

# IPN Curriculum Physik

Unterrichtseinheiten für das 7. und 8. Schuljahr

## **Der elektrische Stromkreis als System**

Stromstärke — Spannung — Widerstand

Didaktische Anleitung

Die vorliegende Unterrichtseinheit ist Teil des überarbeiteten IPN-Curriculum Physik und umfaßt den Inhalt der drei Erprobungsfassungen:

6.4 Der elektrische Strom

7.4 Stromstärke und Widerstand

8.1 Die elektrische Spannung

Erscheinungsjahr 1981

Leicht gekürzte und überarbeitete Fassung

Hermann Härtel

Gastwissenschaftler am

ITAP - Institut für Theoretische Physik und Astrophysik

Universität Kiel

haertel@astrophysik.uni-kiel.de

# Inhaltsverzeichnis

<b>Fachdidaktische Überlegungen zur Konzeption, zum Lernprozeß und zur Sequenzierung</b>		
1	Vorbemerkung	5
2	Analyse des traditionellen Ansatzes	5
2.1.	Überblick über das zu behandelnde Sachgebiet	5
2.2.	Strukturierungsprinip	7
2.3.	Lerntheoretische Annahmen	7
3	Kritik	8
3.1.	Die Bedeutung des Systemaspektes	8
3.2.	Die Bedeutung von Schülervorstellungen	10
3.3.	Der Systemaspekt des elektrischen Stromkreises	1
3.4.	Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis	12
3.5.	Didaktische Aufarbeitung des Systemaspektes	14
4	Fachdidaktische Probleme bei der Behandlung des elektrischen Stromkreises	24
4.1.	Zur Bezeichnung einer wichtiger Begriffe	24
4.2.	Zur Einführung des Spannungsbegriffs	25
4.3.	Darlegung und Begründung des vorliegenden Unterrichtsvorschlages	28
4.4.	Zur Motivation	29
4.5.	Zur Sequenzierung der Teilthemen der Elektrizitätslehre	30
<b>Didaktisches Material zur Gestaltung des Unterrichts</b>		
5	Teilthema: Strom und Widerstand in Reihen- und Parallelschaltungen	31
5.1.	Systeme zum Transport von Energie	31
5.2.	Der Stromkreis und ähnliche Systeme	34
5.3.	Reihen- und Parallelschaltungen	43
6	Teilthema: Die elektrische Spannung	49
6.1.	Spannung und Druckunterschied	49
6.2.	Spannung bei Reihen- und Parallelschaltungen	54
7	Teilthema: Das OHMsche Gesetz	61
7.1.	Mathematische Formulierung der Systembeziehungen	61
7.2.	Lernziele	62
7.3.	Hinweise für den Unterricht	62
8	Teilthema: Anwendungen der Regeln des elektrischen Stromkreises	69
8.1.	Die Veränderbarkeit des Widerstandes	69
8.2.	Gefahren des elektrischen Stromes	71



# Fachdidaktische Überlegungen zur Konzeption, zum Lernprozeß und zur Sequenzierung

## 1. Vorbemerkung

Der Inhalt der hier vorliegend Unterrichtseinheit zum Thema "Der elektrische Stromkreis als System" umfaßt alle Begriffe und Regeln, wie sie in den Lehrplänen aufgeführt und in allen Lehrbüchern dargestellt werden. Die Unterrichtseinheit ist Teil des überarbeiteten IPN Curriculum Physik für das 7. und 8. Schuljahr (P7/8), wobei das Thema aber eher an das Ende des 8. Schuljahres gelegt werden sollte. Im Gegensatz zum traditionellen Unterricht wird in diesem Vorschlag das Gebiet in einem neuen Zusammenhang gesehen: Der zugrundeliegende Systemaspekt des Systems "Elektrischer Stromkreis" wird an den Anfang gestellt und dient als Basis für die nachfolgenden einzelnen Begriffe und Gesetze.

Die Begründung für diese Vorgehensweise wird im ersten Abschnitt ausführlich dargelegt. Sie stützt sich zum einen auf die Tatsache, daß der Systemaspekt ein fachlich wichtiger Aspekt ist, der Beziehungen verdeutlicht und Verständnis erleichtert. Zum anderen wird betont, daß Schüler häufig mit Vorstellungen über den Stromkreis in den Unterricht kommen, die sich auf andere Systeme beziehen. Hier erscheint eine Umorientierung durch die explizite Behandlung des zugrundeliegenden Systemaspekts notwendig, um überhaupt ein tieferes Verständnis zu ermöglichen.

Schließlich kann die ausführliche Behandlung des Systemaspekts einen Beitrag zum Einüben von Denkmustern () liefern, die in steigendem Maße durch moderne Technologie und wachsende Komplexität unserer Umwelt gefordert werden und mit den Begriffen „Systemdenken“, „kybernetisches Denken“, „vernetztes Denken“ zu kennzeichnen sind.

Der gesamte Stoff ist in die vier Themenbereiche

- Strom und Widerstand in Reihen- und Parallelschaltungen
- Elektrische Spannung
- OHMsches Gesetz
- Anwendungen der Regeln des elektrischen Stromkreises

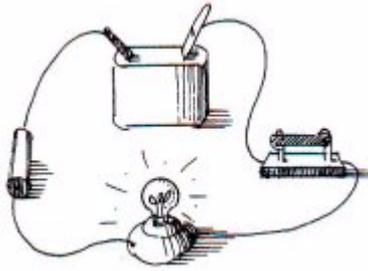
gegliedert. Dadurch wird die Möglichkeit geboten, den Inhalt auf kurze Epochen, unterbrochen durch andere Themen der Physik, zu verteilen.

Für die Schülerhefte und Testvorschläge sind die beiden letzten Themen zu einem Teil zusammengefaßt.

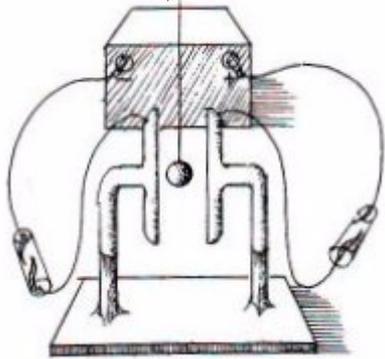
## 1. Analyse des traditionellen Ansatzes

### 1.1. Überblick über das zu behandelnde Sachgebiet

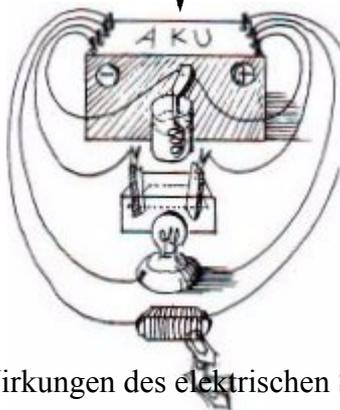
Das unter dem Thema "Elektrischer Stromkreis" gefaßte Gebiet der Physik ist gekennzeichnet durch die Stichworte Stromstärke, Spannung, Widerstand, OHMsches Gesetz, KIRCHHOFFsche Regeln. Es stellt einen wichtigen Bestandteil eines jeden Physikunterrichtes in der Sekundarstufe I in allen Bundesländern dar. Abgesehen von einigen Unterschieden in der Abfolge der einzelnen Abschnitte sowie in der Ausführlichkeit der Behandlung ergibt sich im Vergleich mehrerer neuerer Lehrbücher für die Sek. I etwa das folgende, relativ einheitliche Bild.



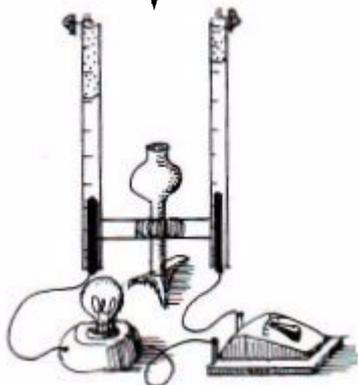
Bestandteile des elektrischen Stromkreises



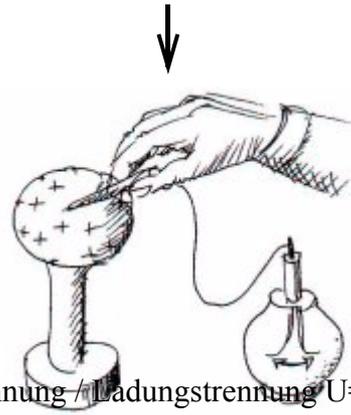
Fließen eines Stromes als Bewegung von Ladungsträgern (Elektronen)



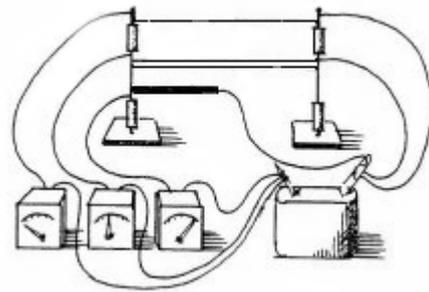
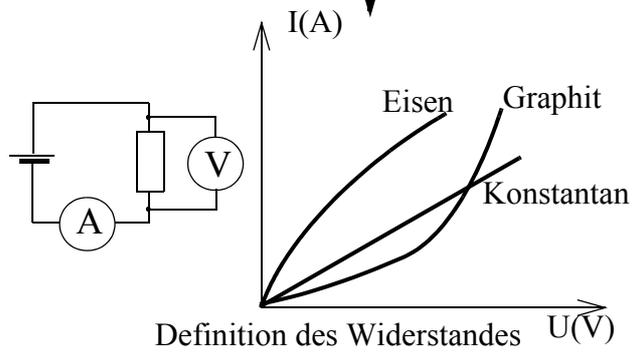
Wirkungen des elektrischen Stromes



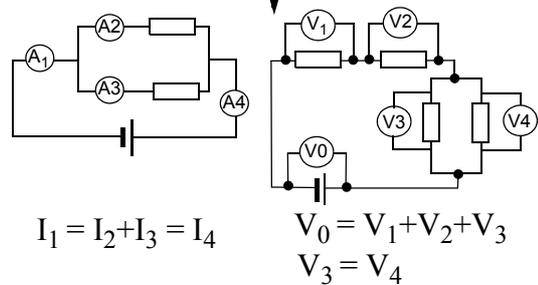
Stromstärke und Ladung ( $Q = I t$ )



Spannung / Ladungstrennung  $U = W/Q$



Abhängigkeit des Widerstandes von Temperatur und Form des Leiters



Kirchhoffsche Regeln

Im Anschluß hieran werden üblicherweise noch die Themen:

Elektromagnetische Induktion - Wechselspannung - Leitungsvorgänge - Elektronik behandelt.

