Geräten

**V: Experimentelle Überprüfung**

**SV:** Messung der Leistung von Lämpchen bei verschiedenen Spannungen (Kleiner als Nennspannung, Nennspannung, etwas größer als die Nennspannung)

**Wiederholung:** Keine Angst vor großen Einheiten

**M: „Stromzähler“**

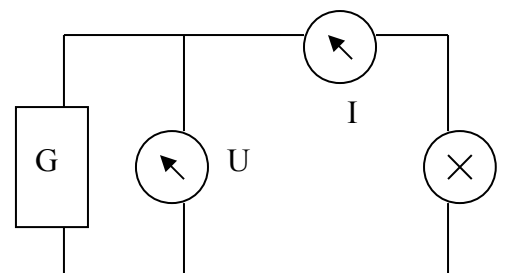
**L:** Weshalb trägt der Zähler nicht die Einheit J, wenn er die elektrische Energie misst? Klärung.

**Einheit der Energie**

1 Kilowattstunde:      1 kWh = ... = 3 600 000 J

1 Megawattstunde      1 MWh = ...

1 Wattsekunde      1 Ws = 1 J



<sup>37</sup> Parallel- und Reihenschaltung von Quellen wurde bereits in Klasse 8 behandelt.

## Einheiten der Leistung

1 Kilowatt	1 kW = 1000 W = 1000 J/s
1 Megawatt	1 MW = ...
1 Watt	1 W = 1 J/s

## Wirkungsgrad und Energiemessungen (P) [U1, S. 166 f.]

V: Vergleich der Helligkeit einer Glühlampe mit 60 W und einer Energiesparlampe mit 12 W.

Beobachtung: Bei beiden Lampen hat man ungefähr die gleiche Helligkeitsempfindung. Die **Eingangsleistung** der Glühlampe ist jedoch 5-mal größer als die **Eingangsleistung** der Energiesparlampe.

Erklärung: Da die Leistung bei Lampen angibt, wie viel Energie je Sekunde in Licht und thermische Energie umgewandelt wird, beide Lampen jedoch gleich hell leuchten, muss in der Glühlampe mehr Energie in thermische Energie umgewandelt worden sein als in der Energiesparlampe. Das erkennt man daran, dass die Glühlampe sehr schnell sehr heiß wird.

Erörterung: Die Glühlampe gibt daher ca. 5-mal mehr Energie als thermische Energie an die Umgebung ab als die Energiesparlampe. Eine Glühlampe nutzt nur ca. 5 % der erhaltenen Energie zur Umwandlung in Licht, 95 % der erhaltenen Energie wird in thermische Energie der Umgebung umgewandelt. Die **Nutzleistung** ist daher nur 3 W. Die Energiesparlampe setzt 5-mal mehr, also ca. 25 % der erhaltenen Energie, in Licht um. Ihre Nutzleistung beträgt ebenfalls 3 W.

**Energieflussdiagramme** für Glühlampe und Energiesparlampe zeichnen [U1, S. 166, 01]

**Wirkungsgrad:** Der Wirkungsgrad  $\eta$  gibt an, welcher Anteil der zugeführten Energie auf die gewünschte Art genutzt werden kann. Der Wirkungsgrad hat keine Einheit und wird oft in Prozent angegeben.

$$\eta = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P_{\text{Eingang}}}$$

Beispiele: Der Wirkungsgrad der Glühlampe ist  $\eta = 0,05 = 5 \%$ , der Wirkungsgrad der Energiesparlampe ist  $\eta = 0,25 = 25 \%$ .

Weitere Beispiele: siehe [U1, S. 166, 02]

**Praktikum Wirkungsgrad eines selbst gebastelten Tauchsieders:** [☛ Praktikum\\_Wirkungsgrad\\_Tauchsieder.docx](#)

Info: Im Haushalt haben wir es mit Wechselspannung und Wechselstrom zu tun. Kurze Erläuterung dazu. Gleichungen gelten auch für Wechselstromgrößen.

TA: Jedes Team beschäftigt sich mit einer der folgenden Aufgaben, erstellt Lösungen und präsentiert sie.

Übungsaufgabe aus dem Alltag: [☛ Leistung\\_und\\_Energie.docx](#)

Aufgaben aus [I 9/10, S. 22, 23]:

Elektrische Leistung und Energie im Alltag

Die verfügbare Ladung eines Akkus

Die verfügbare Energie eines Akkus

Die Stromrechnung

Die kWh und das Joule

Messung von elektrischen Leistungen bei Haushaltsgeräten

Haushaltsgeräte und Sicherung

Wohlstand und Energie (aus [D9/10, S. 29])

## **Vertiefung: Elektrische Energiequellen und elektrische Energiespeicher, Energieübertragungsanlagen (P)**

Wiederholung aus Klasse 7/8: Mind-Map zu Energiequellen und Energiespeichern

Kennlinien von Energiequellen:

- Praktika zur Batterie (Innenwiderstand von Spannungsquellen, Belastungskennlinie)  
[☛Praktikum\\_Batterie.docx](#)
- Praktika zu galvanischen Elementen (schwer und eher für Chemiker geeignet):  
[☛Praktikum\\_Galvanische\\_Elemente.docx](#)

## **Gleichwertige Feststellung von Schülerleistungen (GFS)**

**Energieübertragungsanlagen**

**Mensch: Sicherheitsaspekte, insbesondere beim Experimentieren und beim Umgang mit Haushaltsgeräten:**

GFS zu Gefahren des elektrischen Stromes [CF2, S. 67] oder [D 9/10, S. 32]

**Wichtigster Inhalt:** Berührungsgefährliche Spannungen

GFS zu Schutzmaßnahmen im Stromnetz [CF2, S. 64 – 66, 69], [U1, S. 274 f.]

**Wichtigste Inhalte:** Erdung, Neutraleiter, Außenleiter, Schutzleiter, Sicherung für Geräteschutz und Leitungsschutz, FI-Schutzschalter für Personenschutz.

☛ GFS: [Eigenschaften von Energiesparlampen: Experimente planen Beispiele.doc](#)

Hinweis: Sollen die SuS zur Untersuchung der Energiesparlampen (und dem Vergleich mit herkömmlichen Lampen) einen Lichtsensor selbst bauen, dann lässt sich diese GFS im Anschluss an die Reihenschaltung von Widerständen und die Behandlung des Fotowiderstandes in der Elektronik anschließen.

# Elektromotor

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Bildungsplan 2004

#### Kompetenzen und Inhalte für die Klassenstufe 7/8

##### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

a) Die SuS können elementare Erscheinungen in der Natur und wichtige Geräte funktional beschreiben.

Alltagsgeräte (z.B. Elektromotor)

Kompetenzen und Inhalte für die Klasse 9/10<sup>38</sup>

##### 5. Anwendungsbezug und gesellschaftliche Relevanz der Physik

b) Die SuS können erste physikalische Grundkenntnisse und Methoden für Fragen des Alltags sinnvoll einsetzen

##### 9. Strukturen und Analogien

Die SuS können kennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten.

Inhalte:

Qualitativ: Beschreibung von elektrischen Energietransporten

##### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

a) Die SuS können wichtige Geräte funktional beschreiben.

Inhalte:

Alltagsgeräte (z.B. Elektromotor)

Bemerkungen zu den Kompetenzen

5b), 10 a) Die Kenntnis des magnetischen Feldes einer stromdurchflossenen Spule ermöglicht das Verständnis des Elektromotors.

9. 10 a) In der Energieübertragungskette lernen die SuS das Funktionsprinzip des Energiewandlers elektrische Energie → mechanische Energie kennen.

## Stoffauswahl und Gewichtung

### Grundlagen – Anwendungen

Die Themen enthalten zwei wesentliche Aspekte:

**1. Kraft auf stromdurchflossenen Leiter:** Es ist der physikalisch grundlegende Sachverhalt. Zur Erklärung des Elektromotors ist er ungeeignet.

**2. Elektromotor:** Das Thema hat große technische, wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Bedeutung und wird deshalb ausdrücklich vom Bildungsplan gefordert und das bereits in Klasse 8. Es ließe sich auch bereits in Kl. 8 nach den magnetischen Wirkungen des elektrischen Feldes erarbeiten. Alle Schulbücher behandeln es aber erst in Kl. 9/10 und das mit Recht. Zum einen ist die Klasse 7/8 mit Stoff überfull. Zum anderen gehört es auch zur Beschreibung elektrischer Energietransporte und dieser Aspekt kann in Kl. 9/10 von vielen Seiten beleuchtet werden.

Der erste Aspekt wird vom Bildungsplan nicht gefordert, der zweite um so mehr. Folglich wird man nur diesen behandeln.

### Schulbuchvergleich

Alle außer Cornelsen [CF2] behandeln den Elektromotor in Klasse 9/10. Sie behandeln alle die einzelnen Ausführungen in ähnlicher Behandlungstiefe. Cornelsen [CF2] geht sogar bis zum Drehstrommotor und enthält ein schönes historisches Bild zum ersten Elektromotor von Jakobi.. Spektrum [SP2] beschreibt einen schönen Versuch zum Wirkungsgrad eines Elektromotors.

Die Lorentzkraft wird in allen Schulbüchern bis auf Cornelsen [CF2] qualitativ erarbeitet, aber nicht zur Erklärung

<sup>38</sup> Die gegenüber der Klassenstufe 7/8 neu hinzugekommenen Inhalte sind blau dargestellt, weggefallene Formulierungen sind durchgestrichen.

des Elektromotors, sondern erst im Anschluss daran als Vorbereitung zur Erklärung der Induktionserscheinung.

## Unverzichtbare Lernziele

Prinzip des Gleichstrommotors und des Wechselstrommotors kennen und mit Hilfe des Feldes einer stromdurchflossenen Spule und der Abstoßung von magnetischen Polen erklären können.

Den Elektromotor als Energiewandler verstehen und beschreiben können.

## Handlungsorientierter Unterricht

Es gibt eine Vielzahl von sehr preiswerten Möglichkeiten, die Schüler einfache Elektromodelle herstellen zu lassen. Dies ermöglicht einen sehr schönen, handlungsorientierten Zugang.

Einfacher Freihand-Elektromotor aus Batterie und Isolierdraht<sup>39</sup>

Elektromotorbausatz der Fa. Eschke (Preis unter 5 EUR!) <sup>40</sup>

Einfachstes Elektromotormodell, entspricht im Prinzip dem ersten von Faraday ersonnenen Elektromotor<sup>41</sup>. Führt allerdings durch die Erklärung zwangsläufig zur Lorentzkraft!

## Historische Aspekte

1820 Oersted: Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes.

1821: Faraday erfindet den ersten technisch noch nicht nutzbaren Elektromotor.

1835 baut der Ingenieur Hermann Jakobi aus Potsdam den ersten technisch nutzbaren Elektromotor [CF2, S.90].

Ab ca. 1880: Technische Nutzung von Elektromotoren.

## Einstiegsvarianten

Mit historischem Bezug

Erkenntnismethode: Analyse und Synthese: Zerlegen eines Gleichstrom-Motors, Analyse der einzelnen Bestandteile, Zusammensetzen (Synthese) der einzelnen Bestandteile und Verständnis des physikalischen Zusammenwirkens

Lernzirkel mit verschiedenen Spielzeugmotoren.

SuS bauen einen einfachen Elektromotor

Frage nach der Funktionsweise

## Bewertung der Unterrichtsmethode

Bei dem Thema handelt es sich ausschließlich um Anwendungen bereits bekannten Wissens. Neben dem Aspekt des Energiewandlers stehen lediglich technische Realisierungen zur Diskussion. Die Schulbücher und das Internet bieten sehr gute Informationen. Mit Verständnisschwierigkeiten ist kaum zu rechnen. Das Kapitel eignet sich hervorragend zum eigenständigen Arbeiten.

## Zeitbedarf

2 Unterrichtsstunden, lässt sich bei Zeitmangel auf 1 Stunde reduzieren!

<sup>39</sup> Internetquelle: [http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph10/heimversuche/09emotor/emotor.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph10/heimversuche/09emotor/emotor.htm)

<sup>40</sup> Internetquelle und Bezugsquelle: <http://www.eschke.com>

<sup>41</sup> Internetquelle: [http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph10/heimversuche/09einfachmotor/einfachmotor.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph10/heimversuche/09einfachmotor/einfachmotor.htm),

Bezugsquelle für Supermagnete: <http://www.supermagnete.de>

## Lehrgangsskizze

### Der Elektromotor (P)

#### Vorbereitende Hausaufgabe:

Die SuS bauen zu Hause den Freihand-Elektromotor oder den Eschke-Elektromotor.

L: In der betrachteten Energieübertragungskette zur elektrischen Energie haben wir im Haushalt als zweiten Energiewandler häufig Elektromotoren. In welchen Geräten ist er vorhanden? Wie funktioniert er?

Der Elektromotor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie und thermische Energie um. Dabei kann Entropie erzeugt werden. Energieflussdiagramm:

Frage: Wie macht er das?

**V: Test der zu Hause hergestellten Elektromotoren**

L-S: Diskussion der Schülervermutungen über die Funktionsweise. Dabei Analyse der einzelnen Bestandteile.

L: Weshalb sind unsere Motorchen für technische Anwendungen wenig geeignet?

Impuls: Wie haben es die Ingenieure geschafft, so zuverlässige leistungsstarke Motoren zu konstruieren? Das sollt ihr in den nächsten zwei Stunden selbst herausbekommen und den anderen erklären:

**TA: S. beschäftigen sich in Teams mit den einzelnen Bauformen.**

Teams:

2T-Anker-Motor / 3T-Anker-Motor mit Permanentmagnet / Wechselstrommotor / Trommelankermotor / Schrittmotor [SP2, S. 63])

AA: Erstelle bis zum Beginn der nächsten Stunde ein Plakat oder eine Folie, anhand dessen du die Funktionsweise deines Motortyps den anderen erklären kannst. Führe den Motortyp wenn möglich auch vor.

Quellen: Das Schulbuch und Internet, z.B. die Internetseite von Leifi.

Experimente: Stehen auf dem Lehrerpult bereit.

#### Geeignete Experimente und Veranschaulichungen

**V: 2T-Anker-Elektromotor.**

Elektro-Lehrmaschinensystem von Leybold: Stator mit 2 Permanentmagneten und Zweipol-Rotor.<sup>42</sup>

**Vorsicht:** Nur mit Strom begrenzenden Gleichstromquellen arbeiten.  $I_{\max} = 1,5 \text{ A}$ .

Erklärung des 2-T-Anker-Motors mit Folienmodell

Nachteil: Kein selbstständiger Start im "Totpunkt".

**V: 3T-Anker-Motor mit Permanentmagneten als Stator**

Nachteil: Nur mit Gleichstrom

**V 3T-Anker-Motor mit Spulen als Stator**

Das Statorfeld wird nicht mit Dauermagneten, sondern mit Spulen erzeugt, die in Reihe (oder parallel) mit den Spulen des Rotors geschaltet sind. Dann ändert Stator- und Rotorfeld gleichzeitig seine Richtung. Name: Allstrom - Motoren.

**V Trommelankermotor mit Spulen oder Permanentmagneten als Stator**

#### Möglichkeiten der Veranschaulichung

Simulationen aus dem Internet oder ppt – Präsentationen (Möglichkeiten für GLF )

#### Nach der Präsentation durch die Schüler:

L: Was könnten wir uns als wesentliches Funktionsprinzip eines Elektromotors notieren?

<sup>42</sup> Alternativ zum Demonstrationsexperiment können die Schüler mit einem Bausatz einen Elektromotor zusammenbauen und daran die Funktionsweise kennen lernen. Bezugsquellen zum Beispiel

Fa. Leopold Eschke ☞ <http://www.eschke.com/>

Fa. Opitec <http://www.opitec.de>



Gemeinsame Erarbeitung des Tafel- und Heftaufschriebs:

Allgemeines Funktionsprinzip

Sollte enthalten: Drehbare, stromdurchflossene Spule im Feld eines äußeren Magneten, Stromrichtung wird durch Schleifkontakte so geregelt, dass durch Kraftwirkung zwischen den „Polen“ der Spule und denen des äußeren Magnetfeldes eine Drehbewegung erzeugt wird.

HA an die Teams: Handout zu ihrem Motortyp

# Generator, Transformator – Elektromagnetische Induktion

## Fachwissenschaftliche Bemerkungen

### Lorentzkraft – Kraft auf stromdurchflossenen Leiter

Die Lorentzkraft beschreibt die Kraft auf bewegte Ladungen im magnetischen Feld. Auch wenn man sie als Ursache für die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld ansehen kann, so ist sie nicht diese Kraft: Die beiden Begriffe sind zu unterscheiden.

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Bildungsplan 2004

Kompetenzen und Inhalte für die Klasse 9/10<sup>43</sup>

#### 5. Anwendungsbezug und gesellschaftliche Relevanz der Physik

b) Die SuS können erste physikalische Grundkenntnisse und Methoden für Fragen des Alltags sinnvoll einsetzen

#### 9. Strukturen und Analogien

Die SuS können kennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten.

Inhalte:

Energiespeicher ~~Qualitativ~~: Beschreibung von elektrischen Energietransporten

#### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

a) Die SuS können wichtige Geräte funktional beschreiben.

b) Die SuS können sind immer mehr in der Lage, physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einsetzen.