## 1.2. Strukturierungsprinip

Auf der Suche nach einem Strukturierungsprinzip fällt - zumindest in allen neueren Lehrbüchern - eine starke Anlehnung an die Systematik von Grundgrößen und abgeleiteten Größen auf. Die Lehrbücher stellen zunächst als Einführung in das Sachgebiet den Stromkreis als ein geschlossenes, aus leitenden Teilen bestehendes System mit seinen wesentlichen Bestandteilen<sup>1</sup> dar. In vielen Fällen wird daran anschließend die Vielseitigkeit des elektrischen Stromes durch die Demonstration und Behandlung seiner verschiedenen Wirkungen aufgezeigt.

Spätestens an dieser Stelle wird jedoch die Vorstellung vom Fließen eines elektrischen Stromes eingeführt und zur weiteren Erläuterung der Strom als Bewegung von Ladungsträgern oder auch nur von Teilchen gedeutet. Es folgt die Einführung des Begriffs "Stromstärke" sowie die Festlegung der Einheit Ampere.

Nach Einführung der elektrischen Stromstärke als Grundgröße wird anhand einiger Versuche aus der Elektrostatik die Größe "Ladung" als

$$Q = I \cdot t$$

eingeführt. Ebenfalls wird die Spannung im Zusammenhang mit der Elektrostatik als elektrischer Zustand zwischen getrennten Ladungen ausgewiesen, als Voraussetzung für das Fließen des elektrischen Stromes gekennzeichnet und dann als quantitative Größe

$$U = \frac{W}{Q}$$

definiert.

Dieser aus der Elektrostatik abgeleitete Spannungsbegriff wird dann auf den Stromkreis als einem dynamischen System übertragen und führt mit Hilfe der durch die üblichen Versuche nachgewiesenen Proportionalität von Spannung und Stromstärke zu der Definition des Widerstandes

$$R = \frac{U}{I}$$

Die häufig schon parallel zu dieser Begriffseinführung behandelte Unterscheidung zwischen Reihen- und Parallelschaltung führt dann zu der Erarbeitung der beiden KIRCHHOFFSchen Regeln.

Der geschilderte Aufbau folgt somit ersichtlich der Systematik der Grundgrößen und der abgeleiteten Größen und basiert überwiegend auf der Einführung von Größen mit Hilfe mathematischer Beziehungen sowie von genau definierten Meßverfahren.

## 1.3. Lerntheoretische Annahmen

Unter diesem Blickwinkel sind zunächst die Modelle bzw. Modellvorstellungen von Bedeutung, die den Schülern als Verständigungshilfe angeboten werden. Hierzu findet sich in fast allen Lehrbüchern die Analogie zum fließenden Wasser, um eine Deutung des elektrischen Stromes zu erleichtern. Die Analogie zum fließenden Wasser findet vor allem bei Stromverzweigungen und dem Messen der Stromstärke vor und hinter einem Verbraucher ihre Verwendung. Darüber hinaus finden sich nur noch an wenigen Stellen Modelle zur Erläuterung anderer Begriffe wie etwa dem der Spannung.

Diese Vorsicht im Gebrauch von Modellen läßt sich deuten als ein Bemühen, einen späteren Lernfortschritt bei vertiefter Beschäftigung mit dem Thema nicht durch frühzeitige und notwendigerweise nur begrenzt gültige Modellvorstellungen zu blockieren. Somit ergibt sich das Bestreben, die physikalischen Größen möglichst nur durch ihre Meßvorschriften oder durch ihre

---

1.1. Dabei kann häufig an den Sachunterricht in der Primarstufe bzw. an den Physikunterricht der Orientierungsstufe angeknüpft werden.

mathematischen Beziehungen zu anderen Größen festzulegen und weitergehende Modellvorstellungen offenzulassen.

Dem vorsichtigen Umgang mit Modellen steht auf der anderen Seite eine deutliche Betonung des Experimentes und seiner Beweiskraft gegenüber. Jede Aussage und jede Begriffseinführung wird aufgrund von Experimenten und ihren Ergebnissen gefolgert. Diese Experimente werden besonders in neueren Lehrbüchern durch zahlreiche Abbildungen und Anregungen für eigene Versuche erläutert und bereichert. Dabei entsteht der Eindruck eines geschlossenen, in sich logischen Systems, das in eindeutiger und verständlicher Weise aus den Experimenten gefolgert werden kann. Hinweise auf grundlegende Verständnisschwierigkeiten, deren Ursache nicht in der mangelnden Auffassungsgabe des Lernenden, sondern in der Sache selbst begründet sind, fehlen.

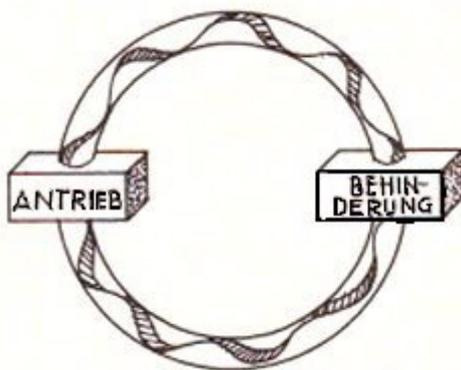
## 1. Kritik

### 1.1. Die Bedeutung des Systemaspektes

Eine Kritik der bisherigen Konzeption bezieht sich im wesentlichen auf das Fehlen einer ausführlichen Behandlung des Systemaspektes, der ein wesentliches Merkmal des elektrischen Stromkreises darstellt (vgl. Kap. 3). Unter Systemaspekt wird hier zunächst die Tatsache verstanden, daß der Stromkreis sich als ein Zusammenhang von verschiedenen Teilen konstituiert und nur unter bestimmten Bedingungen in diesem Zusammenhang funktioniert. Natürlich gelten diese Aussagen auch für andere Phänomene und Prozesse, und insofern stellen sie keine Besonderheit dar.

Jedoch liegt der Vorteil und die Bedeutung des Stromkreises gerade in der Tatsache, daß hier der Systemaspekt in besonders prägnanter und einfacher Weise hervortritt. Das System mit seinen Bestandteilen und Abgrenzungen muß nicht erst gebildet werden, es liegt materiell vor. Der Kreis als ein Grundmuster einer in sich geschlossenen Figur ist hier der für alle sichtbare Ausgangspunkt. Die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Bestandteilen ist relativ einfach zu überprüfen. Diese Einfachheit ergibt sich u.a. auch dadurch, daß die Vorgänge ohne zeitliche Verzögerung ablaufen. Letzteres gilt z. B. nicht in Systemen mit Lebewesen und führt dort erfahrungsgemäß zu besonderen Schwierigkeiten bei der begrifflichen Erfassung.

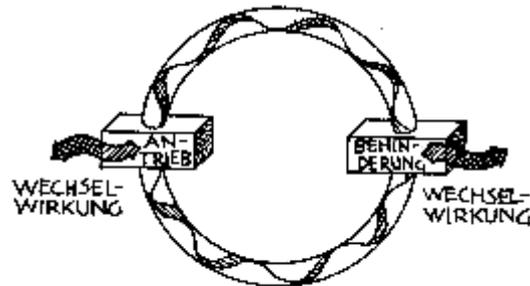
Zur Verdeutlichung des hier angesprochenen Systemaspektes sei zunächst ohne längere Begründung ein Muster vorgegeben, das den Systemzusammenhang des elektrischen Stromkreises in didaktisch aufgearbeiteter Form wiedergibt.



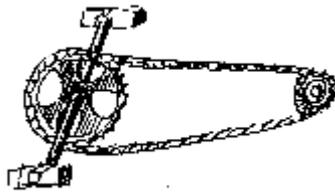
Der Stromkreis wird verstanden als ein energieübertragenes System, das im wesentlichen aus den folgenden drei Elementen besteht

Antrieb	entspricht	Spannung
Ein in sich geschlossener Materiestrom	entspricht	Elektrischer Strom
Behinderung	entspricht	Widerstand

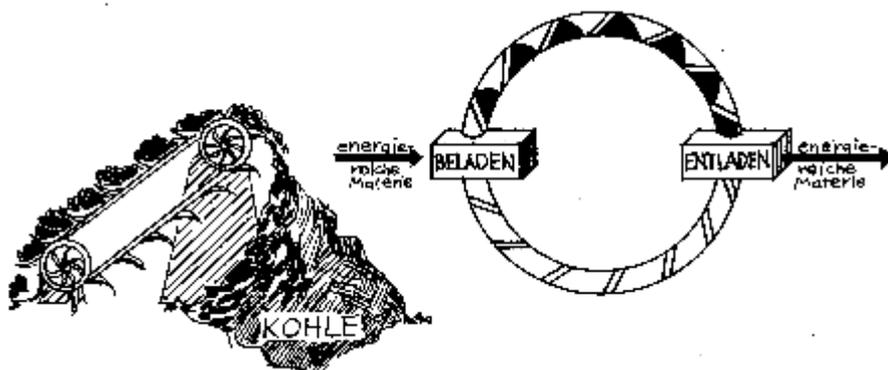
Zu dieser Struktur kommt noch die Wechselwirkung nach außen zur Aufnahme und Abgabe der Energie.



Eine einfache, den Schülern bekannte technische Realisierung eines solchen energieübertragenden Systems findet sich im Beispiel der Fahrradkette. Auf die Vorteile und Grenzen dieses Modells wird später ausführlich eingegangen.



Ein anderes energietransportierendes System ist beispielsweise das Förderband zum Transport von Kohle.



Auch hier liegt ein geschlossener Kreislauf vor, jedoch wird die Energie in Form von energiereicher Materie übertragen. Dieses System ist also nicht nur hinsichtlich der Energie, sondern auch hinsichtlich der zu transportierenden Materie offen. Bei einem solchen System wird somit Materie "verbraucht", beim Abschalten muß die Energie, die sich in der Leitung befindet, zusätzlich abgeführt werden, und Umschaltvorgänge sind nur mit einer gewissen Zeitverzögerung zu realisieren. Gegenüber dem Transportband ist ein Kettenantrieb ein weitaus besseres Modell für den Stromkreis und sollte deshalb als Hilfsvorstellung in den Unterricht einbezogen

werden.

Der hier angesprochene Systemaspekt des elektrischen Stromkreises wird ansatzweise auch in Lehrbüchern angesprochen, wenn der Stromkreis zu Beginn als ein in sich geschlossener Leiterkreis vorgestellt wird. Dieser geschlossene Kreis wird i. a. aber nicht besonders betont, sondern es folgt eine Hinwendung zu Einzelphänomenen und einzelnen Begriffen wie Strom, Stromstärke, Spannung usw. Will man jedoch die Einzelphänomene eines zusammenhängenden Systems behandeln, so tritt das Problem auf, einzelne Vorgänge erklären zu müssen, die eigentlich erst in Kenntnis des gesamten Systems verständlich gemacht werden können. Diese Schwierigkeit wird bei der Durchsicht von Lehrbüchern zu dem entsprechenden Sachgebiet an vielen Stellen deutlich.