Inhalte:

Energieversorgung: Kraftwerke und ihre Komponenten (z.B. Generator)

Bemerkungen zu den Kompetenzen

Die elektromagnetische Induktion ist für das Verständnis vieler Alltagsgegenstände von grundlegender Bedeutung. Nur mit ihrer Kenntnis werden elektrische Energietransporte beschreibbar und erklärbar. Trotzdem wird sie weder Bildungsplan, noch in den KMK-Standards erwähnt. Sie gehört daher nicht zu den verpflichtenden Inhalten! Im Bildungsplan wird der Generator als Komponente des Kraftwerks bei der Energieübertragung und in den KMK-Standards der Generator und Transformator als Beispiel unter dem Basiskonzept „Energie“ genannt. Es ist hierbei lediglich an eine funktionale Beschreibung, z.B. im Sinne der Energieumsetzung gedacht. Für einen gymnasialen Bildungsgang erscheint dies unbefriedigend.

## Stoffauswahl und Gewichtung

### Grundlagen – Anwendungen

Auch dieses Themen enthält mehrere wesentliche Aspekte:

**Lorentzkraft, 1. Induktionserscheinung:** Die Lorentzkraft ist der physikalisch grundlegende Sachverhalt und ermöglicht die Erklärung der Induktionserscheinung 1. Art. Außerdem ist sie wichtig für das Verständnis der Bewegung geladener Teilchen in magnetischen Feldern. Das kann man gleich in Kl. 9 für die Unterscheidung von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung durch Ablenkung im Magnetfeld gebrauchen sowie für das Verständnis der schützenden Wirkung des Erdmagnetfeldes vor kosmischer Strahlung.

**2. Induktionserscheinung:** Die Änderung des magnetischen Flusses im Inneren einer Leiterschleife hat ein elektrisches Feld im Leiter zur Folge, das die Elektronen verschiebt und so eine Spannung zwischen den Enden zur

<sup>43</sup> Die gegenüber der Klassenstufe 7/8 neu hinzugekommenen Inhalte sind blau dargestellt, weggefallene Formulierungen sind durchgestrichen.

Folge hat. Alle Erscheinungen lassen sich auf diesen Aspekt zurückführen.

**Generator, Transformator:** Wie der Elektromotor hat auch dieses Thema große technische, wirtschaftliche und gesellschaftspolitische Bedeutung und wird ausdrücklich vom Bildungsplan gefordert. Genau diese Inhalte gehören zur Beschreibung von elektrischen Energietransporten und sind unverzichtbar für die Erklärung des Transformators.

### Schulbuchvergleich

Die Lorentzkraft wird in den meisten Schulbüchern qualitativ behandelt, allerdings sehr unterschiedlich: **Dorn [D9/10]**, **Duden [DP2]** und **Spektrum [SP2]** erklären damit die Induktionserscheinung 1. Art, **Impulse [I9/10]** benutzen sie kaum zur Erklärung der Induktion, **Cornelsen [CF2]** behandelt sie gar nicht.

Alle Schulbücher behandeln beide Induktionserscheinungen (1. Art: Induktion durch Bewegung und 2. Art: Induktion durch Feldänderung) und insbesondere Induktion in einer rotierenden Spule, zu deren Erklärung **Impulse [I9/10]** und **Spektrum [SP2]** den Begriff der Anzahl der Feldlinien einführen. Alle demonstrieren den sinusförmigen Verlauf der Wechselspannung, mehrere führen auch ihren Effektivwert ein.

Die Inhalte zum Transformator sind sehr einheitlich: Aufbau, Erklärung, Spannungsgleichung, Gleichung für die Ströme, technische Anwendungen, Versorgung mit elektrischer Energie, Verbundnetz.

Mehrere Schulbücher erarbeiten hier auch den Wirkungsgrad.

### Stoffauswahl und Gewichtung

Will man den Forderungen des Bildungsplans und der KMK-Standards gerecht werden, so muss man die qualitativen physikalischen Grundkenntnisse nicht erarbeiten, sondern lediglich die Energieübertragung vom Kraftwerk in die Haushalte mit den wichtigen Komponenten Generator und Transformator in funktionaler Erklärung besprechen.

Viele Fragen und Probleme des Alltags sowie wichtige technische Geräte (Fahrraddynamo, Aufladen der elektrischen Zahnbürste, Transformatoren zum Laden von Laptops, Handys oder iPods, sinusförmige Wechselspannung, ...) könnten die Schülerinnen und Schüler verstehen, wenn man die physikalischen Grundlagen der Induktion im Unterricht erarbeitet.

Die Frage ist nur, in welchem Umfang und in welcher Tiefe die physikalischen Grundlagen behandelt werden und ob die Lorentzkraft dazu gehört. Neben den vielen Phänomenen, zu deren Erklärung sie herangezogen werden kann, liefert sie eine anschauliche Erklärung der 1. Induktionserscheinung.

Andererseits benötigt dies Zeit und vergrößert die Stofffülle. Alle Induktionserscheinungen lassen sich im Sinne des Induktionsgesetzes (Maxwell-Gleichungen) ohne Lorentzkraft beschreiben, wenn auch etwas abstrakt. Dabei wird man natürlich nicht den magnetischen Fluss einführen, sondern vereinfachend von der Änderung des magnetischen Feldes sprechen. Dieser Aspekt ist für den Alltagsbezug der wichtigere.

Empfehlung: Verzicht auf das Thema Lorentzkraft<sup>44</sup>.

Die Demonstration der sinusförmigen Wechselspannung erscheint sinnvoll, aber ohne das Wort „sinusförmig“, zumal die Schüler die Kurvenform schon aus der Akustik kennen. Bei der Anwendung der Diode als Gleichrichter wird man sie dann wieder benötigen.

Natürlich stellt sich damit die Frage, was die Wechselspannungsmesser eigentlich anzeigen. Sehr viel weiter als **Cornelsen [CF2]** sollte man nicht gehen. Für eine gründliche Erarbeitung des Effektivwerts benötigt man fast eine ganze Stunde und die Schüler haben selbst in der Oberstufe noch Probleme mit der Definition.

Die Inhalte zum Transformator kann man jedem Schulbuch entnehmen. Die Experimente besonders zu den Gleichungen sind oft nicht überzeugend, vor allem mit den schulüblichen Experimentiertransformatoren.

### Für die Erfüllung des Bildungsplans und die KMK-Standards unverzichtbare Inhalte

Energieversorgung: Übertragung elektrischer Energie: Kraftwerke und ihre Komponenten: Generator und Transformator in funktionaler Erklärung

### Für einen gymnasialen Bildungsgang unverzichtbar erscheinende Inhalte

Induktion durch Bewegung und durch Feldänderung

Induktion in rotierender Leiterschleife, zeitlicher Verlauf der zugehörigen Wechselspannung

Transformator: Aufbau, Funktionsweise und Erklärung

Spannungsgleichung für unbelasteten und Stromgleichung für belasteten idealen Transformator

<sup>44</sup> Wer auf die Lorentzkraft nicht verzichten will, kann das wie Dorn-Bader gerne tun, muss aber einen zusätzlichen Zeitbedarf von mindestens zwei U-Stunden einplanen. Sinnvoller wäre aber ihre Behandlung unter dem Aspekt „Kräfte in Feldern“ in einem anderen Zusammenhang.

Energieversorgung: Generator, Transformator, Übertragung elektrischer Energie durch Hochspannungsleitungen

## Historische Aspekte

1831: Faraday entdeckt die physikalischen Grundlagen.<sup>45</sup>

Ab 1850 technisch brauchbare Generatoren.

1882: Edison: Erstes Elektrizitätswerk in New York.

## Einstiegsvarianten

Generatoren (z.B. Fahrradgenerator) oder Transformatoren (z.B. „ältere“ Netzteile für Unterhaltungselektronik) führen zur Frage nach der Funktionsweise

Historischer Einstieg mit S-Referat zu Faraday, Edison, ...

Lernzirkel zu verschiedenen Aspekten der Induktion

## Unterrichtsmethode

Induktion ist ein schwieriges Thema, an den entsprechenden Stellen ist ein Lehrer-Schüler-Gespräch unerlässlich. Bei entsprechender Ausstattung der Sammlung lassen sich die grundlegenden Phänomene sehr gut in einem vorangestellten Lernzirkel entdecken. Der Lehrgang von **Cornelsen [CF2]** scheint besonders gut geeignet zu sein. Das Manuskript orientiert sich daran.

## Zeitbedarf

Induktion, Wechselspannung, Übungen	3 U-Stunden
Transformator, Energieübertragung, Übungen	2 U-Stunden
evtl. Wirkungsgrad	2 U-Stunden

## Lehrgangsskizze

### Der Generator (P) - Elektromagnetische Induktion (W)

Einstieg: Zum Schluss der Einheit zur elektrischen Energie betrachten wir die elektrische Quelle etwas genauer. Wir wissen schon eine ganze Menge darüber.

**PA (Think-Pair-Share):** Alles zusammentragen, was ihr bereits über die elektrische Quelle wisst.

Beiträge sammeln: Zwei Anschlüsse, Elektronenmangel, Elektronenüberschuss. Zwischen den Anschlüssen herrscht eine elektrische Spannung. Verbindet man die Anschlüsse mit einem elektrischen Gerät, treibt die Quelle Elektronen durch die Leitung. Dabei wird elektrische Energie an das Gerät abgegeben. Beispiele sind Batterien, Steckdose, ...

**Leitfrage:** Was geschieht in einem Generator, dass er zu einer elektrischen Quelle wird?

L: Jeder von uns betreibt einen solchen Generator, den Fahrrad-Generator:

**V: Zerlegter Fahrradgenerator, Eisenfeilspäne. Demonstration der Bestandteile**

Es überrascht der einfache Aufbau:

- 1) Ein rotierender Dauermagnet und
- 2) Eine Spule mit kompliziert geformtem Eisenkern.

L: Die Funktionsweise und worauf es dabei ankommt könnt ihr selbst herausbekommen:

**TA: Experimente an Stationen.** Einzelne Teams führen Experimente zur Induktion durch, notieren ihre Beobachtung und tragen die Ergebnisse den anderen vor:<sup>46</sup> Mögliche Stationen (Je nach Ausstattung)<sup>47,48</sup>

**V1: Spule und Dauermagnet:** Spule 600 Wd., Permanentmagnet, Voltmeter, Lämpchen 3,8 V/ 0,07A

AA: Bei verschiedenen Arten der Bewegung Spannung zwischen den Anschlüssen der Spule messen, dabei Lämpchen zum Leuchten bringen, Art der Bewegung variieren.

**V2: Flachspule oder Leiterschleife im homogenen magnetischen Feld (Helmholzspulenpaar oder Permanentmagnet), Voltmeter**

<sup>45</sup> Schöne schülernahe Darstellung zu Faraday in **Spektrum [SP2]** S. 71

<sup>46</sup> Die Stationen können auch mehrfach ausgelegt werden oder die SuS können die Stationen der Reihe nach abarbeiten.

<sup>47</sup> Vgl. **Cornelsen [CF2]** S. 94

<sup>48</sup> Analoge Voltmeter im mV-Bereich eignen sich besser als digitale.

AA: Beobachtung der Spannung beim Eintauchen bzw. Austreten der Spule, bei der Bewegung im homogenen Magnetfeld und beim Drehen der Spule.

V3: Betrag der Spannung: Drei Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen in Reihe, zwei gleiche Stabmagnete; Spulen in Reihe an Voltmeter

AA: Wie hängt der Betrag der induzierten Spannung von der Stärke des sich ändernden Magnetfeldes ab, davon, wie schnell sich das Magnetfeld ändert und von der Windungszahl

V4: Rotierender Hufeisenmagnet über Spule auf U-Kern

AA: Beobachtung der induzierten Spannung

V5: Aufbaugenerator der Lehrmittelfirmen: Rotierende Spule im Feld des Permanentmagneten, Amperemeter, Lämpchen

AA: Beobachtung der Amperemeteranzeige und Interpretation

V6: Spule und Elektromagnet: Elektromagnet mit Eisenkern an Netzgerät, Spule an Voltmeter

AA: Elektromagnet nähern und entfernen, Elektromagnet vor die Spule legen, Stromstärke in der Feldspule ändern, langsam, schnell. Voltmeter beobachten.

V7<sup>49</sup>: Spule und Elektromagnet: Feldspule ohne Eisenkern und Amperemeter an Funktionsgenerator, Induktionsspule an Voltmeter

AA: Frequenz variieren, Anzeigen beobachten.

Präsentation und Diskussion der Versuchsergebnisse

Ergebnis der S-Versuche und Merksatz:

Ändert sich das Magnetfeld, das eine Leiterschleife bzw. die Windungen einer Spule durchsetzt, so entsteht an den Anschlüssen der Spule eine Spannung, die sog. **Induktionsspannung**  $U_{\text{ind}}$ . Die Erscheinung heißt

**elektromagnetische Induktion.**

Die Änderung kann durch Bewegung erfolgen, indem man die Spule dem Magneten nähert oder von ihm entfernt in das Feld hineinschiebt oder sie herauszieht im Feld dreht

*Skizzen dazu!<sup>50</sup>*

Die Änderung kann ohne Bewegung erfolgen, indem man einen Elektromagneten (Feldspule) neben der Induktionsspule ein- oder ausschaltet die Stromstärke in der Feldspule ändert.

Welcher Anschluss der Spule positiv und welcher negativ ist, hängt davon ab, ob das Magnetfeld zu- oder abnimmt.

Die Induktionsspannung ist um so größer, je schneller sich das Magnetfeld ändert, je stärker die Änderung ist,

je größer die Windungszahl der Induktionsspule ist.

Die Spule wird zur elektrischen Quelle. Verbindet man die Spulenden durch einen Leiter, so fließt Strom, der

**Induktionsstrom**

Erklärung: Im Spulendraht entstehen elektrische (Feld-)Kräfte, die die Elektronen längs des Drahtes zu einem Anschluss hin verschieben.

V. Zerlegter Fahrradgenerator, Voltmeter mit Mittelstellung des Zeigers.

Vorführung des Fahrrad-Generators in Funktion und Klärung des Aufbaus. Zeigen, dass Wechselstrom erzeugt wird.

Frage: Wie sieht bei einem solchen Generator der zeitliche Verlauf der Wechselspannung aus?

V: Durch Motor angetriebene rotierende Flachspule im homogenen Magnetfeld (Helmholtzspulenpaar) an Oszilloskop<sup>51</sup>. Parallel dazu auch analoges Gleichspannungsmessgerät

V: Demonstration der sinusförmigen Wechselspannung eines Funktionsgenerators mit Oszilloskop.

Mitteilung: Wechselspannung an der Steckdose hat den gleichen zeitlichen Verlauf<sup>52</sup>

Skizze des t-U-Diagramms der Wechselspannung.<sup>53</sup>

<sup>49</sup> Vgl. Dorn [D9/10] S. 48 V2

<sup>50</sup> Vgl. Cornelsen [CF2] S. 95, 96

<sup>51</sup> Vgl. Spektrum [SP2] S. 68

<sup>52</sup> Direkte Messung der Netzspannung nur mit geeignetem Hochspannungstastkopf!

<sup>53</sup> Vgl. Cornelsen [CF2] S. 96

**Frage:** Was wird ein Voltmeter anzeigen, wenn man an eine sich so schnell ändernde Wechselspannung an das Voltmeter anschließt?

**V:** An den letzten Versuch Voltmeter anschließen.

Messung der Gleichspannung: Kein Zeigerausschlag. Umschalten auf Wechselspannung: Zeigerausschlag. Vergleich mit dem Scheitelwert der Wechselspannung.

**Mitteilung:** Der zugehörige Wechselstrom bewirkt in Lämpchen, Widerständen das Gleiche wie Gleichstrom: Licht bzw. Wärme.

Messgeräte für Wechselspannung zeigen den Wert einer Gleichspannung an, die dasselbe bewirkt wie die Wechselspannung. Für Wechselstrom gilt entsprechendes.

**V:** Falls Zeit, sehr empfehlenswert: Zwei gleiche Lämpchen, eines an Wechselspannungsquelle und Wechselspannungsmessgerät, das andere an Gleichspannungsquelle und Gleichspannungsmessgerät.

Bei gleicher Helligkeit zeigen beide den gleichen Wert an. Mit angeschlossenem Oszilloskop kann die Wechselspannung und Gleichspannung gleichzeitig angezeigt werden.

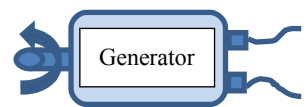
**Mitteilung:** Die Elektrizitätswerke verbinden einen Netzanschluss (Neutralleiter) mit der Erde. Er hat stets das Potenzial 0 V. Das Potenzial des anderen Anschlusses (Außenleiter) variiert zwischen den Scheitelwerten.