Wird beispielsweise nach der Erläuterung des Stromes als Bewegung von Elektronen auf die Gefährlichkeit des elektrischen Stromes und auf die Notwendigkeit der "Erdung" verwiesen, so ist dieser Hinweis ohne eine Vorstellung von der Spannung sowie des mit der Erde zusammenhängenden Systems nicht verständlich. Wird daran anschließend auf die Gefahr eines "Kurzschlusses" bei schadhafter Isolierung hingewiesen, so gilt das gleiche.

Der Begriff "Spannung" wird z. B. mit Hilfe von elektrostatischen Versuchen als "elektrischer Zustand zwischen getrennten Ladungen" eingeführt und dann auf ein dynamisches System, nämlich das des elektrischen Stromkreises, übertragen. Was bedeutet dann ein "spannungsführender Phasenleiter"? Befinden sich an den Enden eines stromdurchflossenen Leiters getrennte Ladungen ?

Die Einführung des Widerstandes erfolgt ausschließlich über die Definition  $R = U/I$ . Alle Ergebnisse bezüglich des Gesamtwiderstandes von komplexen Schaltungen werden ausschließlich aufgrund entsprechender Strom- bzw. Spannungsmessungen entschieden oder mit Hilfe algebraischer Rechenvorschriften abgeleitet. Die entsprechenden Ergebnisse erscheinen somit als Folgerungen mathematischer Abstraktionen und werden nicht durch den Systemzusammenhang plausibel gemacht.

An dieser Stelle soll dieser Teil der Kritik, der zum Teil auch auf die Erprobungsfassungen des IPN Curriculum Physik (Unterrichtseinheit 7.4. und 8.1.) zutrifft, abgebrochen werden. In Kenntnis des in Teil B dieser Unterrichtseinheit dargelegten Unterrichtsvorschlages mag es leichter fallen, im Vergleich mit einem Lehrbuch bzw. dem eigenen Unterricht das hier postulierte Defizit in seiner Bedeutung abzuschätzen.

## **1.2. Die Bedeutung von Schülervorstellungen**

Wie schon erwähnt, werden in den Lehrbüchern einige Modelle angeboten, um die zugrundeliegenden Gesetze des elektrischen Stromkreises zu erläutern und plausibel zu machen. Es überwiegt aber bei weitem die Behandlung von Größen und Beziehungen mit Hilfe von Meßverfahren sowie mathematischen Verknüpfungen. Diese Schwerpunktsetzung soll, wie schon erwähnt, verhindern, daß ein späterer Lernfortschritt durch zu frühe Festlegung auf ein zu einfaches und somit evtl. "falsches" Modell blockiert wird. Dabei wird gleichzeitig angenommen, daß eine einmal vom Schüler erfaßte Modellvorstellung nur sehr schwer und häufig überhaupt nicht zu verändern ist.

Problematisch erscheint bei diesem Vorgehen, daß die Existenz von schon vorhandenen Schülervorstellungen als relativ unbedeutend eingeschätzt wird. Sicher ist allgemein bekannt, daß die Schüler nicht völlig neutral und unwissend gegenüber dem zu erlernenden Sachgebiet in den Unterricht kommen, sondern häufig schon mehr oder weniger bewußte und relativ ausgeprägte Vorstellungen mitbringen. Unterschiedlich ist aber wohl die Einschätzung der Hartnäckigkeit dieser Vorstellungen und der Möglichkeit, daß das Vorhandensein solcher Vorstellungen - wie z. B. die vom Stromverbrauch - gerade jeden Lernfortschritt blockiert.

Für den folgenden Unterrichtsvorschlag wird davon ausgegangen, daß das Aufgreifen und anschließende Problematisieren solcher Schülervorstellungen eine notwendige und fruchtbare

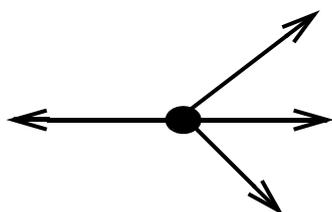
Lehrstrategie darstellt. Sie wird wesentlich unterstützt, wenn die Schüler mit anderen, teilweise erklärungs-mächtigeren Modellen konfrontiert werden. Das bloße Ersetzen von Schülervorstellungen durch die auf abstraktem Wege abgeleiteten Ergebnisse der Wissenschaft erscheint dagegen als ein mühsames und problematisches Vorgehen. Bei der Einführung neuer Modelle ist es allerdings wichtig, daß deren Funktion und besonders deren begrenzte Gültigkeit den Schülern beständig und nicht nur einmal zu Beginn des Unterrichts verdeutlicht wird. Diese Aufgabe ist sicher nicht leicht. Schüler halten oft die Aussagen und Erklärungen der Physik für absolute Wahrheit. Sie sind vom Standpunkt der Wissenschaftstheorie aus betrachtet naive Realisten, und möglicherweise verlieren sie bei zu starker Relativierung von angebotenen Erklärungen das Interesse.

Trotz dieser Schwierigkeit bleibt für didaktische Überlegungen zu berücksichtigen, daß die Geschichte der Physik durch zahlreiche grundlegende Wandlungen von Vorstellungen und Grundannahmen aller Art gekennzeichnet ist. Niemand weiß, ob der jetzt erreichte Stand endgültig und nicht mehr revidierbar sein wird.

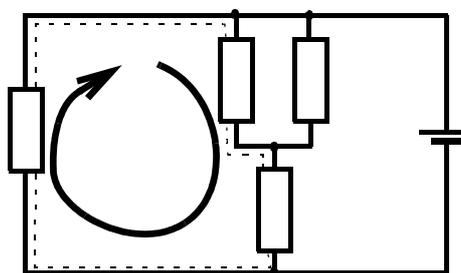
Somit sollte es das Ziel des Physikunterrichtes sein, neben den zahlreichen Fakten und Erklärungen auch das Wissen über die Vorläufigkeit und prinzipielle Revidierbarkeit sämtlicher wissenschaftlicher Theorien zu vermitteln. Diese Aufgabe kann sicherlich nicht in einem einzigen Schritt und in kurzer Zeit durchgeführt werden, sondern muß den gesamten Unterricht durchziehen. Die Behandlung verschiedener Modelle am Beispiel des elektrischen Stromkreises scheint im Sinne dieser Aufgabenstellung dazu besonders geeignet zu sein. Nähere Ausführungen zu den verschiedenen vorgeschlagenen Modellen sind im Kapitel 3 ausgearbeitet.

### 1.3. Der Systemaspekt des elektrischen Stromkreises

Betrachtet man die beiden KIRCHHOFFschen Regeln,



KNOTENREGEL  $\sum I_i = 0$



MASCHENREGEL  $\sum U_i = 0$

so werden daran zwei Betrachtungsweisen deutlich, die beide im Zusammenhang gesehen werden müssen, um den zugrundeliegenden Objektbereich angemessen zu beschreiben.

Die Knotenregel beschreibt das Verhalten an einem einzelnen isolierten Punkt. Die Maschenregel jedoch beschreibt den Zusammenhang des ganzen Systems bzw. eines Teilsystems. Erst beide Betrachtungsweisen zusammengenommen ergeben eine adäquate Beschreibung des gesamten Systems. Diese beiden Aspekte lassen sich nicht nur bei einer Betrachtung des gesamten Systems als grundlegend aufweisen, sie sind ebenfalls für das Verständnis der Größen "Spannung", "Strom" und "Widerstand" erforderlich bzw. hilfreich.

Der Strom läßt sich zum einen als Fließbewegung von Ladungsträgern an einem Ort beschreiben. Zum anderen wird durch die Wechselwirkung zwischen den Ladungsträgern der Strom an jedem Punkt des Systems durch jeden anderen Punkt beeinflusst.

Die Spannung ist einerseits eine Eigenschaft der Energiequelle, die auch ohne einen Stromkreis vorhanden ist und die die Voraussetzung für das Fließen eines Stromes darstellt. Zum anderen tritt Spannung zwischen je zwei Punkten des Systems "Stromkreis" auf und addiert sich in einem geschlossenen Kreis zu Null.

Der Widerstand ist einmal eine Materialeigenschaft, abhängig von Beweglichkeit und Zahl der

Ladungsträger. Darüber hinaus wird der Widerstand bestimmt durch die Art der Anordnung des Materials, sei es durch unterschiedliche Längen und Querschnitte oder durch Reihen- und Parallelschaltung.

#### **1.4. Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis**

Im Unterricht wurden vor allem zwei relativ verbreitete Schülervorstellungen angetroffen, die wegen ihrer Bedeutung im folgenden etwas ausführlicher dargestellt werden. Es sind dies die Vorstellungen vom Stromverbrauch sowie die Vorstellung von einzelnen, sich unabhängig voneinander bewegenden Teilchen.

##### **1.4.1. Die Vorstellung vom "Stromverbrauch"**

Die Existenz einer Vorstellung vom Verbrauch des Stromes bei Schülern ist ohne weiteres verständlich, wenn man den alltäglichen Sprachgebrauch in der Öffentlichkeit bedenkt und weiß, daß Schüler in der Familie häufig zu "sparsamerem Stromverbrauch" angehalten werden. Strom wird im alltäglichen Sprachgebrauch als Sekundär-Energieträger bezeichnet, ebenso wie Gas, Koks, Benzin. Somit ist es verständlich, daß Schüler unter Strom sowohl eine Materie als auch einen Energiefluß verstehen und ihnen der "Stromverbrauch" als Prozeß selbstverständlich erscheint.

Die Existenz solcher Vorstellungen ist sicher allgemein bekannt. Es wird jedoch häufig die Hartnäckigkeit unterschätzt, mit der Schüler an solchen Vorstellungen festhalten. Keinesfalls genügt es z. B., lediglich eine Messung der Stromstärke an verschiedenen Stellen im Stromkreis durchzuführen und anzunehmen, daß die Aussagekraft eines solchen Experimentes allein zu einer anderen Vorstellung bezüglich des "Stromverbrauches" bei allen Schülern führt. Vielmehr verhindert häufig die Vorstellung vom "Stromverbrauch" die Möglichkeit, die Bedeutung der betreffenden Strommessung überhaupt zu erkennen. Es gibt Schüler, die den Meßwert eines Strommeßgerätes demjenigen Teil des Stromes zusprechen, der nicht verbraucht wird. Die Verringerung der Anzeige des Strommeßgerätes bei einer Vergrößerung der Anzahl der Verbraucher in einer Reihenschaltung kann dann als Beleg für den erhöhten "Stromverbrauch" genommen werden. Damit soll verdeutlicht werden, wie wirkungslos die Demonstration einzelner Messungen gegenüber solchen Vorstellungen sein kann, und es soll noch einmal die Notwendigkeit einer ausführlichen Behandlung des Systemaspektes zu Beginn des Unterrichtes betont werden.