Übungen, Vgl. Cornelsen [CF2] S. 99

**Zusammenfassung:** Grundprinzip des Generators

#### Aufbau:

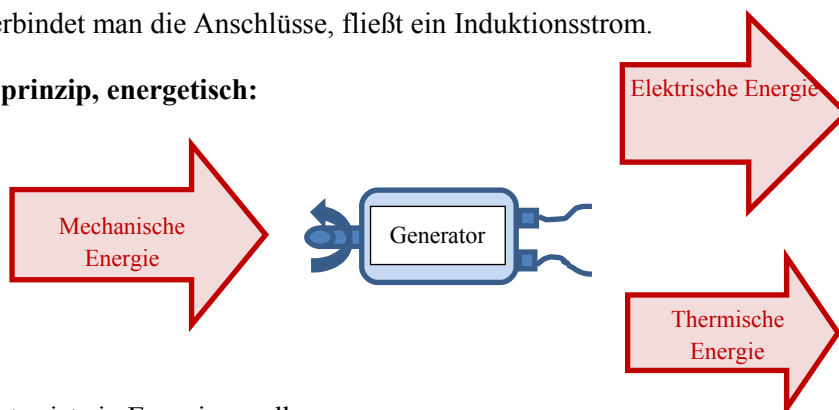
Eine Spule mit Eisenkern ist in einem äußeren magnetischen Feld drehbar gelagert. Die Spule wird über die Drehachse gedreht. Die Anschlüsse der Spule sind herausgeführt.



#### Funktionsprinzip, elektrisch/mechanisch:

- In der rotierenden Spule ändert sich der magnetische Fluss.
- Nach dem Induktionsgesetz wird an Ihren Enden eine Spannung induziert.
- Verbindet man die Anschlüsse, fließt ein Induktionsstrom.

#### Funktionsprinzip, energetisch:



Der Generator ist ein Energiewandler.

**Anwendung:** Elektrische Zahnbürste: Als Hausversuch, Demo-Versuch, GFS, ...

V: Elektrische Zahnbürste, Spule, Lämpchen<sup>54</sup>

PA, HA: Beschreibe und erkläre den Versuch.

## Der Transformator (P)

**V:** Demonstration verschiedener Netzteile, Bild von Hochspannungstransformatoren.

**Leitfrage:** Wie erzeugen Transformatoren kleinere oder größere Spannungen?

**Mitteilung:** Beschreibung mit Skizze.

- Zwei Spulen: Primärspule (Feldspule) und Sekundärspule (Induktionsspule)

<sup>54</sup>Vgl. Impulse [I9/10] S. 44

- Spulen auf geschlossenem Eisenkern
- Keine leitende Verbindung zwischen Primär- und Sekundärspule
- Skizze **Dorn [D9/10]** S. 50, B1

### Experimentelle Untersuchung:<sup>55</sup>

L: Gegeben sind Eisenkern mit Joch, Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen, Multimeter, Netzgeräte. Welche Experimente sollen damit durchgeführt werden?

**V<sup>56</sup>:** Gleiche Windungszahlen, verschiedene Windungszahlen, auch bei Kern ohne Joch!, auch mit nur einer, zwei Windungen mittels Experimentierkabel.

### Ergebnisse:

Mit dem Transformator kann man Wechselspannungen verändern.

Funktionsweise: Der Wechselstrom in der Primärspule erzeugt im Eisenkern ein sich magnetisches Feld, das auch die Sekundärspule durchsetzt. Da sich das Magnetfeld ständig ändert, wird in der Sekundärspule eine Wechselspannung induziert.

Bei einem idealen unbelasteten Transformator gilt für die Spannungen  $U_2 : U_1 = n_2 : n_1$

(Ideal: Das gesamte von der Primärspule erzeugte magnetische Wechselfeld durchsetzt auch die Sekundärspule.

Es wird keine Energie in den Leitungen und im Eisenkern entwertet)

Beim belasteten idealen Transformator richtet sich die Sekundärstromstärke nach  $U_2$  und dem ohmschen Widerstand im Sekundärstromkreis:  $I_2 = U_2 / R$

Für die Stromstärke im Primärstromkreis folgt aus  $P_1 = P_2$  die Gleichung  $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$

☛ [Praktikum\\_Transformator.docx](#)

### Zusammenfassung: Grundprinzip des Transformators

#### **Aufbau**

Zwei Spulen sind auf einen Eisenkern gewickelt. Die Windungen sind gegeneinander und gegen den Eisenkern elektrisch isoliert. Der Eisenkern besteht aus gegeneinander isolierten Eisenblechen.

#### **Funktionsprinzip, elektrisch**

An der Primärspule liegt eine Wechselspannung  $U_1$  an. Durch den sich ständig ändernden Stromfluss in der Primärspule ändert sich die Stärke des magnetischen Feldes in der Spule.

Diese Magnetfeldänderung wird über den geschlossenen

Eisenkern auf die Sekundärspule übertragen. Das

magnetische Wechselfeld durchsetzt auch die Sekundärspule. In der Sekundärspule wird eine Wechselspannung induziert.

#### Unbelasteter Transformator (Die Anschlüsse der Sekundärspule sind nicht miteinander leitend verbunden.):

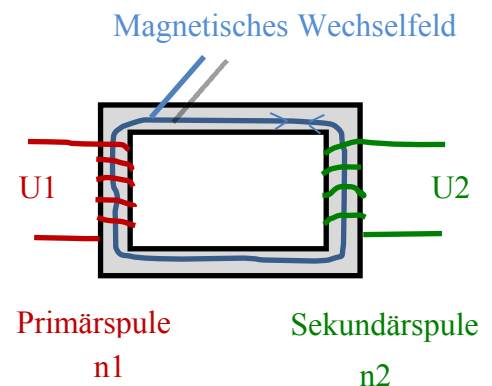
Für die Spannungen gilt:  $U_2 : U_1 = n_2 : n_1$ .

#### Belasteter Transformator (Die Anschlüsse der Sekundärspule sind über einen Widerstand R leitend verbunden.):

- Beim belasteten idealen Transformator richtet sich die Sekundärstromstärke nach  $U_2$  und dem ohmschen Widerstand im Sekundärstromkreis:  $I_2 = U_2 / R$

Für die Stromstärke im Primärstromkreis folgt aus  $P_1 = P_2$  die Gleichung  $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$

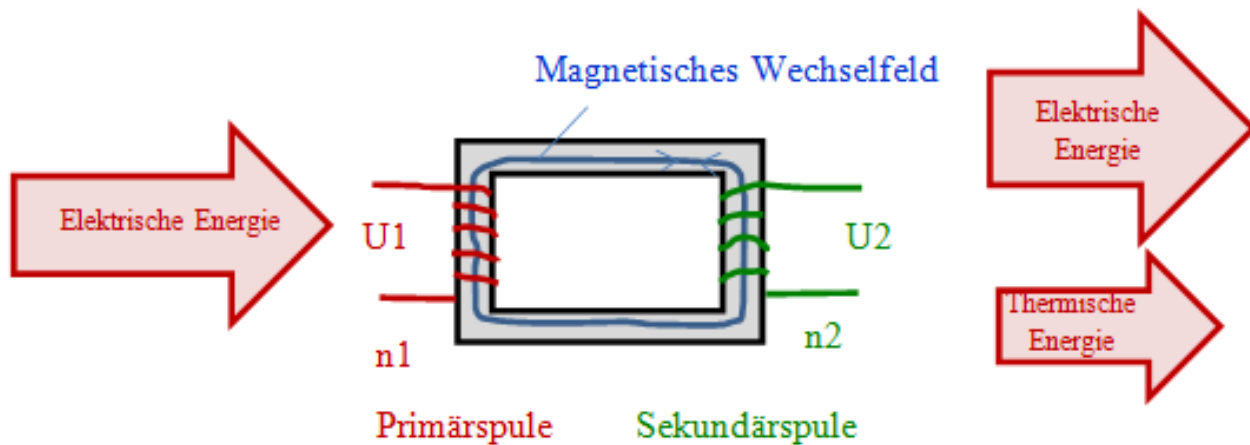
### Funktionsprinzip, energetisch:



<sup>55</sup> Je nach Ausstattung und Zeit alle Varianten von S-Versuchen bis Demonstrationsversuch oder Mitteilung und experimentelle Überprüfung möglich!

<sup>56</sup> Vgl. **Dorn [D9/10]** S. 50 V1 – V4





Elektrische Energie wird durch das magnetische Wechselfeld durch den Transformator transportiert.

#### Anwendungen:

V<sup>57</sup>: Hochspannungstransformator (Lebensgefahr!)

V<sup>58</sup>: Hochstromtransformator

Energieübertragung durch Hochspannungsleitungen

➤ [Arbeitsblatt zur Energieübertragung: Elektrische\\_Energieuebertragung.doc](#)

V<sup>59</sup>: Mit und ohne Transformator mit Rechnung

S-Referate zu Spannungen bei der Energieübertragung (Vgl. Cornelsen [CF2] S. 104 Bild 2) und zum europäischen Energieverbund (in jedem Schulbuch)

#### Übungen

#### Falls Zeit

S-Experimente in Teams zum Wirkungsgrad (Vgl. Impulse [I9/10] S. 48 – 50)

*Alternatives Vorgehen, wenn die Induktion nicht behandelt werden soll:*

## **Elektrische Energieübertragung – Generator und Transformator (P)**

### **Kraftwerk und seine Komponenten**

Möglichkeit für Lernzirkel, Planarbeit, Gruppenpuzzle: Vergleich verschiedener Kraftwerke (Wasserkraftwerk, Kohlekraftwerk, Windkraftwerk, Gezeitenkraftwerk, ...), Herausarbeitung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden  
Zeichnen von Energieflussdiagrammen

**1. Zentrale Gemeinsamkeit:** Generator als Energiewandler: Mechanische Energie wird in elektrische Energie umgewandelt

V: Fahrraddynamo: Energieumwandlung demonstrieren und zeigen, dass er Wechselspannung liefert

V: Zerlegter Fahrradgenerator, Eisenfeilspäne. Demonstration der Bestandteile

Es überrascht der einfache Aufbau:

<sup>57</sup> Vgl. Dorn [D9/10] S. 51 B2

<sup>58</sup> Vgl. Dorn [D9/10] S. 51 B3

<sup>59</sup> Vgl. Cornelsen [CF2] S. 101 Bild 6, 7

- 1) Ein rotierender Dauermagnet und
- 2) Eine Spule mit kompliziert geformtem Eisenkern.

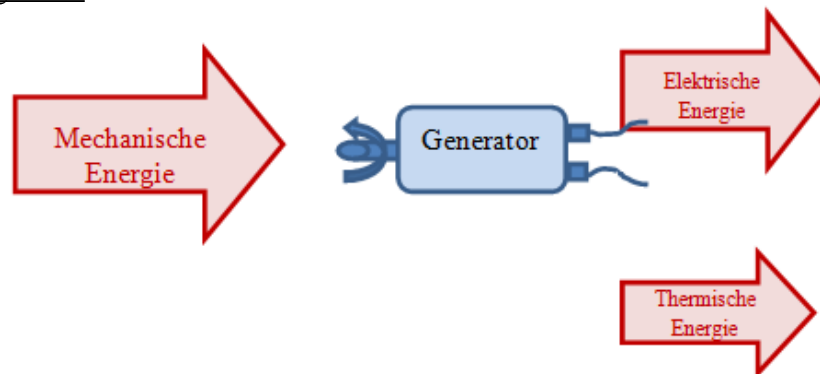
Aufbau des Generators: Eine Spule mit Eisenkern ist in einem äußeren magnetischen Feld drehbar gelagert. Die Spule wird über die Drehachse gedreht. Die Anschlüsse der Spule sind herausgeführt.

Einfaches Funktionsprinzip, mechanisch/elektrisch:

- Eine Spule und ein Magnet bewegen sich relativ zueinander.
- An den Enden der Spule entsteht eine Potenzialdifferenz (Spannung)
- Verbindet man die Enden der Spule, so fließt ein elektrischer Strom.

Erkenntnis: Durch die Drehung des Dauermagneten in der Spule wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt. (Näheres Verständnis: Verweis auf Kursstufe)

Funktionsprinzip, energetisch:



Der Generator ist ein Energiewandler.

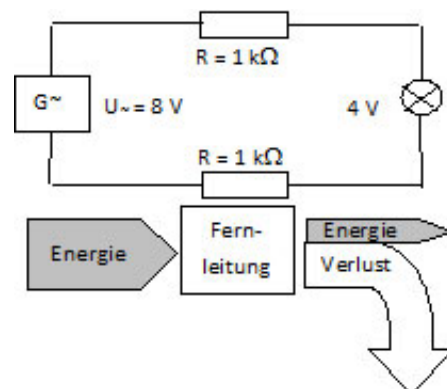
**2. Zentrale Gemeinsamkeit:** Die Energieübertragung vom Kraftwerk zu den Haushalten erfolgt mit Wechselspannung.

Zu untersuchende Frage: Warum wird elektrische Energie mit Wechselspannung über Hochspannungsleitungen von den Kraftwerken zu den Haushalten übertragen?

**V:** Übertragung elektrischer Energie mit Wechselspannung im Modell

Eine Wechselspannung von  $U_{\sim} = 8 \text{ V}$  („Kraftwerk“) soll über eine lange „Fernleitung“ übertragen und damit ein Lämpchen ( $4 \text{ V} / 0,07 \text{ A}$ ) („Haushalt“) zum Leuchten gebracht werden. Die Kabel werden künstlich verlängert, indem in der Hin- und Rückleitung jeweils ein großer Widerstand ( $R = 1 \text{ k}\Omega$ ) eingebaut wird.

Versuchsaufbau:



Beobachtung: Das Lämpchen leuchtet nicht.

Erklärung: Die lange Leitung mit der Länge  $l$  hat einen sehr großen Widerstand  $R$ . Es gilt:  $R \sim l$ . Dadurch wird der Strom so klein, dass er das Lämpchen nicht zum Leuchten bringen kann.

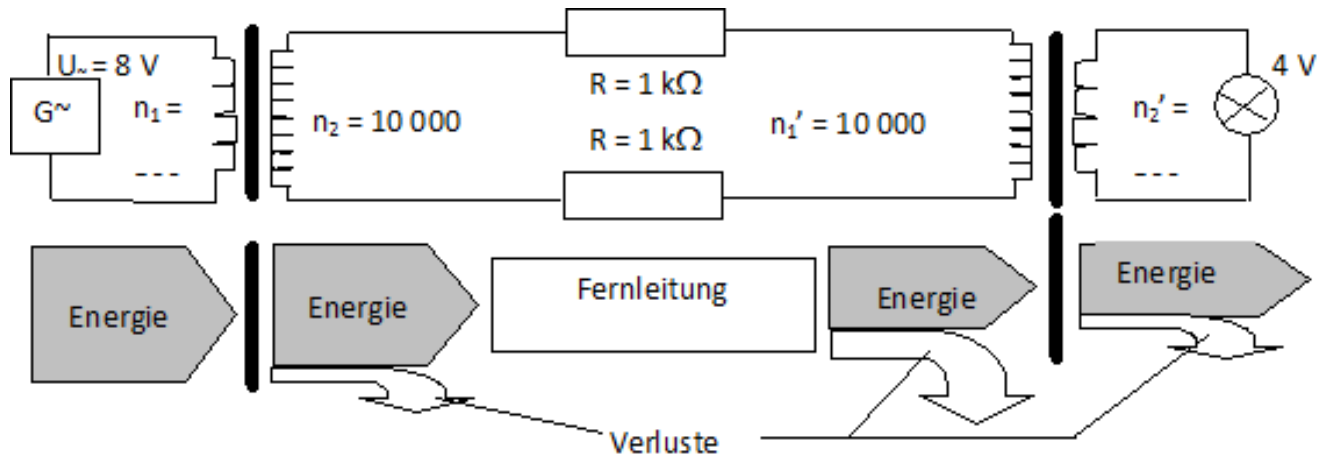
Ausweg: Die angelegte Wechselspannung müsste viel größer sein.

Problem: Der dabei fließende hohe Strom würde jedoch die Leitungen so stark erwärmen, dass der größte Teil der zu übertragenen Energie entwertet würde. Wie kann man das verhindern?

## V: Übertragung elektrischer Energie mit Transformatoren

Ziel: Übertragung elektrischer Energie mit möglichst geringen Verlusten

Idee: Durch die Verwendung von Transformatoren kann die Stromstärke in den Leitungen verringert werden, so dass möglichst wenig Energie entwertet wird.



Beobachtung: Das Lämpchen leuchtet. Wie ist das möglich?

Funktionale Untersuchung des Transformators:

Experimentelle Untersuchung:<sup>60</sup>

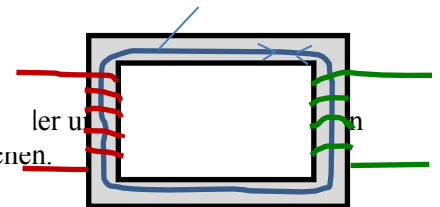
L: Gegeben sind Eisenkern mit Joch, Spulen mit unterschiedlichen Windungszahlen, Multimeter, Netzgeräte. Welche Experimente sollen damit durchgeführt werden?

V<sup>61</sup>: Gleiche Windungszahlen, verschiedene Windungszahlen, auch bei Kern ohne Joch!, auch mit nur einer, zwei Windungen mittels Experimentierkabel.

V: Zeigen, dass es nur mit Wechselspannung funktioniert

Aufbau:

Zwei Spulen sind auf einen Eisenkern gewickelt. Die Windungen sind gegeneinander elektrisch isoliert. Der Eisenkern besteht aus gegeneinander isolierten Eisenblechen.



Einfaches Funktionsprinzip, elektrisch:

An der Primärspule liegt eine Wechselspannung  $U_1$  an. Durch den sich ständig ändernden Stromfluss in der Primärspule ändert sich die Stärke des magnetischen Feldes in der Spule. Diese Magnetfeldänderung wird über den geschlossenen Eisenkern auf die Sekundärspule übertragen. Dies führt zu einer Wechselspannung an den Enden der Sekundärspule.