##### **1.4.2. Die Vorstellung vom "unabhängigen Einzelteilchen"**

Es ist vielen Schülern bekannt, daß der elektrische Strom als Bewegung von kleinen Teilchen mit einer elektrischen Ladung zu deuten ist. Durch den Chemieunterricht wird auch die Identifizierung dieser Teilchen als Elektronen nahegelegt. Von daher ist es nur verständlich, daß viele Schüler die Vorstellung entwickeln, daß sich diese Teilchen isoliert, d. h. ohne gegenseitige Wechselwirkung bewegen. Deutlich wird diese Vorstellung daran, daß Schüler immer wieder von einem Stau reden, wenn sie die Vorgänge vor einem Widerstand betrachten. Daß auch Fachdidaktiker von dieser Sichtweise nicht frei sind, zeigt eine Modellabbildung aus einem

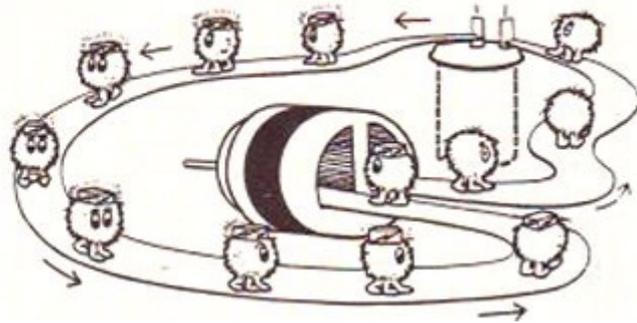
amerikanischen Curriculum<sup>1</sup>.



Elektroteilchen  
mit Energie



Elektroteilchen  
ohne Energie



Die Elektroteilchen bekommen in der Energiequelle ihre Energie, sie laufen dann zum Motor und geben dort ihre Energie wieder ab

Hier wird explizit auf die Darstellung einer Wechselwirkung zwischen den Teilchen verzichtet und die Ursache für die Bewegung ausschließlich in die Teilchen selbst verlegt.

Für das Entstehen solcher Vorstellungen von einzelnen, sich bewegenden Teilchen gibt es mehrere Erklärungen. Die Schüler kennen aus ihrer Umgebung Beispiele für Ströme (Verkehrsströme, Menschenströme), in denen gerade die Einzelteilchen sich mehr oder weniger automatisch bewegen. Auch bei dem Beispiel eines talwärts strömenden Flusses geschieht die Bewegung von einzelnen "Wasserteilchen" aufgrund der Erdanziehung und erscheint als relativ unabhängig von irgendwelchem Staus in großer Entfernung.

Es ist anzunehmen, daß das oben dargestellte Modell gerade aus dem Bestreben heraus entwickelt wurde, eine große Nähe zu solchen Schülererfahrungen herzustellen.

Weiterhin mag für die Vorstellung von isolierten Einzelteilchen die Tatsache verantwortlich sein, daß die über elektrische Felder und komplexe Elektron-Gitter-Wechselwirkungen erzeugte Wechselwirkung zwischen den freien Elektronen in dieser Altersstufe fachlich nicht angemessen vermittelt werden kann. Sie wird daher im Physikunterricht häufig überhaupt nicht angesprochen. Schließlich ist es möglich, daß es schlichtweg einfacher ist, sich einen Stromkreis, bestehend aus einzelnen relativ unabhängigen Teilchen, vorzustellen. In diesem Fall braucht der Lernende nur die Bewegung weniger Teilchen an einem Ort zu betrachten und kann das gesamte sonstige System außer acht lassen. Schwieriger und komplexer ist es, die Wechselwirkung zwischen allen Teilchen stets mitzudenken und immer das ganze System im Auge zu behalten. Liegt außerdem ein Fall vor, bei dem der Zusammenhang zwischen den einzelnen Teilchen nicht wie bei einer Kette sichtbar ist, sondern wie im Fall der strömenden Elektronen sich hinter dem abstrakten Begriff des "elektrischen Feldes" verbirgt, so ist diese Schwierigkeit sicherlich besonders groß. Es kann hier nichts darüber ausgesagt werden, inwieweit die Schwierigkeit, in Systemzusammenhängen zu denken, durch mangelnde Übung in der Lerngeschichte der Schüler oder durch die in der Sache begründete Komplexität hervorgerufen wird.

Für einen erfolgreichen Unterricht im Sinne des vorliegenden Ansatzes ist es jedoch notwendig, den Blick auf diese Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilchen zu richten und dadurch den Systemzusammenhang zu erkennen. Dies erfordert eine Abstraktion, die umso höher ist, je deutlicher nur die einzelnen Teilchen hervortreten, während der Zusammenhang zwischen den Teilchen hinter einem für Schüler abstrakten Begriff verborgen bleibt.

---

1. Aus: "Probing the Natural World", 1970

Die Vorstellung von unabhängig sich bewegenden Einzelteilchen behindert in entscheidender Weise ein tieferes Verständnis der Vorgänge beim elektrischen Stromkreis. Dies kann bei der Behandlung einer einfachen Reihenschaltung besonders gut verdeutlicht werden. Bei unabhängig sich bewegenden Einzelteilchen, wie z.B. bei Autos auf der Autobahn, hat ein zweiter in Reihe geschalteter Widerstand (eine Baustelle) nur dann einen Einfluß auf den Stromfluß, wenn er größer ist als der in Fahrtrichtung vorderer. Hier gilt das Prinzip vom Flaschenhalseffekt. Das größte Hindernis bestimmt den Durchfluß. Nur wenn eine sehr enge Kopplung zwischen den einzelnen Teilchen besteht und daher ein Aufstauen vor einem Widerstand unmöglich ist, wird jeder noch so kleine zusätzliche Widerstand zu einer Verringerung der gesamten Strömung führen.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich, wenn die Frage aufgeworfen wird, wieso die Teilchen bei einer Stromverzweigung aufgrund weit entfernter Widerstände sich im richtigen Verhältnis auf die beiden Stromzweige aufteilen. Diese und weitere Fragen lassen sich beantworten, wenn der Zusammenhang zwischen den Teilchen - die "Steifheit" des Elektronenringes - von Anfang an deutlich gemacht wird. In den Erprobungsklassen wurde diese Wechselwirkung zwischen den Elektronen ohne weitere Erklärung eingeführt und eine "Steifheit" des Elektronenringes postuliert. Dieses Postulat hat zunächst die gleiche Qualität wie z.B. das von der Erhaltung der Ladung. Es kann allerdings, wenn notwendig, noch auf die elektrostatischen Kräfte zwischen elektrischen Ladungen zurückverwiesen werden.

### **1.5. Didaktische Aufarbeitung des Systemaspektes**

Der in dieser Unterrichtseinheit vorgeschlagene Unterrichtsverlauf zur Behandlung des Systemaspektes des elektrischen Stromkreises ist wesentlich bestimmt durch die Einbeziehung von Modellen. Dabei soll unter einem Modell ein sog. Analogiemodell verstanden werden, das der sinnlichen Wahrnehmung zugänglich ist und das dazu dient, Hypothesen für den Stromkreis durch Analogiebetrachtungen aufzustellen. Das Arbeiten mit solchen Analogiebetrachtungen kann auch dazu dienen, zunächst völlig überraschende Ergebnisse (z.B. gleiche Spannung bei Parallelschaltungen) plausibel zu machen. Der Nutzen von Modellen wird jedoch häufig wegen des zu engen Gültigkeitsbereiches und wegen eventuell auftretender Blockierung für spätere Lernprozesse sehr unterschiedlich beurteilt. Welche Anforderungen sind an ein in der Schule zu vermittelndes Modell bezüglich des elektrischen Stromkreises zu stellen?

#### **1.5.1. Allgemeine Anforderungen an Modelle für den elektrischen Stromkreis**

Das Gebiet der Elektrizitätslehre ist bekanntermaßen ein gutes Beispiel für die Notwendigkeit, bei physikalischen Erklärungen und Theoriebildungen auf Modelle zurückgreifen zu müssen. Die mikrophysikalischen Vorgänge in den Leitern und den anderen Elementen sind nur über ihre verschiedenen Wirkungen zu erkennen. Ein Zugriff über die direkte sinnliche Wahrnehmung ist prinzipiell ausgeschlossen, und somit sind Modelle für die Ermöglichung anschauungsgebundener Denkvorgänge notwendig.

In Kenntnis der am weitesten entwickelten Modelle und Theorien der Fachwissenschaft, die z.B. mit den Begriffen MAXWELL-Gleichungen, FERMI-Statistik, Bänder-Modell, Streu-Theorie u. a. verknüpft sind, gerät der Fachmann leicht in Versuchung, alle didaktischen Modellbildungen, die notwendigerweise nur einen relativ eng begrenzten Gültigkeitsbereich haben, als falsch bzw. unbrauchbar zu bezeichnen. Bei dieser Ablehnung ist häufig die Befürchtung ausschlaggebend, daß bei der Benutzung solcher falschen Modelle eine später zu erlernende Erkenntnis behindert oder sogar blockiert wird. Diese Befürchtung wird besonders bestärkt durch die Tatsache, daß bei der Erklärung elektrischer Phänomene i. a. mechanische Modelle herangezogen werden und somit eine durchgängig "falsche" Vorstellung unterlegt wird.

Daß eine solche Befürchtung nicht dazu führen sollte, den Unterricht frei von Modellvorstellungen führen zu wollen, wurde schon erwähnt. Zur Vermeidung solcher Blockierungen müssen jedoch zwei Bedingungen erfüllt werden. Zum einen muß klargestellt werden, welche An-

forderungen an das den Schülern zu vermittelnde Modell aus fachlicher Sicht gestellt werden und welche der zur Verfügung stehenden Modelle diese Anforderungen am besten erfüllen. Zum anderen ist bei einer Verwendung von Modellen im Unterricht die Forderung aufzustellen, daß die Lehrer nicht nur einmal zu Beginn, sondern während des ganzen Unterrichtes die Funktion des Modells für den Lernprozeß sowie innerhalb der Wissenschaft den Schülern deutlich machen. Dies bedeutet u. a., daß die Lehrer sehr genau die Grenzen des verwendeten Modells kennen und wissen, wo die Gefahr für die Bildung und Verfestigung sogenannter falscher Vorstellungen liegt. Ihre Aufgabe besteht dann darin, diese Grenzen an den geeigneten Stellen immer wieder anzusprechen und zu problematisieren.