Unbelasteter Transformator (Die Anschlüsse der Sekundärspule sind nicht miteinander leitend verbunden.):

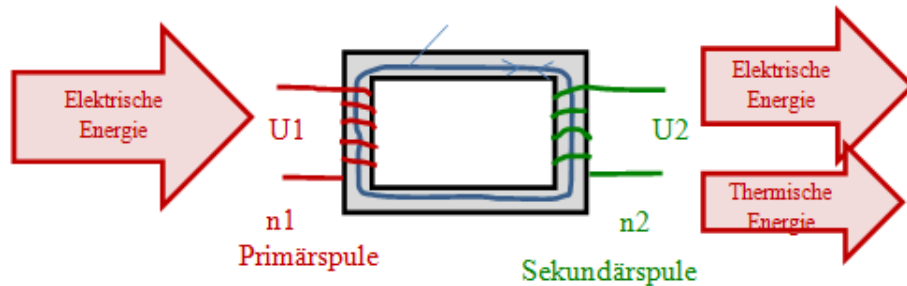
Für die Spannungen gilt:  $U_2 : U_1 = n_2 : n_1$ .

Belasteter Transformator (Die Anschlüsse der Sekundärspule sind über einen Widerstand R leitend verbunden.):

- Beim belasteten idealen Transformator richtet sich die Sekundärstromstärke nach  $U_2$  und dem Ohm'schen Widerstand im Sekundärstromkreis:  $I_2 = U_2 / R$   
Für die Stromstärke im Primärstromkreis folgt aus  $P_1 = P_2$  die Gleichung  $I_1 : I_2 = n_2 : n_1$

<sup>60</sup> Je nach Ausstattung und Zeit alle Varianten von S-Versuchen bis Demonstrationsversuch oder Mitteilung und experimentelle Überprüfung möglich!

<sup>61</sup> Vgl. Dorn [D9/10] S. 50 V1 – V4

Funktionsprinzip, energetisch:

Elektrische Energie wird durch das magnetische Wechselfeld durch den Transformator transportiert.

Ergebnis:

Mit dem Transformator kann man Wechselspannungen verändern.

Bei einem idealen unbelasteten Transformator gilt für die Spannungen  $U_2 : U_1 = n_2 : n_1$

Erklärung des obigen Versuches: Die Spannung  $U_{\sim} = 8 \text{ V}$  wird durch den ersten Trafo auf das 20fache erhöht ( $n_2/n_1 = 20$ ), also auf  $U_{\sim} = 160 \text{ V}$ . Dabei sinkt die Stromstärke in der „Fernleitung“ ungefähr auf den 20sten Teil. Dabei wird der Verlust auf den 400sten Teil verringert, da gilt: Verlustleistung  $P_L \sim I^2$ . Die Energieentwertung in den Fernleitungen wird stark reduziert. Der zweite Trafo transformiert die hohe Spannung  $U_{\sim} = 160 \text{ V}$  auf  $U_{\sim} = 8 \text{ V}$  herunter ( $n_2'/n_1' = 1/20$ ). Dadurch steigt der Strom wieder ungefähr auf das 20fache. Nun reicht der Strom aus, um das Lämpchen zum Leuchten zu bringen.

Zusammenfassendes Ergebnis und Mitteilung: In den Kraftwerken wird durch Generatoren mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Dabei wird eine Wechselspannung von ca. 21 kV erzeugt. Diese wird mit Transformatoren auf ca. 380 kV transformiert und so über Hochspannungsleitungen viele hunderte Kilometer übertragen. Dabei fließt in den Leitungen ein sehr geringer Strom, die Energieverluste sind klein. Für die Haushalte wird die Spannung in Umspannwerken durch Transformatoren wieder auf 230 V transformiert. Dies funktioniert nur mit Wechselspannung.

# Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Bildungsplan 2004

Kompetenzen und Inhalte für die Klasse 9/10<sup>62</sup>

#### 4. Spezifisches Methodenrepertoire der Physik

Die SuS können die Methoden der Deduktion und Induktion an einfachen im Unterricht behandelten Beispielen erläutern.

#### 8. Grundlegende physikalische Größen

b) Die SuS können mit weiteren physikalischen Größen umgehen:

Inhalte: elektrische Stromstärke, elektrisches Potenzial, elektrische Spannung, ~~quantitativ~~ elektrische Ladung (Ladungserhaltung)

#### 9. Strukturen und Analogien

Die SuS ~~können~~ erkennen weitere Strukturen und Analogien und können mit den bisher schon bekannten komplexere Fragestellungen bearbeiten:

Inhalte: Strom, Antrieb (Ursache) und Widerstand

#### Bemerkungen zu den Kompetenzen:

Der Bildungsplan 2004 sieht die Behandlung der Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen nicht explizit vor. In den Konkretisierungen durch die Mustercurricula wird jedoch ausdrücklich auf folgende Inhalte verwiesen:

- Einfache Reihen- und Parallelschaltungen
- Hierbei auch Schaltung von Messgeräten zur Messung von Spannung und Stromstärke
- Maschenregel bzw. Bilanzierung mit elektrischem Potenzial
- Ladungserhaltung (auch Knotenregel)

Die Benennung von Knoten- und Maschenregel als Kirchhoff'sche Gesetze ist nicht verlangt.

#### Induktion und Deduktion

Bei der Erarbeitung der Kirchhoff'schen Gesetze (Knotenregel als 1. Kirchhoff'sches Gesetz und Maschenregel als 2. Kirchhoff'sches Gesetz) bietet sich womöglich eine erste und zudem eine sehr gute Gelegenheit für Deduktion. Da den SuS ein solches Vorgehen bis dahin unbekannt war, muss hier sehr sorgfältig und mit Feingefühl vorgegangen werden. Am besten zunächst an einem konkreten Beispiel und erst dann allgemein vorgehen. Eine Gegenüberstellung der induktiven und der deduktiven Methode ist notwendig.

## Stoffanordnung und Gewichtung

### Bedeutung

Die Kirchhoff'schen Gesetze sind eine wichtige Grundlage der Elektrizitätslehre. Der Ersatzwiderstand ist hier besonders wichtig. Vor allem auch wegen der Ersatzmethode, die möglichst oft eingeübt werden sollte.

### Reihenfolge

Es ist sehr empfehlenswert, die Parallelschaltung vor der Reihenschaltung von Widerständen zu behandeln.

Alle Elektrogeräte im Haushalt sind parallel geschaltet. Das erleichtert einen motivierenden Einstieg und stellt den Bezug zur technischen Umwelt jedes Schülers her.

<sup>62</sup> Die gegenüber der Klassenstufe 7/8 neu hinzugekommenen Inhalte sind blau dargestellt, weggefallene Formulierungen sind durchgestrichen.

Stromverzweigung ist mit dem Elektronenmodell leichter zu verstehen als Spannungsaufteilung bei der Reihenschaltung. Letzteres erfordert eine Erweiterung des ohnehin schwierigen Spannungsbegriffs und ist im Modell viel schwerer zu erfassen und zu erklären.

Zur Einführung des Ersatzwiderstandes eignet sich die Parallelschaltung besser als die Reihenschaltung, da der Wert des Ersatzwiderstandes von den Schülern nicht erraten werden kann. Das fördert eine klare Begriffsbildung.

## Methodenkompetenz

In dieser Lehrplaneinheit sind Schülerversuche besonders wichtig.

Durch das wiederholte Messen der elektrischen Stromstärke und Spannung lernt der Schüler diese für ihn so ähnlichen Größen voneinander zu unterscheiden.

Der Schüler lernt die Vorgänge der Spannungs- und Stromstärkemessung kennen: Anschluss der Multimeter, Messbereichswahl, Ablesen. Analogmultimeter sind hier Digitalmultimetern vorzuziehen. Es sollten auch Genauigkeitsklassen und relativen Fehler der Messgeräte besprochen werden.

Zur besseren Unterscheidung der Stromstärke von der Spannung kann es methodisch sinnvoll sein, die Spannung mit einem Digitalmultimeter und die Stromstärke mit einem Analogmessgerät zu messen.

Durch wiederholten Umgang mit dem Experimentiergerät erlangt der Schüler ein hohes Maß an Methodenkompetenz, die er beim Thema Halbleiter und dann im Kursstufenpraktikum vielfach nutzen kann.

## Durchführung der Schülerversuche

Stehen genügend Geräte zur Verfügung, ist es methodisch sehr wertvoll, wie in der Optik Schülerexperimente in den Unterricht einzugliedern und die entsprechenden Demonstrationsexperimente zu streichen.

Um die zunehmende Methodenkompetenz der Schüler auch nutzen zu können, sollten die Schüler wiederholt mit dem gleichen Experimentiergerät umgehen, das sie dann auch später im Oberstufenpraktikum verwenden. Entsprechende Experimentierkästen werden von nahezu allen Lehrmittelfirmen angeboten.

Man kann die Gesetze der Parallel- und Reihenschaltung zunächst deduktiv erarbeiten und sie dann in Schülerversuchen überprüfen. Reizvoller und motivierender ist es aber, die Gesetzmäßigkeiten durch die Schüler induktiv entdecken zu lassen und sie dann deduktiv herzuleiten. Ein solcher Vorschlag ist in das Manuskript eingearbeitet.

## Ersatzwiderstand

Die Ersatzmethode wird in Physik und Technik sehr häufig benutzt. Dabei wird ein kompliziertes System in Gedanken durch ein einfacheres, aber gleichwertiges System ersetzt. Es müssen Sinn, Zweck und Handhabung der Methode mit den Schülern gründlich erörtert werden. Die nächste Anwendung erfolgt bei der Reihenschaltung von Widerständen, dann beim Kräfteparallelogramm und bei zusammengesetzten Bewegungen und in der Oberstufe evtl. bei der Ersatzkapazität parallel und in Reihe geschalteter Kondensatoren und Ersatzschaltbildern allgemein.

## Reihenschaltung von Widerständen

### Methode

Die hier zu erörternden Gesetzmäßigkeiten sind denen der Parallelschaltung sehr ähnlich und trotzdem im Prinzip grundverschieden. Dadurch ist die Verwechslungsgefahr außerordentlich groß. Folgende Methode hat sich sehr bewährt: Man gibt ein Arbeitsblatt heraus, bei dem auf einer Seite die Gesetze der Parallelschaltung aufgelistet sind und erarbeitet dann streng in strenger Analogie die entsprechenden Gesetze zur Reihenschaltung. Der zugehörige Versuch [DMr S. 244 B2] ist gut dimensioniert. Wurde die Parallelschaltung in Schülerversuchen untersucht, wird man dies nun bei der Reihenschaltung ebenso tun.

Es ist herauszustellen, dass man viele Gesetze der Reihenschaltung aus denen der Parallelschaltung erhält, wenn man  $U$  mit  $I$  vertauscht.

### Denkschwierigkeiten

Zur Bekämpfung der *Stromverbrauchsvorstellung* sollte auf jeden Fall die Stromstärke an jeder Stelle des Stromkreises nachgemessen werden. Die Hauptschwierigkeit liegt darin, dass die Schüler nicht einsehen, dass die Stromstärke keine lokale Größe ist, sondern von allen Geräten im Stromkreis zusammen bestimmt wird.

Typische Schülerfrage: Woher wissen die Elektronen, die in den ersten Widerstand hineinlaufen, was weiter hinten im Stromkreis noch kommt, wie schnell sie also laufen müssen?

Antwort: Sie „probieren“ es in unmessbar kurzer Zeit aus. Beim Einschalten laufen die beweglichen Elektronen überall praktisch gleichzeitig los. Dabei bilden sich hauptsächlich auf der Oberfläche der Leiter eventuell auch auf Doppelschichten im Leiterinneren Elektronenansammlungen, die sich gerade so einstellen, dass durch alle Widerstände gleich viele Elektronen pro Sekunde strömen. Abweichungen von dieser stationären Elektronenverteilung werden automatisch rückgängig gemacht.<sup>63</sup> Das Fahrradkettenmodell hilft hier.

Die Spannung bzw. Potenzialdifferenz wurde bisher als charakteristische Eigenschaft der Quelle betrachtet und zwischen den Anschlüssen der Quelle gemessen. Hat man den Potenzialbegriff in einfachen elektrischen Schaltungen ausführlich behandelt und Potenzialwerte in einfachen Schaltungen an speziellen Punkten angegeben (vgl. [DB1, S. 201, Aufgaben und Beispiell]), sind u.U. bereits Potenzialdifferenzen zwischen den Anschlüssen eines elektrischen Gerätes thematisiert worden. In diesem Fall ist dann der Begriff der Spannung an den Anschlüssen eines elektrischen Gerätes nicht ganz neu, der Begriff der Teilspannung ist jedoch zunächst unbekannt. Man zeigt experimentell, dass man Teilspannungen an jedem, also auch am mittleren Widerstand messen kann.

Um den Begriff der Teilspannung mit dem energetischen Aspekt der Spannung zu verknüpfen, ist folgendes zu beachten: Die Teilspannung gibt nicht an, wie viel Joule je Coulomb der Widerstand an den Stromkreis liefert, sondern wie viel Joule je Coulomb die Quelle in dem betreffenden "Teilwiderstand" (in Wärme) umsetzt. Addiert man all diese Energiebeträge auf, so muss sich die gesamte von der Quelle an den Stromkreis gelieferte Energie je Coulomb ergeben (Energieerhaltungssatz), d.h. es muss gelten:  $U_{\text{Quelle}} = U_1 + \dots + U_n$ , was das Experiment bestätigt.

## Potenzial, Potenziometerschaltung

Das Potenzial ist bereits in Klasse 8 eingeführt worden. Hier kann man nun ein tieferes Verständnis erreichen: Nach der Erörterung der Teilspannungen kann man das Potenzial erneut als besondere Form der Spannungsangabe wiederholen, bei der die Spannung stets gegen einen bestimmten Punkt gemessen und angegeben wird. Man kann somit allen Punkten eines auch komplizierten Stromkreises "Spannungswerte" zuordnen. Aus diesen Potenzialwerten lassen sich dann alle Teilspannungen berechnen.

Hier kann den energetischen Aspekt qualitativ hervorheben.

In der Oberstufe kann man ihn dann quantitativ fassen.

Die Potenziometerschaltung ist eine unerlässliche Anwendung,

Voraussetzung für viele Praktikumsversuche (z.B. CASSY-Praktikum in der Kursstufe),

das Bauteil, das sich als Drehwiderstand in Spannungsteilerschaltung (Potenziometer) hinter fast allen "Knöpfen" von Elektrogeräten versteckt.

## Vorwiderstand

Vorwiderstände sind ein universelles Hilfsmittel zur Einstellung erwünschter I- und U-Werte in komplexen elektrischen Schaltungen. Sie begrenzen den Strom durch eine Halbleiterdiode, den Basisstrom bei einem Transistor. Auch die Widerstände in der Emitter- oder Kollektorleitung sind Vorwiderstände mit der speziellen Aufgabe, das Nutzsignal zu liefern. Dasselbe gilt für den Arbeitswiderstand beim Geiger-Müller-Zählrohr. Vorwiderstände in Drehspul-Spannungsmessgeräten schützen das Messwerk. Die Vorwiderstandsschaltung ist also ein unverzichtbares Thema.

Stets mit Niederspannung arbeiten. Mit Experimentierkabeln an der Steckdose zu arbeiten ist verboten. Passiert etwas, so handelt es sich um grobe Fahrlässigkeit, die den Versicherungsschutz ausschließt.

Spannungsverhältnisse am geöffneten Schalter sollten besprochen werden, da ihre Kenntnis für Heimwerker lebenswichtig ist. Viele glauben, ein geöffneter Schalter sei berührungssicher. Außerdem ist das Thema grundlegend für das Verständnis logischer Schaltungen.

<sup>63</sup> Lit.: Walz, Zur Physik elektr. Stromkreise, NiU 11, 1982



## Lehrgangsskizze

### Parallel- und Reihenschaltung von Widerständen (P)

#### Variante 1: Hinführung zum Thema und Erarbeitung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten im Schülerexperiment.

V: Schülerexperiment [SVParallelschaltung](#)

Auswerten der Schülerexperimente. Falls nötig: Experimentelle Überprüfung und Klärung im Demonstrationsexperiment. Klärung der Ursache für Fehlvorstellungen (vergleiche weiter unten).

**Ergebnis:** Quellen wie das Netz oder ein Akku liefern nicht, wie der Fluss in der Natur, eine konstante Stromstärke. Sie halten vielmehr ihre Anschlussspannung konstant. Diese liegt an den Anschlüssen jedes Geräts. Vormessen!

Durch jedes Gerät fließt deshalb ein Strom, dessen Stärke sich aus  $I_i = \frac{U_Q}{R_i}$  berechnen lässt. Die Quelle muss die Elektronen für alle Zweige liefern.

Es gilt das Prinzip der **Ladungserhaltung**: Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.

Für den Gesamtstrom gilt somit:  $I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ . Knotenregel (1. Kirchhoff'sches Gesetz)

#### Variante 2: Hinführung zum Thema im fragend-entwickelnden Unterricht mit Demonstrationsexperimenten.

**Frage:** Wie kann man mehrere Lämpchen an eine Quelle anschließen?

**V:** Schüler schließen auf beide Arten zwei Lämpchen (3,8 V/0,07 A) an zwei in Reihe geschaltete 2 V-Akkus.

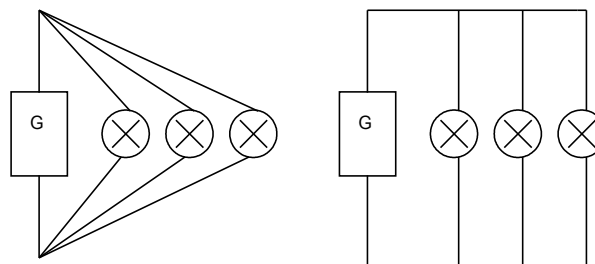
**Frage:** Welche Schaltung ist wohl im Haushalt realisiert? Begründung?