### **1.5.2. Spezielle Anforderungen an Modelle für den elektrischen Stromkreis**

Das gesamte in der Sekundarstufe I zu behandelnde Gebiet der Elektrizitätslehre, das auf die Behandlung des elektrischen Stromkreises folgt, umfaßt etwa die folgenden Stichworte:

- Elektromagnetische Induktion
- Wechselstrom, Wechselspannung
- Elektrische Maschinen
- Transformatoren
- Elektrisches Feld
- Leitungsvorgänge in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern
- Halbleiter, Bauelemente
- Verstärkerschaltungen
- Kondensator/Induktivität/Schwingkreis

Diese Einzelthemen werden je nach Schulart und Wahlfach unterschiedlich intensiv behandelt. In der Sekundarstufe II kommt neben einer mathematischen Durchdringung und Ausweitung dieser Teilthemen das Gebiet der elektromagnetischen Wellen hinzu. Im Studium schließlich werden zunächst die MAXWELLSchen Gleichungen als Zusammenfassung aller elektrischen Phänomene behandelt. Änderungen an den zugrundeliegenden Vorstellungen über Raum, Zeit, Feldvektoren und Ladungsträger sind dann noch notwendig durch die Anforderungen der Relativitätstheorie und der Quantenphysik sowie der BOSE- und EINSTEIN-Statistik.

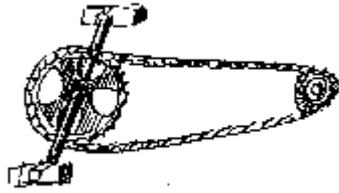
Angesichts dieser Sachlage ist für die Sekundarstufe I die Vermittlung eines notwendigerweise sehr begrenzt gültigen Modells für den elektrischen Stromkreis unvermeidbar. Es läßt sich nur fragen, wie ein solches Modell beschaffen sein muß, damit es das Verständnis für die Phänomene des Wechselstromes erleichtert, zum Verständnis für den Aufbau von Feldern längs Leitern und in Kondensatoren beiträgt und ebenfalls bei einer mikrophysikalischen Betrachtung zu den Vorstellungen von Elektronen und Ladungsträgern führt. Eine adäquate Modellvorstellung zum elektrischen Stromkreis für die Sekundarstufe I sollte somit zu folgenden Auffassungen führen:

- In einem Stromkreis befinden sich bewegliche Ladungsträger, deren Anzahl nicht verändert werden kann. In diesem Sinne ist das System abgeschlossen.
- Die Bewegung der Ladungsträger kann nur im ringförmigen Zusammenhang erfolgen, so daß keine Stauungen (Raumladungen) auftreten. (Ausnahmen, wie etwa im Kondensator oder bei den Gasentladungen, entstehen durch besondere äußere Bedingungen.)
- Die Energiequelle erzeugt ein elektrisches Feld, das längs der elektrischen Leiter geführt wird und an bestimmten Stellen entweder durch starke Behinderung des Elektronenflusses oder durch magnetische Kopplung in der Lage ist, Energie zu übertragen.
- Die Kollektivbewegung der Ladungsträger in Richtung des Feldes ist in sofern unbedeutend als ihre Masse ausgesprochen gering ist. Sie können deshalb wechselnden Feldern praktisch trägheitsfrei folgen.

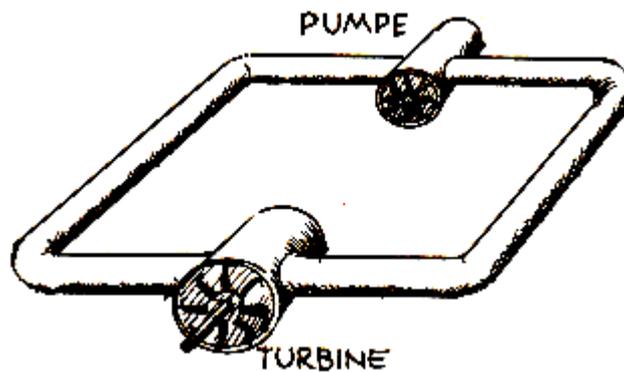
### **1.5.3. Vergleich verschiedener mechanischer Modelle**

Betrachtet man vor diesem Hintergrund die verschiedenen technischen Realisierungen zur

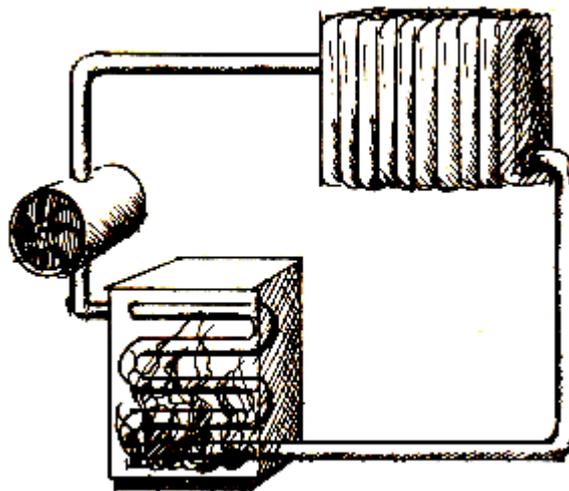
Übertragung von Energie als mögliche Modelle für den elektrischen Stromkreis, so zeigen drei verschiedene Modelle eine relativ ähnliche Struktur. Es sind dies  
Der Kettenantrieb oder der Transmissionsriemen



Der geschlossene Wasserkreis (langsame Wasserströmung)



Die Warmwasserheizung



Allen drei Modellen ist die Abgeschlossenheit und die kreisförmige Bewegung der beweglichen Materie gemeinsam. Darüber hinaus führt das Modell der Warmwasserheizung jedoch in eine falsche Richtung. Die Energie wird hier nicht mit Hilfe einer gerichteten Kraft und einer daraus resultierenden Kollektivbewegung übertragen, sondern als innere Energie des Wärmeträgers. Somit verhalten sich Abschaltvorgänge oder Umschaltvorgänge im Vergleich zum elektrischen Fall gänzlich anders.

Wesentlich weiter führt das Ketten- oder Transmissionsriemenmodell. Hier dient das Material

hauptsächlich zur Kraftübertragung. Die Masse und Geschwindigkeit der Kettenglieder sind klein genug, so daß die Vorstellung nicht aufkommen kann, ihre kinetische Energie habe etwas mit der Energieübertragung durch die Kette zu tun. Ein Nachteil des Kettenmodells ist, daß man nicht so leicht Abzweigungen, beispielsweise für Parallelschaltungen, bauen kann.

Für verzweigte Stromkreise ist das Wassermmodell sicher die bessere Lösung. Damit die Analogie zum elektrischen Stromkreis gewahrt bleibt, darf die Strömung nicht zu schnell sein, so daß die kinetische Energie des strömenden Wassers keine merkliche Rolle spielt. Ist die Strömung jedoch langsam, dann müssen die Differenzen der Drucke vor und hinter Strömungswiderständen groß sein, damit genügend Energie umgesetzt wird.

Wie jedes Analogmodell, so hat auch dieses seine Grenzen. Für den Unterricht wohl weniger bedeutend ist, daß die bewegliche Substanz des Wasserkreises leicht vorzeigbar ist, sie läuft heraus, wenn man den Kreis öffnet. Aus einem aufgeschnittenen Draht kommt jedoch nichts heraus. Wesentlicher ist, daß sich für das magnetische Feld des elektrischen Stroms keine Entsprechung beim Wasserkreis finden läßt. Analogien beispielsweise zum Transformator oder zum Elektromotor lassen sich mit Wasserströmungen nicht oder vielleicht nur auf sehr künstliche Weise herstellen. Modellgrenzen können aber didaktisch sinnvoll genutzt werden, indem man an ihnen verdeutlicht, warum und in welcher Richtung das Modell verändert werden muß und wo es seine (vorläufige) Gültigkeit behält. Übereinstimmung und Grenzen des Wassermodells gegenüber dem derzeit gültigen Modell des elektrischen Stromkreises sind in der folgenden Tabelle noch einmal zusammengefaßt.

#### 1.5.4. Übereinstimmung bzw. Analogie zwischen Stromkreis und Wasserkreis

STROMKREIS	und	WASSERKREIS
<b>STROM</b>		
Bewegung von Ladungsträgern in einem abgeschlossenen Kreis		Bewegung des Wassers in einem abgeschlossenen kreisförmigen Rohr
Menge der pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt fließenden Ladungen		Menge des pro Zeiteinheit durch einen Querschnitt fließenden Wassers
Erhaltung der Ladung		Erhaltung der Wassermenge
1. KIRCHHOFFSche Regel: $I_G = I_1 + I_2$		Regel: $I_G = I_1 + I_2$
<b>WIDERSTAND</b>		
Widerstand eines Leiterelements		Strömungswiderstand eines Rohrelementes
Widerstand einer Schaltung		Strömungswiderstand eines Rohrsystems
Spannung an den Anschlüssen einer Energiequelle		Druckunterschied an den Anschlüssen einer Pumpe
<b>SPANNUNG</b>		
Spannung an einem stromdurchflossenen Widerstand		Druckunterschied an einem wasserdurchflossenen Rohr
2. KIRCHHOFFSche Regel $U_G = U_1 + U_2 + \dots$		Regel: $\Delta P_G = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots$
$U_1 = U_2$ bei Parallelschaltungen		$\Delta P_1 = \Delta P_2$ bei parallelen Rohrelementen

### 1.5.5. Nichtübereinstimmung zwischen Stromkreis und Wasserkreis

STROMKREIS	WASSERKREIS
Magnetfeld	-----
Vernachlässigbare Trägheit der Ladungsträger	Relativ große Trägheit des Wassers
Abschalten durch Öffnung des Kreises	Abschalten durch Öffnen des Kreises nicht möglich
Vorhandensein von positiven und negativen Ladungsträgern	Vorhandensein von nur einer Art von bewegter Materie
-----	Wirbelbildung Turbulenz
-----	Stau- und Strömungsdruck
Verschiedene Möglichkeiten der Energieumwandlung	-----

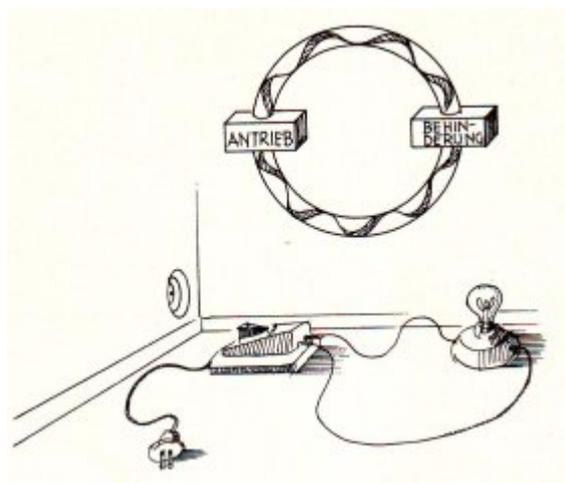
### 1.5.6. Die grundlegenden Elemente des Systems