**S:** Parallelschaltung, da erstens die Lämpchen heller leuchten und da sich jedes Lämpchen einzeln ausschalten lässt.

**V:** Demonstration einer geöffneten Dreifachsteckdose und Bild **DMr** S. 242 zur Bestätigung.

**V:** Im Versuch wird gezeigt, dass folgende zwei Schaltungen die gleiche Wirkung zeigen

(Dabei gründliche Diskussion des Elektronenflusses):



Gründliche Erörterung der Knotenregel (1. Kirchhoff'sches Gesetz): Für ein sicheres Verständnis der Parallelschaltung ist folgende Problematisierung von großer und grundlegender Bedeutung:

**Frage:** Wie ändern sich die Stromstärken beim Parallelschalten eines zweiten Zweiges?

**V:** Dazu **[DMr S. 242 V1]** bzw. **[DB1, S. 212 V1]** ( $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 0,5 \text{ k}\Omega$ ,  $U_Q = 10 \text{ V}$ )

#### **Bemerkungen zum Experiment:**

- Der Spannungsabfall am Innenwiderstand der Strommesser kann die Messung beträchtlich stören. Er hängt vom Messbereich und vom Zeigerausschlag ab. Bei den älteren, grauen Demonstrationsmultimetern von Leybold kann er bis zu 0,5 V betragen. Bei den neuen (orange Nr. 53191-93 und 531911 und 531915) ebenfalls! Beim Übergang vom 0,3 A zum 1 A Messbereich bei den älteren orangenen Messgeräten und beim Übergang von 0,3 mA zu 1 mA bei den neueren von 0,12 V auf 0,5 V maximal. Es muss also  $U_Q \gg 0,5 \text{ V}$  gewählt werden. Dorn:  $U_Q = 100 \text{ V}$  ist gut geeignet. Als Quelle kommt nur ein stabilisiertes Netzgerät in Frage: NEVA 5225 (0 V-250 V,  $I_{\text{max}} = 100 \text{ mA}$ ), Leybold 52235 (0 V - 300 V, 50 mA), PHYWE 11725.93 (0 V - 250 V, 100 mA).

- Die Widerstände müssen im  $\text{k}\Omega$  - Bereich gewählt werden, damit die Stromstärken unter den Maximalwerten der Quelle bleiben. Angaben von Dorn sind gut geeignet. Im kleinsten Widerstand  $5 \text{ k}\Omega$  ist die Wärmeleistung  $U^2/R = 2 \text{ W}$  am größten. Passende Widerstände sind schwer zu beschaffen, da sie in den üblichen Normreihen nicht enthalten sind. Gut geeignet: MR-Widerstände der Fa. VITROHM: Toleranz  $< 10 \%$ , 10 W).

- Vertikaler Aufbau mit verschiedenen Farben für die einzelnen Stromkreise.

**V:**  $R_2$  wird noch nicht angeschlossen.

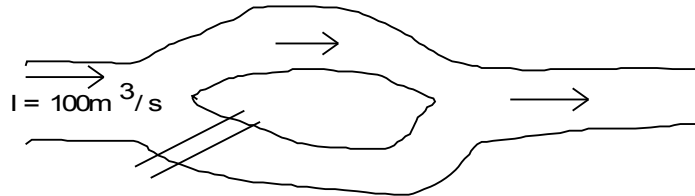
Reaktivierung und Einübung des Vorwissens: Diskussion der Potenzialverhältnisse. Man lässt die Schüler aus  $U_Q$  und  $R_1$  die Werte für  $I_{\text{ges}}$  und  $I_1$  vorausberechnen. Die Werte werden durch das Experiment betätigt.

**Frage:** Wie werden sich die Werte für  $I_{\text{ges}}$ ,  $I_1$  und  $U$  ändern, wie wird sich  $I_2$  einstellen, wenn nun ein zweiter Zweig mit  $R_2 = R_1$  parallel dazu geschaltet wird?

Den Schülern zur Antwort Zeit lassen! Meist kommen beide Möglichkeiten:

1.  $I_{\text{ges}}$  teilt sich auf beide Zweige auf.
2.  $I_{\text{ges}}$  wächst auf den doppelten Wert.

Zu Grunde liegende Vorstellung für die Vermutung 1.:

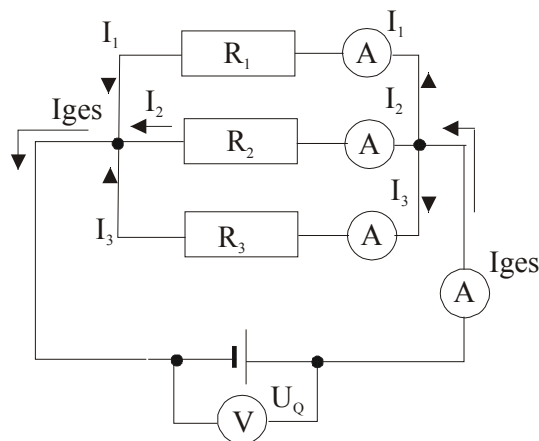


**Erklärung:** Quellen wie das Netz oder ein Akku liefern nicht, wie der Fluss, eine konstante Stromstärke. Sie halten vielmehr ihre Anschlussspannung (Potentialdifferenz) konstant. Diese Potentialdifferenz liegt an den Anschlüssen jedes Geräts. Vormessen! (Potenziale in Schaltung farbig markieren!) Durch jedes Gerät fließt deshalb ein Strom, dessen Stärke sich aus  $I_i = \frac{U_Q}{R_i}$  berechnen lässt. Die Quelle muss die Elektronen für alle Zweige liefern.

Prinzip der Ladungserhaltung: Ladung kann nicht erzeugt und nicht vernichtet werden.

Für den Gesamtstrom gilt somit:  $I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ . Knotenregel (1. Kirchhoff'sches Gesetz)

**Schaltskizze:**



**Einübung und Lernzielkontrolle:**

**V**  $R_2$  durch anderen Widerstand ungleich  $R_1$  ersetzen,  $I_2$  durch Schüler vorausberechnen lassen und experimentell bestätigen.

**V** Weitere Widerstände auf dieselbe Weise hinzuschalten und jeweils von den Schülern die Stromstärken vorausberechnen lassen.

### Weiterführung des Kurses

**Deduktion des zweiten Kirchhoff'schen Gesetzes<sup>64</sup>:**

**Erste Beobachtung:** Je größer der Widerstand in einem Zweig, desto kleiner ist dort die Stromstärke.

**Genauere Betrachtung:** Wegen  $I = U/R$  und da überall  $U$  konstant ist, ist  $I \sim 1/R$ .

Am konkreten Beispiel wird vermutet:  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$  und dann durch Deduktion als allgemein richtig nachgewiesen.

<sup>64</sup> Da die Deduktion als Methode der Erkenntnisgewinnung in der Regel an dieser Stelle zum ersten Mal praktiziert wird, muss sie den Schülern bewusst gemacht werden.

## Ersatzwiderstand der Parallelschaltung

Frage: Denkt man sich alle Widerstände einer Parallelschaltung zu einem einzigen "Block" zusammengefasst, so stellt sich die Frage, ob man dieser komplizierten Anordnung einen einzigen konstanten Widerstandswert zuordnen kann. Das ist nur möglich, wenn für sie das Ohm'sche Gesetz gilt.

**V:** Zur Verdeutlichung werden alle Widerstände mit einer Schachtel abgedeckt. Dann wird  $I_{\text{ges}}$  als Funktion von  $U_Q$  untersucht.

Ergebnis: Eine Parallelschaltung von Widerständen als einen "Block" mit zwei Anschlüssen betrachtet, verhält sich so, als ob sich im Block nur ein Widerstand befinden würde.

Es ist  $I_{\text{ges}} \sim U_Q$ , der Quotient  $U_Q / I_{\text{ges}}$  ist also konstant. Man bezeichnet ihn als den **Ersatzwiderstand** der Anordnung:

$$R_{\text{ers}} = \frac{U_{\text{Quelle}}}{I_{\text{ges}}}$$

Nach Erörterung der "Ersatzmethode" nächste Fragestellung. Lässt sich  $R_{\text{Ers}}$  aus  $R_1, R_2, \dots$  berechnen?

Zunächst Berechnung von  $R_{\text{Ers}} = U_Q / I_{\text{Ges}}$  mit den konkreten Werten des Demonstrationsversuchs, dann allgemeine

**Deduktion** nach [DMr S. 243] bzw. [DBI, S. 213].

Sonderfälle:  $R_{\text{Ers}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$  und  $R_{\text{Ers}} = R/n$  bei  $n$  gleichen Widerständen  $R$ .

Regel: Der Ersatzwiderstand ist kleiner als der kleinste Zweigwiderstand.

Erklärung: Mit dem kleinsten Zweigwiderstand beginnen und erörtern, was passiert, wenn weitere Widerstände parallel geschaltet werden.

Übungsaufgaben auch zum Leistungsumsatz nicht gesondert, sondern mit in die Übungsphase einfließen lassen. Die Notwendigkeit von Sicherungen im Haushalt erörtern. (vgl. [DBI, S. 196, Beispiel und S. 197])

Lernzielkontrolle:

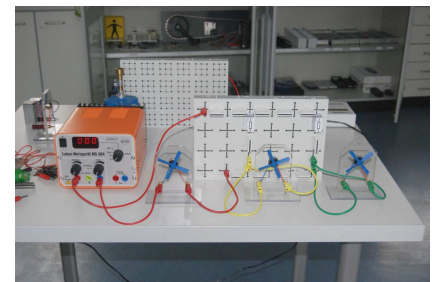
**V:** Zwei Widerstände 1 und 2 werden parallel geschaltet. 3 Glockenanker-Solar-motoren<sup>65</sup> als „Stromanzeiger in die Zuleitung und in jeden Zweig schalten.

- a) Zunächst nur Widerstand 1 anschließen. Motoren beobachten.

Beob.: Beide Motoren drehen ungefähr gleich schnell.

- b) Voraussage machen lassen: Was geschieht, wenn der 2. Widerstand parallel hinzu geschaltet wird? Widerstand 2 hinzuschalten

Beob.: Motor in der Zuleitung dreht sich schneller, beide Motoren in den Zweigen drehen sich gleich schnell und genauso schnell wie in a)



## Reihenschaltung von Widerständen (P)

Einstiegsmöglichkeiten:

Erinnerung an den Einstiegsversuch zur Parallelschaltung und die dort aufgeworfenen Fragen bei der Reihenschaltung der Lämpchen, die nun geklärt werden sollen.

**V:** 24 V/25 W-Lampe und 24 V/100 W-Lampe zuerst parallel, dann in Reihe an 24 V Gleichspannung anschließen.

Vorher die Schüler jeweils fragen, was sie erwarten.

Referendar Mäurer: L1: 6V/3W, somit  $I_1 = 0,5 \text{ A}$ , L2: 6V/0,05 A somit  $P_2 = 0,3 \text{ W}$

Schüler berechnen fehlende Größen.

Frage: Welche Lampe leuchtet bei der Parallelschaltung heller? S: L1. V: Bestätigung.

Frage: Was ist zu erwarten, wenn man die beiden Lampen in Reihe schaltet?

S: L1 heller als L2. V: L1 dunkel, L2 hell.

Analoges Vorgehen wie bei der Parallelschaltung

[DMr S. 244 V1] bzw. [DBI, S. 214 V1] ( $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$ ,  $R_3 = 70 \Omega$ ,  $U_Q = 10 \text{ V}$ )

Zunächst Diskussion der Potenzialverhältnisse, Erarbeitung der Maschenregel (2. Kirchhoff'sches Gesetz)

<sup>65</sup> Firma Lemo-Solar: <http://www.lemo-solar.de/shop/solarmotoren.php>

**Schaltskizze:**

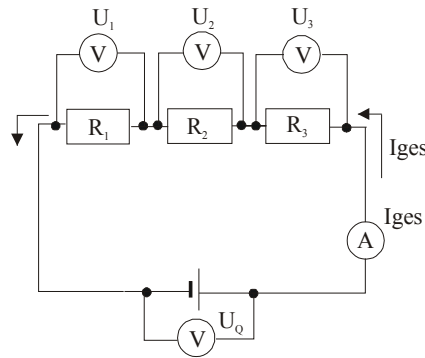
**Übungen:** [DB1, S. 213, S. 215, mit Potenzial: S. 219], [U1, S. 273], [I1, S. 222]

**Zusammenfassung:** 

[Reihen\\_und\\_Parallelschaltung.docx](#)


**Praktikum zur Parallel- und Reihenschaltung, auch mit Simulationen mit Yenka:**

 [Simulationen\\_Yenka\\_Schaltung\\_von\\_Widerstaenden.doc](#)

**Vertiefung: Potenzial, Potenziometerschaltung (W)**

Wiederholung und Vertiefung des Potenzialbegriffes:

Mit Hilfe des Potentials lassen sich Spannungsmessungen bei komplexen Schaltungen, die aus mehreren Widerständen zusammengesetzt sind, vereinfachen. Dabei bleibt der Spannungsmesser mit seinem Minusanschluss immer mit demselben Punkt der Schaltung verbunden. Dieser Punkt heißt dann **Bezugspunkt** und wird mit dem Symbol Gehäusemasse versehen (Im Beispiel unten Punkt D). So gemessene Spannungswerte heißen **elektrische Potentiale** der Punkte A, B, ... bezüglich des Bezugspunktes.

**V:** DMr S. 244 B2  [Pot2](#) Messwerte:

$U_{AD} = \varphi(A) = 10 \text{ V}$ ;  $U_{BD} = \varphi(B) = 9 \text{ V}$ ;  $U_{CD} = \varphi(C) = 7 \text{ V}$ ;  $U_{DD} = \varphi(D) = 0 \text{ V}$ .

$\varphi(A)$ ,  $\varphi(B)$ ,  $\varphi(C)$ ,  $\varphi(D)$  sind die Potentiale der Punkte A, B, C, D bezüglich des Bezugspunktes D.

Ergebnis: 1) Das Potenzial fällt von A nach D ab: Von 10 V auf 0 V. Statt vom *Potenzialabfall* von einem zum anderen Anschluss eines Widerstandes spricht der Praktiker oft vom *Spannungsabfall* an diesem Widerstand. 2) Die Spannung zwischen zwei beliebigen Schaltungspunkten ist gleich ihrer Potentialdifferenz.

Vorteil: Man kann aus wenigen Potenzialangaben in einer Schaltung viele Spannungsdifferenzen berechnen.


**M:** Schaltplan eines Radios mit Potenzialwerten zeigen.

Übergang zur Potenziometerschaltung:

Frage: Wie ist der Potenzialverlauf zwischen den Punkten A, B, C, D?

**V:** Die drei Widerstände werden durch Konstantandrähte unterschiedlicher Länge ersetzt: Z.B.  $\varnothing = 0,2 \text{ mm}$ , volle Tischlänge, Isolierklemmen so anbringen, dass in den einzelnen Abschnitten dieselben Spannungen abfallen.

Schüler vermuten, wo die entsprechenden Punkte im Potenzialdiagramm liegen werden, dann nachmessen und in das Schaubild von V1 eintragen.

**V:** Man ersetzt die drei Konstantandrähte durch einen bzw. entfernt die Isolierklemmen und erhält so die übliche Spannungsteilerschaltung.  [Pot3](#)

**M:** Demonstration von Schiebe- und Drehwiderständen und der üblichen Schaltzeichnung der Potenziometerschaltung.

Eventuell: Diskussion des energetischen Aspekts des Potenzialbegriffs.

**Übungen:** [DB1, S. 216]

**Der Vorwiderstand (W)**

**V:** Versuch nach  [Vorw1](#)

Beobachtung: Je größer  $R_V$ , desto größer  $U_{RV}$ , desto kleiner  $U_L$  und zwar so, dass stets  $U_{RV} + U_L = U_Q = \text{konst.}$

Berechnung von  $R_V$  für das verwendete Lämpchen und experimentelle Überprüfung

Frage: Was ist für  $U_{RV}$ ,  $U_L$  und  $I$  zu erwarten, wenn  $R_V \rightarrow \infty$  geht?

**V:** Öffnen des Schalters.

Lernzielkontrolle: Was geschieht (bei endlichem Wert von  $R_V$ ), wenn man die Lampe herausdreht? Überprüfung. Veranschaulichung und Vertiefung mit Hilfe des Potenzialgebirges über einem einfachen Stromkreis. [☛Pot2](#)

Abschließend ist zu erörtern:

Der Vorwiderstand könnte auch ein "Nachwiderstand" sein.

Alle Zuleitungen zu Elektrogeräten und alle Strommesser sind Vorwiderstände.

*Weitere Möglichkeiten der Vertiefung*

## Anwendungen (W)

### Schülerexperimente

Hier lässt sich auch die Methodenkompetenz der Schüler überprüfen und so eine Lernzielkontrolle durchführen.

Beispiel [☛SVNetzwerk](#)

### Berechnung einfacher Netzwerke

Einfache Aufgaben wie z.B.: Zwei Widerstände parallel ein dritter in Reihe davor.... sind geeignet, die Gesetze der Reihenschaltung von denen der Parallelschaltung sauber zu unterscheiden, den Begriff des Ersatzwiderstands zu festigen und die Ersatzmethode einzuüben. Es handelt sich dabei um eine gute und wichtige Übung des behandelten Stoffes. Netzwerke, zu deren Lösung die "Maschenregel" nötig ist, überfordern die Schüler in dieser Jahrgangsstufe.

### Messbereichserweiterung

Taucht im Bildungsplan nicht mehr auf. Falls man sie behandelt, so wird man beide Arten der Erweiterung gemeinsam nach der Behandlung von Parallel- und Reihenschaltung besprechen. Man muss dann an konkreten Beispielen erörtern, was man mit Messbereichserweiterung meint. Die Schüler schlagen häufig vor, die zu messende Größe dem Messgerät anzupassen statt umgekehrt. Bei der Messbereichserweiterung von Strommessern hat sich folgende Analogie gut bewährt: Bei einem Unfall können nur wenige Autos pro Minute die Unfallstelle passieren. Der Verkehrsstrom sollte aber unverändert weiterfließen. Was tut die Polizei? Buchstabengleichungen überfordern die Schüler meist. Man bleibe bei konkreten Beispielen.

Vertiefung: Praktikum zur Widerstandsmessung: [☛ Praktikum\\_Wheatstone.docx](#)

# Elektronische Schaltungen

## Fachwissenschaftliche und methodische Bemerkungen

### Reine Halbleiter und die Halbleiterdiode

#### Leitungsmechanismen

Wesentlich für die Erklärung des Leitungsvorgangs in Halbleitern ist die Unterscheidung zwischen gebundenen Elektronen bzw. Bindungselektronen und freien Elektronen, also zwischen zwei energetischen Zuständen der am Leitungsvorgang beteiligten Elektronen. Die Beschreibung und Erklärung der Leitungsvorgänge sollte mit Hilfe dieser "Elektronenarten" geschehen. Die positiven "Löcher" bzw. die "Löcherleitung" und das Wandern der positiven Löcher kann man kurz erwähnen, muss es aber nicht. (Die Löcherleitung lässt sich mit Hilfe von in Reihe sitzenden Schülern demonstrieren, bei denen durch Umsetzen eines Schülers eine entsprechende Lücke in die andere Richtung wandert. Dasselbe gilt für in Reihe angeordneter Autos.)

Es gibt viele verschiedene Modelle zur Verdeutlichung der Leitungsvorgänge. Der Grund liegt darin, dass man mit den Si-, As- und In-Atomrümpfen, sowie den gebundenen Elektronen, freien Elektronen und Löchern insgesamt sechs unterschiedliche Elemente besitzt, deren Darstellung selbst unter Zuhilfenahme von Farben kompliziert wird. Welches Modell der Lehrer verwendet, ist auch ein wenig Geschmackssache. Auf jeden Fall sollte man das Modell während des Unterrichtsgangs nicht wechseln.

Man kann von einem dreidimensionalen Modell ausgehen und dann die Darstellung auf zwei oder sogar eine Dimension einschränken. Dadurch wird es möglich, eine frei werdende Dimension für die Veranschaulichung der Energie der Elektronen zu verwenden.

#### Vorgänge am pn-Übergang

##### Die Sperrpolung:

Für ein vertieftes Verständnis der Vorgänge am pn-Übergang sind die Raumladungszonen von grundlegender Bedeutung, die sich durch thermische Diffusion der Elektronen durch die Grenzschicht einstellen, auch wenn keine äußere Spannung an den Kristall angelegt wird.

Die Argumentation, dass aufgrund der Diffusion in der Umgebung des pn-Übergangs eine *Sperrschicht* entsteht, durch die hindurch kein Ladungsträgertransport mehr stattfinden kann, ist irreführend und falsch. Sie erschwert das Verständnis des bipolaren Transistors unnötig: Beim npn-Transistor muss man dann nämlich erklären, dass die Elektronen nach Durchqueren der Basisschicht in die Sperrschicht der in Sperrrichtung gepolten Basis-Kollektor-Diode eindringen und sie ohne Mühe passieren können. Zur Erklärung der Sperrwirkung einer entsprechend gepolten Diode braucht man die Diffusionsraumladungen gar nicht.

Die Kernfrage lautet: Warum können die freien Elektronen aus der negativen Kontaktierung nicht in den p-Halbleiter und durch diesen hindurch in die Grenzschicht eindringen und den pn-Übergang durchqueren?

Antwort: Es können durchaus freie Elektronen aus der negativen Kontaktierung ins p-Material eindringen und sie könnten sich dort auch bis zum pn-Übergang bewegen und ihn überschreiten.

Dass das tatsächlich nicht geschieht liegt daran, dass gebundene Elektronen sich zwar von Loch zu Loch „hüpfend“ durch das p-Material bewegen, aber den pn-Übergang nicht überschreiten können, da es im n-Material praktisch keine Löcher gibt, in die sie „hüpfen“ könnten.

Beim Anlegen der Spannung geschieht daher folgendes: Auf alle beweglichen Ladungsträger im p- und im n-Material wirken elektrische Feldkräfte, die die freien und die gebundenen Elektronen auf den Plusanschluss zutreiben.

Es laufen also sofort beim Anlegen der äußeren Spannung überall im p-Halbleiter einige gebundene Elektronen ein wenig auf den pn-Übergang zu und einige freie Elektronen treten aus dem Metall der negativen Kontaktierung in den p-Halbleiter ein und füllen dort Löcher. Einige werden auch auf die Oberfläche des p-Halbleiters laufen. Gerade diese entstehenden Ladungen auf der Oberfläche sind ausschlaggebend für das elektrische Feld im Inneren.

Diese Bewegung wird aber nach kürzester Zeit gestoppt, da die gebundenen Elektronen, die am pn-Übergang angekommen sind, dort nicht ins n-Gebiet weiterlaufen können, sich also in einer sehr dünnen Schicht vor der Grenzfläche anreichern und dort somit eine negative Ladung bilden. Hat man die Diffusionsraumladung besprochen, so wird man sagen: „... und die dort schon vorhandene Raumladung verstärken“.

Alle diese Bewegungen gehen genau so lange vor sich, bis durch die Einwirkung der neu entstandenen Ladungen auf die Ladungsträger im Inneren des p-Materials keine elektrischen Kräfte mehr ausgeübt werden (d.h. bis das durch die neuen Ladungen entstehende elektrische Feld das von der äußeren Spannungsquelle verursachte gerade kompensiert). Im n-Halbleiter geschieht entsprechendes: Einige der dort vorhandenen freien Elektronen wandern etwas auf die



positive Kontaktierung zu, einige treten in sie ein. Die dadurch entstehende positive Schicht am pn-Übergang stoppt diesen Vorgang aber alsbald wieder, genau dann, wenn im Inneren des n-Halbleiters keine elektrischen Kräfte auf die dort befindlichen Ladungsträger wirken.

### **Durchlasspolung:**

Die freien Elektronen der n-Schicht können den pn-Übergang überqueren und sich auch im p-Material weiterbewegen. Sie werden nach kurzem Laufweg im p-Material in die dort reichlich vorhandenen Löcher fallen und dann eben als gebundene Elektronen von Loch zu Loch „hüpfend“ zum Plusanschluss wandern.

Aber auch die gebundenen Elektronen im n-Material können durch die pn-Schicht in das p-Material gelangen und dort ebenfalls von Loch zu Loch „hüpfend“ zum Plusanschluss wandern. (Löcherleitung ohne Löcher formuliert) Welchen Anteil am Gesamtstrom durch die Grenzschicht die freien und welchen die gebundenen Elektronen des n-Materials haben, lässt sich durch den Dotierungsgrad der beiden Materialien steuern:

Je schwächer die Dotierung der n-Schicht ist und je stärker die Dotierung der p-Schicht ist, desto kleiner ist der Anteil der freien Elektronen am Ladungstransport.

## **Die Vorgänge am Metall – Halbleiter – Übergang**

Erklärt man die Sperrwirkung der Diode im oben genannten Sinne, nämlich dass der Elektronenübergang vom p-Halbleiter zum n-Halbleiter deshalb nicht möglich ist, weil im p-Halbleiter praktisch nur die gebundenen Elektronen von Loch zu Loch „hüpfend“ zum Ladungstransport beitragen, im n-Halbleiter aber so gut wie keine Löcher vorhanden sind und die gebundenen Elektronen ohne Energiezufuhr nicht zu freien Elektronen werden können, so ist es nicht mehr zu verstehen, wieso dann die Elektronen offensichtlich ohne größere Schwierigkeiten aus dem p-Material in die metallische Kontaktierung übertreten können. Schließlich gibt es in Metallen noch weniger Löcher als im n-Halbleiter. Metalle verhalten sich diesbezüglich wie extrem stark dotierte n-Halbleiter.

Dass sich der Metall-Halbleiter-Übergang "ohmsch" verhält, dass er also eine von der Richtung unabhängige lineare U-I-Kennlinie besitzt, ist keineswegs selbstverständlich, sondern muss durch besondere Maßnahmen gewährleistet werden. Eine genaue Erklärung ist ohne detaillierte Kenntnisse des Bändermodells nicht möglich. Im Gymnasium kann man, ohne Begründung, nur etwa die folgenden wesentlichen Gesichtspunkte ansprechen:

Ein Metall-Halbleiter-Übergang ist etwas grundsätzlich anderes als ein pn-Übergang. Beim pn-Übergang ändert sich die Kristallstruktur nicht, sondern nur die Dotierung. Beim Metall-Halbleiter-Übergang grenzen zwei ganz unterschiedliche Kristallstrukturen aneinander, bei denen sich meist noch zusätzlich Fremdatome (Störatome) eingelagert haben.

Das führt dazu, dass der Energiebedarf zum Loslösen eines im p-Halbleiter gebundenen Elektrons aus seiner Bindung heraus kleiner ist, wenn es dabei in das Kristallgitter eines Metalls eintreten kann, als wenn es anschließend im Kristall des p-Halbleiters bleiben muss. Die Wärmewirkung reicht bei vielen Elektronen des p-Halbleiters aus, um sie ins Metall "zu schütteln".

Durch starke Dotierung des p-Halbleiters kann man erreichen, dass die gebundenen Elektronen ohne Energiezufuhr ins Metall übertreten können (Tunneleffekt). Die Elektronen haben vor und nach dem Übertritt ins Metall dieselbe Energie, sind aber im Metall frei beweglich.

Geeignete Fremdatome in der Grenzschicht können eine Art Treppe bilden, auf der die Elektronen Stufe für Stufe zur für freie Bewegung im Metall benötigten Energiehöhe durch die Wärmebewegung hinauf gestoßen werden.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Gleichrichterwirkung von Dioden von Ferdinand Braun 1874 beim Halbleiter-Metall-Übergang (Bleiglanz -Metall-Übergang) entdeckt wurde.<sup>66</sup>

Bei Schottky-Dioden beruht noch heute die Ventilwirkung von Dioden auf einem Halbleiter-Metall-Übergang.

## **Planartechnik**

Der Grund für die Entwicklung der Planartechnik ist nicht die Tatsache, dass die Planar-Dioden bzw. -Transistoren eine flächenhafte Struktur besitzen. Charakteristisches Merkmal ist die Oxydierung der Halbleiteroberfläche vor allem am pn-Übergang. Dadurch wird störenden Restströmen, insbesondere aber langsamen umweltbedingten Veränderungen der Halbleiteroberfläche vorgebeugt. Die technische Herstellung von Dioden und Transistoren kann in einer GFS präsentiert werden [C3, S. 403].

## **Diodenkennlinie**

Die Diodenkennlinie besitzt über mehrere Dekaden sehr genau einen exponentiellen Verlauf. Von einem "Knick der Durchlasskennlinie" kann keine Rede sein.

Bei der Festlegung der "Schwellspannung" geht man vom maximal zulässigen Durchlassstrom  $I_{\max}$  aus und definiert

<sup>66</sup> Schmidt-Wolbrandt, Geschichte der Halbleiterdiode, NiU-PC, Nr. 22; Siehe auch C3 S. 402.



als "Durchlassspannung  $U_D$  der Diode im Knickpunkt der Durchlasskennlinie" diejenige Durchlassspannung, für die  $I = I_{\max} / 10$  wird.

Will man den Normalwert von  $U_D$  im Unterricht demonstrieren, so muss man bei der Messung des Durchlassstroms für das Strommessgerät einen Messbereich wählen, dessen Vollausschlag etwa  $I_{\max}$  entspricht.

Nur in diesem Fall erhält man bei 0,6 V (Si) bzw. 0,2 V (Ge) einen merklichen Stromanstieg bei der Durchlasskennlinie. Schaltet man dagegen auf einen um etwa 1/10 empfindlicheren Messbereich, so erhält man einen Stromanstieg bei 0,5 V, bei erneutem Herunterschalten des Messbereichs bei 0,4 V ...

## Methodische und fachdidaktische Bemerkungen

### Bildungsplan 2004

Kompetenzen und Inhalte für die Klasse 9/10<sup>67</sup>

#### 10. Naturerscheinungen und technische Anwendungen

a) Die SuS können wichtige Geräte funktional beschreiben.

b) Die SuS können sind immer mehr in der Lage, physikalische Modelle auch in ihrem Alltag gewinnbringend einsetzen einzusetzen.

Inhalte:

Energieversorgung: Kraftwerke und ihre Komponenten (z.B. Generator) – auch regenerative Energieversorgung (z.B. Solarzelle)

Informationstechnologie und Elektronik – auch einfache Schaltungen mit elektronischen Bauteilen

### Stoffauswahl und Gewichtung

#### Bedeutung des Themas

Kenntnisse über Halbleiter benötigt man:

Klasse 9, Energieversorgung, regenerative Energien, Solarzelle, einfache elektronische Schaltungen

Evtl. Klasse 9, Kernphysik: Halbleiterzähler.

Evtl. Kursstufe: Hier wird der Transistor in der Meißner'schen Rückkopplungsschaltung eingesetzt.

Kursstufe, Optik: Fotodioden zur Registrierung von Beugungs- und Interferenzerscheinungen

Kursstufe, Quantenphysik: Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mit Leuchtdioden.

In der Kursstufe erwartet man offensichtlich von den Schülerinnen und Schülern auch das Verständnis komplexerer Schaltungen mit elektronischen Bauteilen.

Im Fach NwT benötigt man für den Themenbereich Messen – Steuern – Regeln umfangreiche Kenntnisse über elektronische Bauteile, insbesondere zum Verständnis von Sensoren und Aktoren: Fotodiode, NTC, PTC-Widerstand in Sensoren, Halbleiter-Bauelemente mit Vorwiderstand in Sensoren und beim Betrieb von LEDs, Diode als Gleichrichter, Transistoren als Schalter in Aktoren, ...

#### Bipolarer Transistor kontra Feldeffekttransistor

In der Digitalelektronik hat der Feldeffekttransistor (FET) den bipolaren Transistor so gut wie abgelöst. Mit ihm lässt sich um Größenordnungen verlustärmer schalten und steuern. Die heutigen Mikroprozessoren wären mit bipolaren Transistoren nicht realisierbar. Deshalb sind fast alle Transistoren in einem Computer Feldeffekttransistoren. Außerdem können mit Feldeffekttransistoren sehr viel höhere Ströme geschaltet werden.

Da der FET ein wesentlich idealeres Bauteil ist, die Experimente mit ihm viel leichter und eindrucksvoller durchgeführt werden können und da er zudem leichter erklärt werden kann, sollte man ihn behandeln und den bipolaren Transistor weg lassen.

Man kann auch beide Transistortypen behandeln, benötigt dann aber mindestens 2-4 Stunden mehr.

#### Der Feldeffekt-Transistor

Hervorragende Darstellung: H.-P. Götz: Erfahrungen mit FETs

Daneben auch: Materialien für die Schule vom ehemaligen LEU, MOSFET – Schaltungen (nicht mehr lieferbar)

#### Der bipolare Transistor

<sup>67</sup> Die gegenüber der Klassenstufe 7/8 neu hinzugekommene Inhalte sind blau dargestellt, weggefallene Formulierungen sind durchgestrichen.

Falls man den bipolaren Transistor behandelt, kann man folgendermaßen vorgehen:

Mitteilung, dass es sich dabei um einen dreifach dotierten Kristall handelt.. Die übliche zweidimensionale Darstellung als rechteckiges Kästchen mit den drei Dotierungszonen sollte durch ein Schnittbild des Transistors sowie das Bild eines modernen Planartransistors ergänzt werden.

Beschränkung auf den npn-Transistor.

Einführung des Dioden-Ersatzschaltbild des Transistors und seine experimentelle Überprüfung. Das ist wichtig, denn so kann man einerseits überprüfen, ob ein Transistor in Ordnung ist, und es ist eine gute Möglichkeit, die Pinbelegung eines unbekannten Transistors zu ermitteln. Andererseits liefern die Vorversuche eine gute Motivation für den überraschenden Transistoreffekt.

Demonstration des Transistoreffekts und der Tatsache, dass der Effekt bei einer Gegeneinanderschaltung zweier Dioden ausbleibt. Die Demonstration sollte mit zwei Stromquellen erfolgen, mit einer im Emitter-Basis-Stromkreis und einer im Emitter-Kollektor-Stromkreis.