Versucht man, ein gemeinsames, möglichst einfaches Muster für die drei Systeme

- Kettenantrieb/Transmissionsriemen
- Wasserkreislauf
- Stromkreis

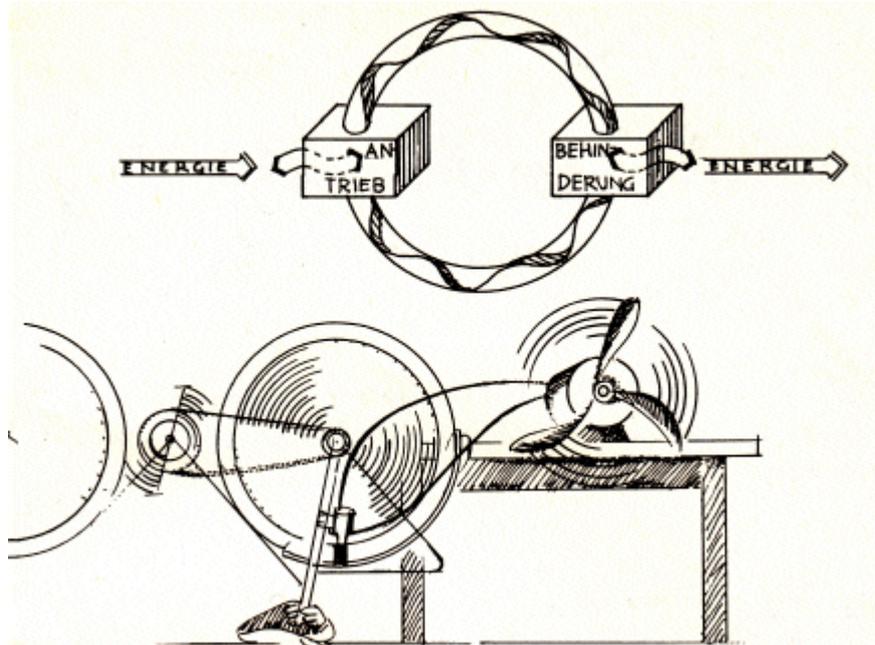
festzulegen, so ergibt sich die folgende Struktur, bestehend aus drei wesentlichen Elementen:

1. Antrieb (für den Materiefluß)
2. Ein in sich geschlossener Materiefluß
3. Ein Ort, an dem der Materiefluß in seiner Bewegung behindert wird.



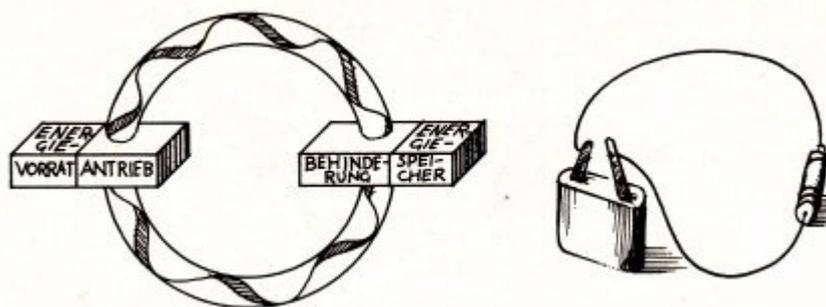
Diese Beschreibung beschränkt sich jedoch auf den Materiefluß und die dadurch vorgegebene Abgeschlossenheit des Systems. Damit das System in Aktion treten kann, bedarf es noch einer Erweiterung hinsichtlich des Energiedurchflusses. Diese Erweiterung kann ganz allgemein in der

Form von Wechselwirkungsprozessen bei der Energie-auf- und abgabe beschrieben werden.



Dieses Grundmuster beschreibt z. B. (wie im unteren Bildteil dargestellt) einen von außen angetriebenen Generator, der seinerseits einen Motor antreibt.

Ein Spezialfall liegt vor, wenn die Energiequelle aus einer Batterie besteht und der Widerstand die Energie in der Form von Erwärmung aufnimmt. In diesem Fall ist es begrifflich schwierig, den Antrieb und die Behinderung des Materieflusses von dem Prozeß der Energieaufnahme bzw. -abgabe zu trennen. Somit empfiehlt es sich, für diesen einfachen Fall das Grundmuster um einen Energievorrat (Batterie) und einen Energiespeicher (für die umgewandelte Energie) zu erweitern.



Dieses Grundmuster, das in der ersten Unterrichtsphase zu entwickeln ist, sollte die Basis für den gesamten auf den Stromkreis bezogenen Unterricht bilden.

### 1.5.7. Gleichgewichtsbetrachtungen und die Behandlung des Ohmschen Gesetzes

Die Herausarbeitung der Grundstruktur des elektrischen Stromkreises dient nicht nur zur Problematisierung vorhandener Schülervorstellungen und zur besseren Erfassung der Begriffe "Strom", "Spannung" und "Widerstand". Dieses Vorgehen erleichtert, wie im folgenden noch näher gezeigt wird, auch den Zugang zur Entwicklung des OHMschen Gesetzes. Außerdem wird das Verständnis für einen Zustand, der üblicherweise als Kurzschluß bezeichnet wird, wesentlich erleichtert.

Als Zugang für diese Erweiterung ist es notwendig, die Betrachtung eines Gleichgewichtes zwischen einer beschleunigenden und behindernden Wechselwirkung (Antrieb und Behinderung) des Materieflusses mit seiner Umgebung einzuführen. Diese Betrachtung führt zu der Erkenntnis, daß die sich stationär einstellende Geschwindigkeit des Materieflusses ein Ergebnis des

Gleichgewichtes zwischen Antrieb und Behinderung darstellt.

Ein Kurzschluß liegt nun vor, wenn die Behinderung für den Materiefluß fehlt, so daß sich kein Gleichgewichtszustand ausbilden kann.

Dies muß zu einer ständig anwachsenden Geschwindigkeit und schließlich zu einem Zusammenbruch des Systems führen. Supraleitende Stromkreise bilden eine Ausnahme, in denen die Energiequelle aber nur für sehr kurze Zeit wirksam sein darf.

Ist jedoch ein solches Fließgleichgewicht zwischen Antrieb und Behinderung des Materieflusses für die Schüler vorstellbar, so ergeben sich ohne weiteres die folgenden drei halbquantitativen Beziehungen zwischen den drei Größen Antrieb / Materiefluß / Behinderung.

	Antrieb	Materiefluß	Behinderung
Wenn der Antrieb konstant bleibt und die Behinderung kleiner wird, dann wird der Materiefluß größer.	konstant		
Wenn der Materiefluß konstant bleiben soll, muß der Antrieb größer werden, falls die Behinderung größer wird.		konstant	
Wenn die Behinderung konstant bleibt und der Antrieb größer wird, dann wird der Materiefluß größer.			konstant

Diese Beziehungen stellen eine Vorstufe der Beziehung  $R = U/I$  dar.

Sie müssen im Unterricht im Anschluß durch entsprechende Messungen als Proportionalitäten bzw. umgekehrte Proportionalitäten ausgewiesen werden.

Eine ausführliche Darstellung dieser Vorgehensweise ist unter „2.4. Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung“ angegeben. Bei dieser Einführung wird u. a. deutlich, daß die drei Größenbegriffe U, I und R derart zueinander in Beziehung gesetzt werden, daß keiner der Begriffe durch die beiden anderen vollständig definierbar ist. Diese Gleichwertigkeit widerspricht der traditionellen Behandlung dieses Gesetzes, bei der üblicherweise der Widerstand ausschließlich über die Definition

$$R = \frac{U}{I}$$

eingeführt wird. Eine solche Beziehung kann aber allenfalls als operationale Definition aufgefaßt werden, die nur ein Meßverfahren festlegt, aber nicht den Begriffsinhalt.

Daß der Widerstand nicht in jedem Fall durch den Ausdruck  $U/I$  zu ersetzen ist, kann an dem Beispiel des Sättigungsstromes in einer Elektronenröhre gezeigt werden. In diesem Fall ist die Stromstärke unabhängig von der angelegten Spannung ausschließlich durch die Temperatur des Glühfadens festgelegt. Es erscheint wenig sinnvoll, in diesem Fall von einem Widerstand der Röhre  $R = U/I$  zu sprechen, der aufgrund der zufällig anliegenden Spannung einen relativ beliebigen Wert annehmen kann. Vielmehr wird in dem vorgeschlagenen Unterricht von einem Widerstandsbegriff ausgegangen, der unabhängig von U und I einen bestimmten physikalischen Sachverhalt beschreibt.

Die Gleichheit zweier Widerstände wird postuliert, wenn bei gleicher Spannung der gleiche Strom fließt.

Konstanz eines Widerstandes wird postuliert, wenn Spannung und Stromstärke proportional zueinander sind.

Wird diese Proportionalität experimentell festgestellt, so folgt daraus, daß es keinen direkten Einfluß der Spannung bzw. des Stromes auf das Widerstandsverhalten in einem Leiter (Widerstand) gibt. Faßt man die Veränderung des Widerstandes durch die Temperatur als eine indirekte Wirkung auf, die auch durch andere thermische Einwirkungen hervorgerufen werden kann, so gilt diese Gleichung für einen weiten Bereich aller Leitungsvorgänge.

Die Definition (genauer operationale Definition)

$$R = \frac{U}{I}$$

legt dann nur den quantitativen Wert des Widerstandes fest, definiert aber nicht vollständig den ganzen Begriffsinhalt.

### **1.5.8. Überlegungen zum Systemdenken**

Ein wesentlicher Aspekt der modernen Wissenschaft, der ihre gesamte Geschichte kennzeichnet, ist die Tendenz zu immer schärferer Analyse und Spezialisierung. Erst mit dem Aufkommen der Kybernetik im Gefolge neuer Technologien auf dem Gebiet der informationsverarbeitenden Maschinen sowie durch die Entwicklung der Biologie im Sinne einer Ökologie ist eine Tendenz spürbar, die verstärkt die Integration verschiedener Teilaspekte sowie die Betrachtung komplexer Systeme notwendig macht. Die Forderung nach einer Ausbildung des "Denkens in Systemen" wird verstärkt auch an die Schule gestellt.

Da in der hier vorliegenden Konzeption in besonderem Maße die Behandlung eines Systemaspektes gefordert wird, soll im folgenden kurz behandelt werden, welche Konsequenzen hierdurch hinsichtlich der erforderlichen Denk- und Lernprozesse auftreten können. An dieser Stelle kann allerdings keine ausführliche und vollständige Diskussion dessen erfolgen, was unter Systemdenken zu verstehen ist. Vielmehr sollen nur einige wenige Überlegungen die Probleme andeuten, die bei der Behandlung des hier vorgeschlagenen Unterrichtes zu beachten sind.