Bei der Erklärung des Transistoreffekts wird man sich im wesentlichen auf die Betrachtung der freien Elektronen beschränken.. Es sind drei Maßnahmen zu nennen, mit denen man dafür sorgt, dass möglichst nur freie Elektronen in die Basis übertreten und den Kollektor erreichen, bevor sie in ein Loch fallen: Schwache Dotierung der Basis, eine sehr geringe Basisdicke von ca. 5 µm und einen unsymmetrischen Aufbau, durch den der Weg zum Basisanschluss länger als der zum Emitteranschluss wird. Ohne diese Maßnahmen würde ein wesentlich größerer Teil der Elektronen vorwiegend als gebundene Elektronen von Loch zu hüpfend zum Basisanschluss gelangen und den Stromverstärkungsfaktor wesentlich verringern.

Man kann diesen Sachverhalt erwähnen und zeigen, dass Emitter- und Kollektoranschluss eines Transistors zwar im Prinzip vertauscht werden können, dass der Stromverstärkungsfaktor  $I_C/I_B$  dann aber wesentlich kleiner ist. So lässt sich auch experimentell der Kollektor- und Emitteranschluss identifizieren.

## Stoffanordnung

Das Thema Halbleiter zerfällt in drei Bereiche:

(a) Die Physik der Leitungsvorgänge in reinen und dotierten Halbleitern sowie die physikalische Erklärung der Vorgänge am pn-Übergang und der Funktion des FET.

(b) Die experimentelle Untersuchung des elektrischen Verhaltens konkreter Halbleiterbauelemente: Dioden, Fotodioden bzw. Solarzellen, Transistoren, ....

Das Ergebnis solcher Untersuchungen wird hauptsächlich durch Kennlinien dargestellt.

(c) Analyse von vorgegebenen Schaltungen mit Halbleiterbauelementen bezüglich ihrer Wirkungsweise sowie die Entwicklung von Schaltungen mit Halbleiterbauelementen, wobei diese Schaltungen bestimmte vorgegebene Funktionen erfüllen sollen. Aufgrund des verstärkten Einzugs von computerunterstützter Messwerterfassung im Unterricht sollte auf die Behandlung von Sensoren nicht verzichtet werden.

Diese drei Themenbereiche lassen sich in jeder beliebigen Reihenfolge anordnen: [☛ Stoffanordnung Halbleiter](#)

## Schulbuchvergleich

### Klasse 9/10

Dorn-Bader [D9/10]	Impulse [I9/10]	Fokus [FC2]	Duden [DP2]	Spektrum [SP2]
Halbleiter: Ventilwirkung einer HL-Diode	Leitungsvorgänge in Metallen und Halbleitern	Elektronik-Praktikum: A) Sensoren	Leiter und Nichtleiter Halbleiter	Halbleiterbauelemente: Die Diode – ein elektrisches Ventil
Kennlinie der Si-HL-Diode	Aufbau eine Siliziumkristalls	• Magnetfeld-Sensor	Analgie: Leitung in Stoffen - Wasserstrom	Lichtempfindliche Bauteile,
Vertiefung:	Elektrizitätsleitung in Halbleitern, Heißeiter	• Temperatur-Sensoren	Mosaik: Heißeiter und Kaltleiter,	lichtaussendende Dioden
• Siliziumkristall,	Sensoren:	• Helligkeitssensoren	Fotowiderstand	Leitung in Halbleitern (n- und p-Leitung),
• Dotierung (n- und p-Leiter)	Temperatursensor, Lichtsensor	• Kraftsensoren	Dotierung (n- und p-Leitung)	Eigenleitung
• stark vereinfachte Erklärung der Ventilwirkung einer Diode	Physik aktuell: Positionssensor	B) Speicherung von Informationen	Halbleiterdiode, Kennlinie einer Halbleiterdiode, Durchlass- und	Aufbau und Funktionsweise der Diode (pn-Übergang), Durchlassrichtung,
	Dotierung von	• Spieluhr		
		• CD		
		• Speichern im		

<p>Funktionsweise einer LED, Laserdiode, Begriff innere Fotoeffekt</p> <p>Funktionsweise einer Solarzelle, Belastungskennlinie, Wirkungsgrad</p> <p>Funktionsweise eines Feldeffekttransistor, <math>U_{GS}</math>-<math>I_D</math>-Kennlinie, Stromsteuerung</p> <p>Vertiefung: FET</p> <p>FET als Sensor und Verstärker - Anwendungsbeispiele für Verstärkerschaltungen (Sensoren, Datenübertragung mit Licht)</p> <p>Interessantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Digitale Verarbeitung von Musik</li> <li>• Analog-Digital-Wandlung</li> <li>• Compact-Disc</li> <li>• Minidisc</li> </ul> <p>Aufgaben und Möglichkeiten für ein Praktikum</p>	<p>Halbleitern (n- und p-Leiter)</p> <p>Physik aktuell: Chipherstellung</p> <p>Ventilwirkung einer diode, Kennlinie einer Diode, pn-Übergang, Sperrschicht</p> <p>Transistoren (Bipolartransistor), Transistoreffekt</p> <p>Transistorschaltungen mit bipolaren Transistoren (Warnschaltungen)</p> <p>Physik überall:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektronische Schaltungen (Notbeleuchtung, Lichtschranke, Flip-Flop)</li> <li>• Verstärkerschaltungen</li> <li>• Fotovoltaik</li> <li>• Physik und Medizin: Puls-Messung, EKG, Elektrische Vorgänge in Nervenzellen</li> </ul> <p>Werkstatt:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Logische Schaltungen (NOT, NAND, NOR)</li> <li>• Selbstbau-Radio für MW</li> </ul> <p>Rückblick, Heimversuche, Aufgaben</p>	<p>Computer</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Speicher aus Dioden</li> <li>• Speicher aus zwei Transistoren</li> <li>• Analog-Digital-Wandler</li> </ul>	<p>Sperrrichtung</p> <p>Steuerung von elektrischen Strömen: Transistor (Feldeffekttransistor)</p> <p>Verstärkerwirkung</p> <p>Ausgewählte elektronische Bauteile im Überblick (Thermistor, Fotowiderstand, Gleichrichterdiode, Leuchtdiode, Fotodiode, Solarzelle, FET, Bipolarer Transistor)</p> <p>Physik in Natur und Technik:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Widerstände als Sensoren (Temperatursensor, Dehnungsmessstreifen)</li> <li>• Leuchtdiode</li> <li>• Steuerung mit Licht</li> </ul> <p>Aufgaben, Rückblick</p>	<p>Sperrrichtung</p> <p>Diode als Gleichrichter</p> <p>Streifzug: Solarzelle, Halbleiter</p> <p>Der Transistor als Schalter und Verstärker (bipolar)</p> <p>Transistorkennlinien, Stromverstärkung</p> <p>Feldeffekttransistoren (n-Kanal-FET, MOS-FET) mit Erklärungen</p> <p>Streifzug: Anwendungen von FET's</p> <p>Informationstechnologie: Informationen, Daten, Codierung</p> <p>Codierung von Schall, Verstärker</p> <p>Digitale Post</p> <p>Flip-Flop</p> <p>Streifzug: Speichern von Daten: Festplatten, CD, DVD</p> <p>Datenübertragung</p> <p>Streifzug: Scanner</p> <p>Lichtleiter, Übertragungsgeschwindigkeit</p> <p>Wie arbeiten Computer?</p> <p>Versuche und Aufträge: Elektronische Schaltungen</p>
---	--	---	--	---

## Behandlung durch die Schulbücher

[D9/10] behandelt das Thema „Elektronik“ stark anwendungsorientiert und beschreibt die Leitungsvorgänge in Halbleitern sowie den Feldeffekttransistor stark reduziert in einer Vertiefung. Die Kennlinien der Si-Halbleiterdiode sowie des FET werden gemessen und angegeben. Viele interessante Anwendungen (Elektronische Schaltungen und Transistoren) werden kurz anhand einiger Selbstbauversuche beschrieben. Ausführlichere Beschreibungen weiterer Anwendungen bieten die Möglichkeit für GFS. Im Anschluss gibt es mehrere Anregungen für Praktikumsversuche.

[I9/10], [DP2], [SP2] stellen das Thema „Elektronik“ am umfangreichsten und ausführlichsten dar. Neben den Kennlinien von Dioden und Transistoren und ihren umfangreichen Anwendungen in elektronischen Schaltungen und als Sensoren werden die physikalischen Grundlagen der Leitungsvorgänge detailliert dargestellt. Als Transistor wird in [I9/10] der bipolare Transistor und in [DP2] der Feldeffekttransistor beschrieben und verwendet. In [SP2] werden beide vorgestellt. [SP2] geht in den Anwendungen weit über die Anforderungen hinaus.

[FC2] nimmt lediglich den phänomenologischen Anteil der Elektronik in den Blick. Dazu wird ein Elektronik-Praktikum zu Sensoren und zur Speicherung von Informationen vorgestellt. Die SuS erarbeiten sich die entsprechenden Inhalte selbst durch Beobachten und Recherchieren. Auf eine Beschreibung und Erklärung von Leitungsvorgängen wird komplett verzichtet.

## Stoffauswahl und Gewichtung

Laut Bildungsplan 2004 ist offensichtlich an eine ausführliche Behandlung der Leitungsvorgänge in Halbleitern, Dioden und Transistoren nicht gedacht. Für eine funktionale Beschreibung von Geräten und zum Aufbau einfacher elektronischer Schaltungen genügt die funktionale Kenntnis verschiedener elektronischer Bauteile durchaus. Eine ausführliche und gründliche Behandlung der Halbleiter ist jedoch nur im Rahmen dieses Themas im Physikunterricht möglich. Da die Erklärung der Leitungsvorgänge später wohl kaum mehr nachgeholt werden kann, sollte sie hier nicht zu kurz kommen. Das Hauptaugenmerk sollte aber in jedem Fall auf den Anwendungen der Halbleitertechnologie liegen, die das Interesse der Schüler in besonderem Maße auf sich ziehen.

Will man den Forderungen des Bildungsplans 2004 sowie den KMK-Standards und den Mustercurricula gerecht werden, so muss man auf jeden Fall einfache elektronische Schaltungen mit Dioden und Transistoren sowie die Solarzelle behandeln. Alle drei elektronischen Bauteile müssen von den SuS jedoch nur in ihrer funktionalen Beschreibung verstanden werden. Die Diode wird dabei als richtungsabhängiger Widerstand und der Transistor als steuerbarer Widerstand behandelt. Die Solarzelle dient als Energiewandler von Lichtenergie in elektrische Energie. Dringend erforderlich ist die Behandlung der Kennlinie einer Halbleiterdiode (Kennlinie von Energiesenken).

Für ein grundlegendes Verständnis des für die SuS völlig unbekannten Leitungsmechanismus' bei den Halbleitern ist zumindest die Behandlung der Elektrizitätsleitung in Halbleitern (Heiß- und Kaltleiter) sowie die Dotierung (p- und n-Halbleiter) dringend anzuraten, aber nach den derzeit gültigen Bildungsstandards nicht erforderlich. Sollte man sich dafür entscheiden, muss man auch genügend Zeit einplanen und geeignete Modelle zur Veranschaulichung anbringen sowie mit viele Skizzen das Verständnis erleichtern. Schülerfragen zur physikalischen Funktionsweise von Diode und Transistor sollten man nicht ausweichen und bei Zeitknappheit zumindest einfache Erklärungen (z.B. [D9/10], S. 59 und S. 61) anbringen.

Einfache Schaltungen mit elektronischen Bauteilen könnten eine Schaltung der Diode als Stromventil, eine Schaltung einer LED, eine Schaltung zum Wirkungsgrad einer Solarzelle sowie eine Schaltung eines Transistors zur Steuerung von Strömen sein. Unzählige weitere interessante und anwendungsorientierte Schaltungen sind möglich (Sensoren, Verstärker, Datenübertragung, Datenspeicherung, ...).

## Unverzichtbare Inhalte

Diode als richtungsabhängiger Widerstand  
Kennlinie einer Diode  
Solarzelle als Energiewandler  
Transistor als steuerbarer Widerstand  
Einfache elektronische Schaltungen

## Historische Aspekte

1823 Entdeckung des Siliziums und Namensgebung durch Jöns Jakob Berzelius  
1874 Entdeckung des Gleichrichtereffekts durch Ferdinand v. Braun  
1886 Entdeckung von Germanium durch Clemens Winkler  
1938 Siliziumkristalldiode  
1941 Germaniumdiode  
1947 Erfindung des Transistors aus Germanium durch Bardeen, Brattain und Shockley in den USA  
1954 Siliziumtransistor  
ab 1955 serienmäßige Herstellung von Transistoren  
1956 Nobelpreis für die Erfindung des Transistors  
ab 1965 Entwicklung integrierter Schaltkreise

## Einstiegsvarianten

Einstieg über Sinnesorgane bei Lebewesen und deren Nachahmung in der Sensortechnik sowie Möglichkeiten der Datenspeicherung  
 Erstes Kennenlernen von Halbleiterbauelementen (z.B. Heißeiter, Kaltleiter, Fotowiderstand) im Zirkelpraktikum  
 Aufnahme von Kennlinien: Vergleich Ohm'scher Widerstand, Glühlampe und Bleistiftmine  
 Historische Entwicklung der Computertechnik  
 Weitere Anwendungen der Halbleitertechnik (z.B. Diode in einer elektrischen Zahnbürste)  
 Überraschende Versuche (z.B. Zauberlämpchen [19/10, S. 235])

## Unterrichtsmethoden

Das in [FC2] vorgeschlagene Praktikum bietet sich in Hinblick auf kompetenzorientierten Unterricht hervorragend an. Als Einstieg bietet sich ein Überblick über Sinnesorgane bei Lebewesen [FC2, S. 110] sowie über die Speicherung Informationen [FC2, S. 113] an.

Folgende Varianten und Ergänzungen wären denkbar:

- Gestaltung eines Lernzirkels – alle Stationen oder Auswahl, Anfertigung eines eigenen Heftaufschriebs zu diesen Themen (Zeitbedarf: 4 Stunden – je nach Anzahl der Stationen)
- Jedes Team bearbeitet 1 oder mehrere Themen aus dem Gebiet Sensoren und 1 oder mehrere Themen aus dem Gebiet der Datenspeicherung. Gestaltung eines Plakats und Handouts zu einem der Themen, anschließend Vorstellung vor der Klasse (Zeitbedarf: 3-4 Stunden)

Leistungsdifferenziertes Arbeiten wäre hier möglich: Leistungsstärkere und schnellere Schülerinnen und Schüler machen sich in zusätzlichen Stationen über die Grundlagen der Leitungsvorgänge in Halbleitern vertraut. Es wäre auch möglich, solche Stationen für alle Schülerinnen und Schüler verpflichtend hinzuzufügen.

Alternative: Nach dem Praktikum Vermittlung der Grundlagen der Leitungsvorgänge in Halbleitern im Frontalunterricht.

## Zeitbedarf

Reine und dotierte Halbleiter, Fotowiderstand, NTC	2 Stunden
Halbleiterdiode, Solarzelle	2 Stunden
FET, Schaltungen	2 Stunden

## Lehrgangsskizze

### Die Halbleiterdiode als richtungsabhängiger Widerstand (P)

**V:** Elektrische Zahnbürste (Die elektrische Zahnbürste wurde schon mehrfach als Einstieg gewählt. Die analytisch-synthetische Erkenntnismethode bietet sich bei der Zahnbürste an: Analyse, d.h. Zerlegung in die einzelnen Bestandteile und Erörterung derer Funktion; Synthese, d.h. das Zusammensetzen der Einzelbestandteile in ihrer Funktion zu einem funktionierenden Ganzen.)

**Einstieg:** Zum Laden des Akkus einer elektrischen Zahnbürste wird Wechselspannung und damit Wechselstrom verwendet. Ein Akku kann jedoch nur mit Gleichstrom geladen werden. Wie kann dies bewerkstelligt werden?

Methodische Varianten: Planarbeit, Lernzirkel oder Demonstrationsexperiment im Vertikalaufbau (Stecksystem)

**S-V: Experimentelle Aufgabe:** (Es bieten sich der Schülerexperimentierkasten der Fa. Mekruphy „Elektrik 5“ oder Stecksysteme anderer Lehrmittelfirmen an.)

1. Durchlass- und Sperrrichtung einer Diode
2. Einweg-Gleichrichtung, Zwei-Weg-Gleichrichtung z.B. mit Baustein Graetzschaltung

**Ergebnis:** Eine Halbleiterdiode verhält sich wie ein elektrisches Ventil. Durch sie kann nur in einer Richtung Strom fließen. Dann ist die Diode in Durchlassrichtung gepolt. Im anderen Fall ist sie in Sperrrichtung gepolt. Die Diode ist ein **richtungsabhängiger Widerstand**.

Schaltsymbol der HL-Diode ins Heft zeichnen, Durchlass- und Sperrpolung kennzeichnen.

**Beantwortung des Leitproblems:** In der elektrischen Zahnbürste wird Wechselstrom durch eine Diode als Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt. Evtl. an defekter Zahnbürste zeigen.

(Damit ist das letzte fehlende Bauteil in der elektrischen Zahnbürste erklärt. Nun kann die Funktionsweise der elektrischen Zahnbürste: Ladevorgang durch elektromagnetische Induktion – Transformation auf Niederspannung - Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom – Antrieb durch Elektromotor umfassend erklärt werden.)



**SV: Untersuchung der Eigenschaften einer Silizium-Halbleiterdiode: Aufnahme der U-I-Kennlinie (Schaltung und Ergebnis wie [D9/10, S. 58, B2])** – evtl. als Schülerversuch mit Pocket-CASSY (siehe Skript M. Renner, ZPG II, Computerunterstützte Messwerterfassung im Schülerpraktikum)

**Beobachtung: Durchlasspolung:** Erst wenn an den Anschlüssen einer Si-Diode eine Spannung von ca. 0,6 V anliegt, beginnt ein merklicher Strom zu fließen. Diese Spannung heißt Schwellenspannung  $U_s$ . Erhöht man die Spannung weiter, so steigt der Strom sehr stark an: Bei einer Erhöhung um 0,1V steigt der Strom um ca. das 10fache des Ausgangswertes (exponentielles Wachstum). Fließt ein Strom, so fällt an der Si-Diode eine ungefähr konstante Spannung von ca. 0,7 V ab. In der Diode wird eine Leistung  $P = 0,7 \text{ V} \cdot I$  thermisch umgesetzt. Je höher der Strom, desto mehr Energie wird in der Diode umgesetzt. Diese Energie muss durch Kühlung abgeführt werden, sonst wird die Diode zerstört. Diese Leistung heißt Verlustleistung  $P = U_s \cdot I$ .

**Die U-I-Kennlinie** ist das Schaubild einer Exponentialfunktion.

**Sperrpolung:** In Sperrrichtung fließt ein sehr geringer Strom von ca. 1 nA, man nennt ihn Sperrstrom.

☛ [Praktikum Halbleiterdiode: Praktikum\\_Diode.docx](#) und ☛ [Praktikum Halbleiterdiode.docx](#)

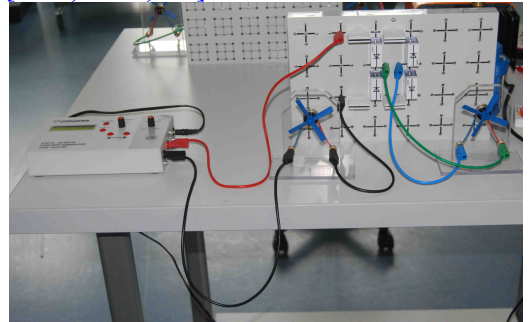
Weitere Arten von Dioden: evtl. Funktionsweise im **SV**: Leuchtdiode (LED), Fotodiode, Fotoelement (Solarzelle)  
Falls Zeit: Vorwiderstand berechnen üben!

Falls noch nicht behandelt: Gleichrichterwirkung der Graetz-Schaltung [DB2, S. 68, A1]

**V:** Graetz-Schaltung mit Stecksystem und Funktionsgenerator aufbauen, 1 Glockenanker-Solarmotor in Zuleitung, 1 Glockenanker-Solarmotor als Anzeiger für die Gleichrichtung, am Funktionsgenerator sehr kleine Frequenz einstellen

**Beobachtung:** Motor in Zuleitung bewegt sich abwechselnd nach rechts und links, der andere Motor dreht sich stets in die gleiche Richtung

**Graetz-Schaltung in** ☛ [Praktikum Halbleiterdiode.docx](#)



## Die Solarzelle (P)

Solarzelle als Energiewandler besprechen. Energieflussdiagramm zeichnen! Evtl. Wirkungsgrad einer Solarzelle ermitteln [I9/10, S. 231] ☛ [Praktikum Solarzelle.docx](#)

## Reine Halbleiter (W)

☛ [Power-Point mit Simulationen zu Halbleiter und Solarzelle: Halbleiter\\_Material1.pptx](#)

**Leitproblem:** Wie funktioniert eine Halbleiterdiode?

Wiederholung: Leiter und Isolatoren

**V:** Überprüfung der Leitfähigkeit von Kupfer – Glas – Silizium (oder anderer Halbleiter, z.B. Bleistiftmine)

Beobachtung:

**Kupfer:** Es fließt ein Strom: Kupfer hat einen geringen elektrischen Widerstand und eine hohe Leitfähigkeit → **Leiter**

**Glas:** Es fließt kein Strom. Glas hat einen großen elektrischen Widerstand und keine elektrische Leitfähigkeit → **Isolator**

**Silizium:** Es fließt kein Strom. Silizium hat einen großen elektrischen Widerstand und keine elektrische Leitfähigkeit → **Isolator???**

**Frage:** Wenn Silizium ein Isolator (Nichtleiter) ist, weshalb hat es dann so eine große Bedeutung auf dem Gebiet der Elektronik?

**V:** Erwärmung von Silizium

Beobachtung: Der elektrische Widerstand sinkt sehr stark, die Leitfähigkeit erhöht sich. Silizium wird zum Leiter → **Halbleiter**

Ergebnis: Reine Halbleiter verhalten sich bei geringen Temperaturen (Raumtemperatur) wie Isolatoren. Durch thermische Energiezufuhr oder durch Lichtenergie nimmt ihr Widerstand stark ab und damit ihre Leitfähigkeit zu. Beispiele für reine Halbleiter: Silizium ( $^{14}\text{Si}$ ), Germanium ( $^{32}\text{Ge}$ )

Falls Zeit: (Notwendig und sinnvoll, wenn Dotierung behandelt werden soll und ein Verständnis für die Leitungsmechanismen in Halbleitern aufgebaut werden soll.)

1. Erörtern des Aufbaus eines Silizium-Atoms
2. Darstellung der flächenhaften Struktur des Kristallgitters (jedes Si-Atom hat 4 Nachbaratome, je ein Elektron zweier benachbarter Si-Atome ergeben ein Bindungselektronen paar, gebundene Elektronen können sich bei Energiezufuhr lösen und es entsteht ein freies Elektron und ein positives „Loch“)
3. Eigenleitung des Halbleiterkristalls: Entstehung von Leitungselektronen durch Energiezufuhr
4. Evtl. Bändermodell zur Erklärung der elektrischen Leitfähigkeit (Valenzband, Leitungsband)
5. Zusammenfassung: Durch Energiezufuhr wird die Anzahl der beweglichen Ladungsträger im Halbleiter stark erhöht, damit steigt die Leitfähigkeit, der Widerstand sinkt.

SV: Einfache anwendungsorientierte Schaltungen mit Halbleiterbauelementen (Sensoren): Kaltleiter, Heißeiter, Fotodiode, LED, Fotodiode, ...

➡ [Praktikum Widerstandsmessung \(NTC-Widerstand\): Praktikum\\_Widerstandsmessung.docx](#)

## Die Dotierung von Halbleitern (W)

(Will man die Effekte im FET erklären, ist ein Verständnis von p- und n-Leitung erforderlich.)

Leitproblem: Ein Halbleiterkristall besitzt bei tiefen Temperaturen so gut wie keine Leitungselektronen. Ein PC, dessen Platinen zahlreiche Halbleiterbauelemente enthält, funktioniert jedoch auch bei Zimmertemperatur. Wie kann man erreichen, dass ein Halbleiterkristall schon bei tiefen Temperaturen zu einem Leiter wird?

Lösung: Man muss ihm „freie Elektronen zuführen“ oder „Löcher schaffen“.

Möglichkeit zum selbstständigen Arbeiten: Die SuS erarbeiten sich das gezielte Verunreinigen mit Fremdatomen anhand von vorgelegten Texten selbst. Zu erarbeiten sind die Begriffe n-Halbleiter, p-Halbleiter, Donator, Akzeptor sowie die damit verbundenen Leitungsmechanismen. Geeignete Skizzen sind hilfreich.

### Aufbau einer Halbleiterdiode und Erklärung der Ventilwirkung (W)

Ergebnis: Die Diode besteht aus einer p-leitenden, einer n-leitenden Schicht und einem pn-Übergang.

Interessantes: Herstellung einer Diode [C3, S. 403] und Chips [I9/10, S. 222]

Erklärung der Ventilwirkung: siehe oben („Vorgänge am pn-Übergang“) – Skizzen anfertigen [I9/10, S. 224]

## Der Transistor als steuerbarer Widerstand (P) – Feldeffekttransistor, kurz FET (W)

Einstieg: Überraschende Experimente zur Transistorwirkung, z.B.:

V1: Darlington-Schaltung [Mit Bipolartransistor: DB, blau, S. 276, B3]: Schließt ein Schüler die Kontakte A und B mit den Händen, so leuchtet die Lampe auf. Es ist möglich, dass sich alle Schüler der Klasse an den Händen fassen und so den Stromkreis schließen und das Lämpchen zum Leuchten bringen.

V2: Einfache Steuerschaltung, auch als Schülerexperiment geeignet: [Mit FET: DB2, S. 61, B2]

V3: Musikübertragung durch Licht [DB2, S. 61, B2]: Erkennen bekannter Bauteile: LED, Fotodiode, Lichtleiter, Glühlampe, Batterie: Erörtern ihrer Funktionsweise – anschließend Funktionsweise eines neues Bauteils (FET) erörtern: Stromsteuerung, praktisch leistungslose Steuerung, hohe Schaltfrequenz

M: Transistoren auf Platinen alter elektronischer Geräte zeigen

Leitproblem: In vielen elektronischen Geräten müssen elektrische Ströme blitzschnell gesteuert werden, möglichst unter geringem Energieaufwand. In Handys, Computern usw. wird diese Steuerung von (FE-) Transistoren übernommen. Wie funktionieren sie?

### Aufbau und Funktionsweise eines FET (W)

(funktionale Beschreibung genügt)



Kurze Darstellung mit Bildern: [\[DB2, S. 61, Vertiefung\]](#): Dabei die Begriffe Gate, Source und Drain erörtern  
Schaltskizze für V2 erörtern:

Ist  $U_{GS} = 0\text{ V}$ , so sperrt der Transistor. Ist  $U_{GS} = 9\text{ V}$ , dann leitet er. Der Strom  $I_D$  durch das Lämpchen kann also praktisch ohne Energieaufwand gesteuert werden.

Was geschieht, wenn die Spannung  $U_{GS}$  jedoch zwischen  $0\text{ V}$  und  $9\text{ V}$  liegt?

### Kennlinien eines FET (W)

**SV: Aufnahme der  $U_{GS}$ - $I_D$ -Kennlinie eines FET** [\[DB2, S. 61, V2, B3\]](#)

**Ergebnis:** (Hinweis: Werte abhängig vom verwendeten FET): Unter  $2,9\text{ V}$  fließt kein Strom. Die Strecke Source-Drain verhält sich wie ein geöffneter Schalter. Ab  $U_{GS} = 2,9\text{ V}$  steigt die Stromstärke  $I_D$  sehr stark an (steiler Verlauf der Kennlinie). Ab ca.  $3\text{ V}$  leitet die Strecke Source-Drain und verhält sich wie ein geschlossener Schalter.

**Erkenntnis:** Je größer die Potenzialdifferenz zwischen Gate und Source ist, desto kleiner ist der Widerstand zwischen Source und Drain.

**Der FET ist ein elektronisches Bauelement, mit dem man elektrische Ströme durch Verändern eines Potenzialunterschieds steuern kann.**

Erörterung: siehe [\[DB2, S. 62, Vertiefung\]](#)

Funktionen des Transistors:

- 1) Ist die Potenzialdifferenz zwischen Gate und Source groß genug, so fließt ein Strom, ansonsten fließt kein Strom. Der Transistor wirkt wie ein **Schalter**.
- 2) Vergrößert man die Potenzialdifferenz zwischen Gate und Source, so vergrößert sich die Stromstärke zwischen Source und Drain. Eine kleine Änderung der Potenzialdifferenz bewirkt eine große Änderung der Stromstärke. Der Transistor wirkt als **Verstärker**.

### Anwendungen des Feldeffekttransistors zum Steuern als Sensor und Verstärker (W)

*(Möglichkeit für die Behandlung einfacher elektronischer Schaltungen)*

Schülerpraktikum: Die folgenden Versuche aus [\[DB2, S. 61 - 68\]](#) lassen sich mit einfachen Mitteln selbst zusammenbauen. Es ist möglich, diese Versuchsaufbauten im NwT-Unterricht von den SuS selbst herstellen zu lassen. Alternativ findet man immer wieder interessierte Schülerinnen und Schüler, die Spaß daran haben, an einem Nachmittag gemeinsam mit dem Lehrer einige Experimentiermaterialien für den Einsatz im Schülerpraktikum anzufertigen.

V1: FET zum Steuern [\[DB2, S. 61, B2\]](#)

V2: FET als Flammensensor [\[DB2, S. 62, V1\]](#)

V3: Äußerer Fotoeffekt [\[DB2, S. 62, V2\]](#): Versuch gelingt nicht gut!

V4: Steuerung durch Influenz [\[DB2, S. 62, V3\]](#)

V5: Datenübertragung mit Licht (FET zum Steuern und Verstärken) [\[DB2, S. 63, V4 und B2\]](#)

V6: FET und LDR als Helligkeitssensor [\[DB2, S. 68, A9\]](#)

☛ [Praktikum zum FET \(Praktikumszirkel\) mit Materialliste und Bezugsquellen: Praktikum\\_zum\\_FET.doc](#)

**Ergebnis:** Der FET findet Anwendung zum Steuern sowie als Sensor und Verstärker. Die Steuerung erfolgt praktisch leistungslos, da zum Steuern keine elektrischen Ströme nötig sind.

Praktikum, jedoch mit bipolarem Transistor: ☛ [Praktikum\\_Transistoreffekt.docx](#)

### Kennlinien von elektrischen Geräten und Bauteilen (P)

Sollte das Praktikum zu den U-I-Kennlinien noch nicht in Klasse 7/8 durchgeführt worden sein (siehe Skript zur Einführung des elektrischen Widerstandes), bietet es sich an dieser Stelle als Zusammenfassung und Systematisierung an.

Ist das Praktikum bereits durchgeführt worden, bietet sich hier im Sinne der [Nachhaltigkeit](#) das folgende Praktikum mit der [Black-Box-Methode](#) an.

V: Nummerierte Black-Boxes mit verschiedenen elektrischen Bauteilen werden den SuS angeboten:

- a) Ohm'scher Widerstand
- b) Glühlampe
- c) Kaltleiter
- d) Diode
- e) ...

☛ Praktikum\_Black\_Box\_Kennlinien.doc

**Aufgabe:** Finde durch geeignete elektrische Messmethoden heraus, um welche dir bekannten elektrischen bzw. elektronischen Bauteile es sich hierbei handelt. Plane dazu einen Versuch. Beschreibe und begründe dein Vorgehen. Gehe dabei folgendermaßen vor:

1. Überlege zuerst, welche typischen elektrischen bzw. elektronischen Bauteile dir bekannt sind.
2. Erinnere dich an die Kennlinien dieser Bauteile und werde dir über Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Klaren.
3. Plane einen Versuch zur Untersuchung der Black-Boxes mit den auf dem Experimentiertisch gebotenen Materialien (Kabel, Vielfachmessgeräte oder computerunterstützte Messwerterfassungssysteme).
4. Zeichne einen Schaltplan und beschreibe mit Worten, wie du bei dem Versuch vorgehen wirst.
5. Führe die Versuche durch.
6. Werte die Versuche aus und ordne die Black-Boxes den Bauteilen zu.
7. Gib mögliche Fehlerquellen an!

Dieses Praktikum ist auch in der Kursstufe als Wiederholung und Erweiterung mit den Bauteilen Kondensator und Spule durchführbar.

**Weitere Praktika:**

☛ Praktikum U-I-Kennlinien 1: Praktikum\_U-I-Kennlinien.docx

☛ Praktikum U-I-Kennlinien 2: Praktikum\_U-I-Kennlinien.docx

☛ Praktikum und Simulationen mit Yenka: Simulationen\_Yenka\_U\_I\_Kennlinien.doc

## Einbeziehung außerschulischer Lernorte (W)

Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es immer lohnenswert, außerschulische Lernorte aus der näheren oder weiteren Umgebung in den Unterricht einzubeziehen. Schülerlabors findet man oft in der näheren Umgebung, an Universitäten usw.

Das Deutsche Museum in München bietet Physik-Werkstätten<sup>68</sup> zu verschiedenen Themengebieten der Physik an. Dazu kann man sich Forscherbögen aus dem Internet downloaden (z.B. Forscherbogen „Von Elektronen und Magneten“), diese an die Schülerinnen und Schüler austeilen und im Museum bearbeiten lassen. Eine anschließende Besprechung ist wichtig, eine Benotung möglich.

Auch das Technorama<sup>69</sup> in Winterthur bietet neben der allgemeinen Ausstellung einen sogenannten Campus, das frühere Jugendlabor, an. Diese Labore kann man für eine ganze Klasse an einem Vormittag mieten. Dieser Campus hat sich in letzter Zeit insbesondere auf das Thema „Atom- und Kernphysik“ spezialisiert und ist für das Unterrichtsthema „Struktur der Materie“ sehr zu empfehlen. Umfangreiche Erfahrungen dazu liegen vor. Ein vorheriger Besuch durch die Lehrerin oder den Lehrer zur Auswahl der geeigneten Versuche sowie zur Erstellung möglicher Aufgabenblätter ist anzuraten.

<sup>68</sup> <http://www.deutsches-museum.de/information/kids-co/forscherboegen/>

<sup>69</sup> <http://www.technorama.ch>