Als einen der zentralen Begriffe im Zusammenhang mit dem Systemdenken wird der Begriff der Wechselwirkung angesehen. Dieser Begriff ermöglicht es, sowohl ein System abzugrenzen und gleichzeitig die Beziehungen zu dem ausgegrenzten System herzustellen als auch eine Zerlegung im Innern zu ermöglichen. Der Begriff der Wechselwirkung überwindet zudem das einseitige kausale Denken, in dem stets nur lineare, von der Ursache ausgehende Wirkungen gedacht und gesehen werden. Wechselwirkung bedeutet dagegen, daß es trotz eines richtungsgebundenen sichtbaren Vorganges notwendigerweise eine gegenseitige Einwirkung und Rückwirkung gibt. Ein solches Denken führt zu Gleichgewichtsbetrachtungen, wenn die gegenseitige Einwirkung zweier Systeme nicht mehr durch eingebaute zeitliche Verzögerungen in Ursache/Wirkungskreisläufen aufgelöst werden können.

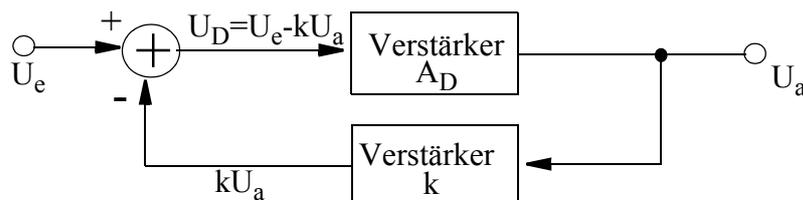
Eine solche zeitliche Auflösung ist z. B. häufig in biologischen Regelkreissystemen möglich. In diesen Systemen ist eine Störung (z. B. Klimawechsel) genau zeitlich zu lokalisieren und kann dann auch mit einer gewissen Verzögerung von Teilsystem zu Teilsystem verfolgt werden.

Dagegen ist eine solche zeitliche Auflösung nur noch schwer möglich, wenn die Rückkopplung mit Lichtgeschwindigkeit, d. h. praktisch momentan erfolgt. Dies ist üblicherweise bei rückgekoppelten Systemen in der Elektronik der Fall.

Bei der Beschreibung solcher Systeme wird eine zeitliche Auflösung zwar auch oft zur Erklärung versucht, aber dann doch nicht konsequent durchgehalten. Die Beschreibung der zeitlichen Abfolge einer Rückkopplung müßte die Möglichkeit von Schwingungen und auch Aufschaukelungen berücksichtigen und den stabilen Endzustand in einer sehr detaillierten und komplizier-

ten Betrachtungsweise ermitteln. Wie das folgende Beispiel zeigt (aus TIETZE/SCHENK, HalbleiterSchaltungstechnik, München 1977, S. 93), wird dieser Ablauf frühzeitig abgebrochen. Die damit zum Ausdruck kommende Betrachtung eines Gleichgewichtszustandes wird allerdings nur in Form einer algebraischen Gleichung dargestellt.

"Zur qualitativen Untersuchung der Schaltung in Abb. 6.8. lassen wir die Eingangsspannung von Null auf einen positiven Wert  $U_e$  springen. Im ersten Augenblick ist die Ausgangsspannung  $U_a$  und damit auch die rückgekoppelte Spannung  $kU_a$  noch gleich Null. Dadurch tritt am Verstärkereingang die Spannung  $U_D = U_e$  auf. Da diese Spannung mit dem hohen positiven Wert  $A_D$  verstärkt wird, steigt  $U_a$  schnell auf positive Werte an und damit auch  $kU_a$ .



Dadurch verkleinert sich die Verstärkereingangsspannung  $U_D$ . Die Tatsache, daß die Ausgangsspannungsänderung der Eingangsspannungsänderung entgegenwirkt, ist typisch für die Gegenkopplung. Man kann daraus folgern, daß sich ein stabiler Endzustand einstellen wird. Er ist dann erreicht, wenn die Ausgangsspannung gerade so groß geworden ist, daß die Bedingung

$$U_a = A_D U_D = A_D (U_e - KU_a)$$

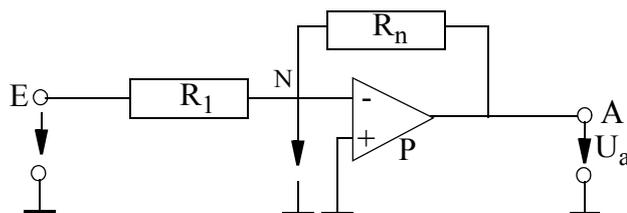
erfüllt ist."

Bei der Behandlung eines solchen Systems ist zu fragen, ob es didaktisch nicht sinnvoller ist, von vornherein nach einem stabilen Zustand des Systems zu fragen.

Beliebige Werte von  $U_e$  und  $U_a$  führen zu Unverträglichkeiten, d. h. das System wird sich "in Bewegung setzen". In Ruhe oder stabil kann das System nur bleiben, wenn der Ausgang um den Faktor  $A_D$  größer ist als der Eingang.

$$\text{Eingang} \times A_D = \text{Ausgang} \quad (U_e - KU_a) \cdot A_D = U_a$$

Etwas konkreter läßt sich dieser Gedankengang noch einmal am Beispiel des rückgekoppelten Operationsverstärkers wiederholen.



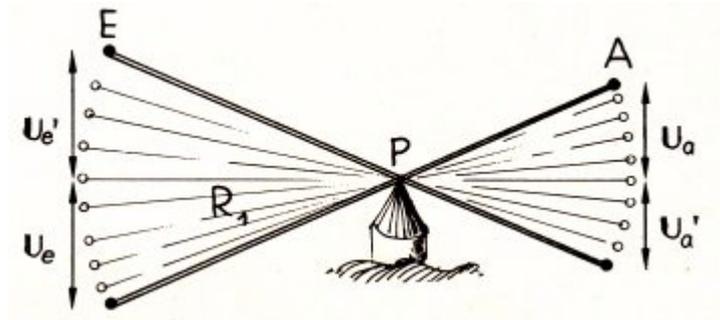
In der traditionellen Erklärungsweise wird das Einstellen eines Gleichgewichtszustandes als Ursache/Wirkungskreislauf dargestellt.

"Zur qualitativen Untersuchung lassen wir die Eingangsspannung von Null auf einen positiven Wert  $U_c$  springen. Dann springt  $U_N$  auf den Wert

$$U_N = \frac{RN}{R_N + R_1} \cdot U_2$$

da im ersten Augenblick  $U_a$  noch gleich Null ist. Die Spannung  $U_D = U_P - U_N$  ist also negativ. Wegen der hohen Verstärkung  $A_D$  sinkt die Ausgangsspannung rasch auf negative Werte ab. Dadurch verkleinert sich  $U_N$ . Die Ausgangsspannung ändert sich so lange, bis die Eingangsspannung praktisch Null geworden ist."

Umgekehrt läßt sich auch die Frage nach einem stabilen Zustand an den Anfang stellen. Als Bedingung für einen solchen Zustand gilt, daß die Ausgangsspannung ungefähr  $10^4$  mal größer ist als die Differenz zwischen den beiden Eingängen und daß gleichzeitig die Ausgangsspannung über die Widerstandskette mit der Eingangsspannung verknüpft ist. Daraus folgt, daß der Punkt P praktisch immer die Spannung Null erhält und  $U_e$  und  $U_a$  im Verhältnis der Widerstände  $R_1$  und  $R_N$  um den Nullpunkt herum pendeln.



# 1. Fachdidaktische Probleme bei der Behandlung des elektrischen Stromkreises

## 1.1. Zur Bezeichnung einer wichtiger Begriffe

### 1.1.1. Energiequelle / Spannungsquelle - Verbraucher / Widerstand

Bei der Behandlung des elektrischen Stromkreises im Unterricht werden bekannterweise mehrere Bezeichnungen verwendet, die sowohl in physikalischer als auch in didaktischer Hinsicht problematisch sind. Mit dem Begriff Widerstand wird z. B. sowohl der Gegenstand als auch die elektrische Eigenschaft desselben verstanden. Sowohl im angelsächsischen als auch im französischen Sprachgebrauch hat sich zum Abbau dieser didaktischen Schwierigkeit die Unterscheidung zwischen "resistor" und "resistance" herausgebildet.

Eine solche didaktisch wünschenswerte Unterscheidung hat bisher im deutschen Sprachgebrauch nicht stattgefunden. Zur Lösung dieser Problems wird in verschiedenen Büchern vorgeschlagen, den Gegenstand Widerstand mit "Verbraucher" zu bezeichnen. Dieser Name betont die zweite Funktion des Widerstandes, nämlich diejenige der Umwandlung elektrischer Energie in die jeweils gewünschte neue Energieform. Bei der Benutzung des Ausdruckes "Verbraucher" und des dazugehörigen Ausdruckes der "Energiequelle" entstehen allerdings neue Probleme. Zum einen wird nicht deutlich, daß die energetische Betrachtungsweise nur eine Seite des Geschehens wiedergibt. Die Ausdrücke "Verbraucher" und "Energiequelle" unterschlagen die Funktion des Antriebes sowie der Behinderung des Stromflusses. Dies kann bei der Behandlung spezieller Strömungsvorgänge sehr hinderlich sein. Zum anderen sind diese Ausdrücke natürlich wenig geeignet, den Satz von der Erhaltung der Energie zu unterstützen. Genau genommen dürfte man nur von Quellen elektrischer Energie und Verbrauchern elektrischer Energie sprechen. Oder anders ausgedrückt: Der Widerstand kann ebenfalls als Energiequelle (z. B. von thermischer Energie) und die Batterie als Verbraucher (von chemischer Energie) angesehen und entsprechend bezeichnet werden.

Da es keine Worte gibt, die die in der Spannungs/Energiequelle sowie im Widerstand/Verbraucher ablaufenden speziellen Wechselwirkungsprozesse gleichzeitig wiedergeben, wird man auch weiterhin die jeweiligen Doppelbezeichnungen weiterführen müssen. Wünschenswert erscheint es jedoch, daß bei der Einführung solcher Ausdrücke stets die jeweilige Einseitigkeit der Betrachtungsweise mit ausgeführt wird, so daß sich beim Lernenden im Laufe der Entwicklung ein ganzheitliches Bild der vorliegenden Wechselwirkungsprozesse ausformen kann.

### 1.1.2. Strom und Stromstärke

Während es im englischen und französischen Sprachgebrauch keine Unterscheidung zwischen dem Phänomen "Strom" und der quantitativen Größe "Stromstärke" gibt, wird diese Unterscheidung in deutschen Lehrbüchern i. a. als sehr wichtig und notwendig herausgestellt. Damit folgt man der ganz allgemeinen Forderung, begrifflich klar zwischen einem Ding bzw. einem Phänomen und seinen verschiedenen Eigenschaften zu unterscheiden. Raum und Volumen, Materie und Masse, Feld und Feldstärke sind Beispiele für die Erfüllung dieser Forderung. Daß diese Unterscheidung jedoch nicht immer und überall als notwendig angesehen wurde, beweist ein Blick in die geschichtliche und derzeitige Praxis. Die Benutzung des Begriffs Zeit sowohl für das Phänomen als auch für eine zu messende Zeitdauer ist hierfür ein sehr prägnantes Beispiel. Hierdurch wird deutlich, daß die strenge Unterscheidung zwischen Phänomen und meßbarer Eigenschaft nicht in jedem Fall als bedeutsam anerkannt wurde oder sich als überzeugend fruchtbar erwiesen hat. Durch diese Argumentation soll nicht ausgesagt werden, daß eine solche Unterscheidung nicht wünschenswert und sinnvoll ist. Vielmehr soll nur die Bedeutung dieser Forderung angesichts der herrschenden Praxis relativiert werden. Diese Relativierung wird wichtig, wenn man nach der Notwendigkeit einer Unterscheidung von "Strom" und "Stromstärke" fragt. Der Grund für diese Frage liegt in der Tatsache, daß der Ausdruck "...stärke" in didaktischer

Hinsicht ausgesprochen ungünstig ist. Er ist in der Alltagssprache üblicherweise mit "Antrieb", "Ursache für Bewegung" assoziiert und nur sehr selten mit einer Menge (Klassenstärke). Besonders kritisch wird die Benutzung des Ausdruckes "Stromstärke", wenn im Anschluß daran die Spannung als Ursache für die Bewegung des Stromes eingeführt wird und die Schüler vor allem lernen sollen, klar zwischen Stromstärke und Spannung zu unterscheiden.

Schülerantworten wie "Spannung ist die Stärke des Stromes" zeigen aber gerade, daß hier eine ausgesprochen unglückliche Kombination in der Wortwahl vorliegt. Die Schüler assoziieren mit dem Begriff Stromstärke gerade diejenige Größe, die sie davon als wesentlich verschieden erkennen sollen.

Aufgrund dieser rein didaktischen Überlegung liegt es nahe, den Ausdruck "Stromstärke" zu Beginn des Unterrichtes zu vermeiden und erst im Laufe des späteren Unterrichtes einzuführen. Da es im Sprachgebrauch keinen Ersatz für den Begriff "Stromstärke" gibt, wird in dieser Unterrichtseinheit vorgeschlagen, zu Beginn des Unterrichtes von einem "Meßwert des Stromes" zu sprechen, wenn die Größe "Stromstärke" gemeint ist.

## **1.2. Zur Einführung des Spannungsbegriffs**

### **Vorbemerkung**

Im folgenden werden zunächst einige Probleme aufgezeigt, die bei der in Lehrbüchern üblicherweise dargelegten Vorgehensweise auftreten sowie einige Gründe für diese Schwierigkeiten angegeben. Im Anschluß daran wird die in dieser Unterrichtseinheit vorgeschlagene Konzeption kurz begründet. Abschließend werden einige weiterführende Überlegungen zum Spannungsbegriff dargelegt, die als Hintergrundwissen für den Lehrer von Interesse sein können.

### **1.2.1. Definition der Spannung**

Die Einführung der Spannung, so wie sie in den Lehrbüchern üblicherweise dargestellt wird, stellt keine didaktisch befriedigende Lösung dar. In den meisten Fällen wird die Spannung zunächst als Folge von getrennten Ladungen und als Voraussetzung für das Fließen eines Stromes eingeführt. Auf eine explizite Einführung des Begriffes der elektrischen Feldstärke wird in den meisten Fällen verzichtet. Bei der quantitativen Fassung des Spannungsbegriffes wird dann auf die Arbeitsfähigkeit einer Spannungsquelle bzw. eines Stromkreises abgehoben und die Spannung als

$$U = \frac{W}{Q}$$

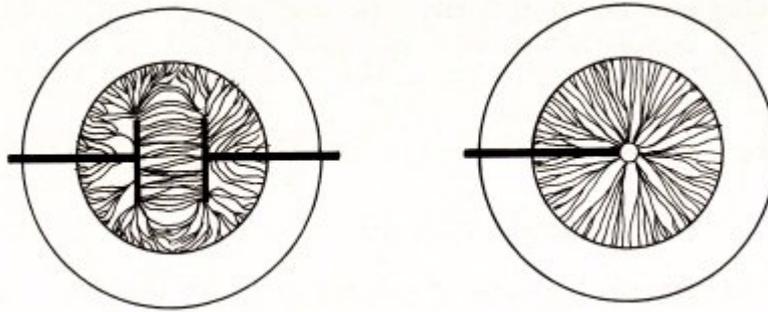
definiert.

Bei dieser Art der Einführung bleibt der Doppelcharakter einer Spannungsquelle (Ursache für die Bewegung des Stromes und Maß für den Energieumsatz) zunächst unvermittelt nebeneinander bestehen. Die Frage, wieso die Arbeitsfähigkeit eines Systems die Elektronen in Bewegung setzt, bleibt offen. Außerdem wird nicht deutlich, ob an den Enden eines stromdurchflossenen Widerstandes getrennte Ladungen vorhanden sind.

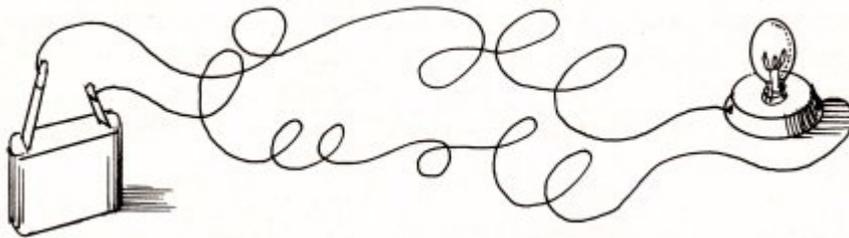
Auch in den Fällen, in denen explizit das elektrische Feld als Ursache für die Bewegung von Ladungsträgern eingeführt wird, bleiben einige wichtige Fragen offen.

So ist zunächst ungeklärt, bis zu welchem Ausmaß es gelingen kann, auf der Sek. I einen brauchbaren Begriff von einem elektrischen Feld zu vermitteln. Darüber hinaus werden Feld-

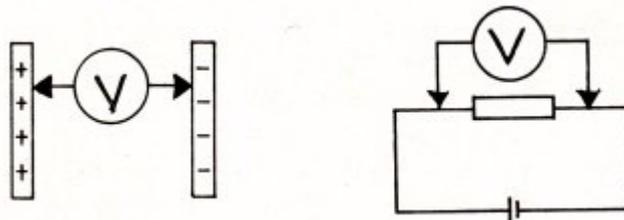
vorstellungen nur an geometrisch einfachen Ladungsverteilungen dargestellt.



Offen bleibt, wie sich ein Feld innerhalb eines Leiters ausbilden kann und wieso ein Feld jeder beliebigen Form eines Leiters folgt.



Da die Feldentstehung an die Existenz getrennter Ladungen gebunden bleibt, stellt sich auch hier die Frage nach einem Ladungsüberschuß bzw. Mangel an den Enden eines stromdurchflossenen Widerstandes.



Insgesamt läßt sich die Einführung des Spannungsbegriffes charakterisieren als eine Definition (in Form einer mathematischen Gleichung), die als richtig postuliert wird und somit zunächst von den Schülern akzeptiert werden muß. Die weitergehenden Erklärungsversuche beziehen sich auf Spezialfälle und bleiben somit bruchstückhaft.

### 1.2.2. Spannung und elektromotorische Kraft

Wie schon erwähnt, wird das Fließen eines Stromes als Fließen von Ladungsträgern, und zwar als Ausgleich eines vorhandenen Ladungsunterschiedes gedeutet. Die Spannung entsteht als Folge der Ladungstrennung und ist somit Voraussetzung für das Fließen eines Stromes. Gemessen wird sie dagegen als Arbeitsfähigkeit pro Einheitsladung.

Bei dieser Darstellung wird jedoch die Frage problematisch, wie es überhaupt zu einer Ladungstrennung kommen kann und wieso es zu einem Stromfluß bei induktiven Vorgängen kommt.

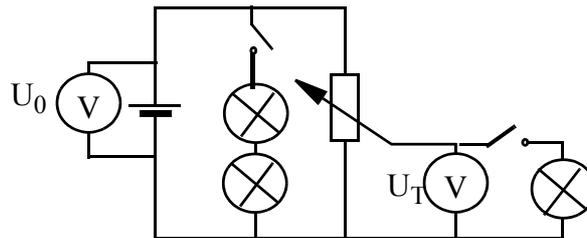
In älteren Büchern, aber auch in modernen angelsächsischen Werken wurde bzw. wird für diesen Vorgang der Begriff der "elektromotorischen Kraft" eingeführt. Diese EMK kann im Falle von elektrostatischen Spannungsquellen (VAN DER GRAAF-Generator) auf mechanische Kräfte zurückgeführt werden. Bei galvanischen Elementen muß eine unterschiedliche Lösungstension oder Elektronenaffinität der beteiligten Metalle angenommen werden und im Falle induktiver Generatoren wird die Existenz eines ringförmigen elektrischen Feldes postuliert wer-

den.

In jedem Falle werden die Kräfte, die zu einer Ladungstrennung oder - im induktiven Fall - zu einer Bewegung von Ladungsträgern führen, von den Coulombkräften getrennt, die aufgrund einer Ladungstrennung für einen Ausgleich sorgen.

Auch wenn eine solche Trennung für den Fachmann überflüssig erscheinen mag, so ist es doch fraglich, inwieweit die Unterschlagung der elektromotorischen Kraft für den Lernenden nachteilige Folge hat. Dazu das folgende Beispiel:

Wird in einer Potentiometerschaltung die Spannung an den Energiequellen  $U_0$  und die Teilspannungen  $U_T$  als nur zahlenmäßig verschieden angesehen, so kann dies zu Verständnisschwierigkeiten führen.



Die Spannung an einer Energiequelle ist in weiten Bereichen unabhängig von einer vorhandenen Schaltung. Dies gilt insbesondere bei Netzgeräten bzw. Transformatoren. Ist die Spannung bekannt, so kann bei Kenntnis des OHMschen Gesetzes vorausgesagt werden, welcher Strom bei einem bestimmten Widerstand fließen wird, bzw. welche Glühlampe anzuschließen ist. Dagegen führt die gleiche Überlegung und Handlung beim Vorliegen einer Potentiometerspannung i. a. zu einem Mißerfolg.

An diese Überlegung wird der Unterschied zwischen der Spannung an einer Energiequelle (EMK plus Innenwiderstand) und derjenigen an einem stromdurchflossenen Widerstand deutlich. Während im letzteren Fall die Spannung maßgeblich durch die betreffende Schaltung festgelegt ist (Systemeigenschaft), ist sie im ersteren Fall überwiegend durch die elektromotorische Kraft der Batterie bzw. durch die Induktionsspannung des Netzgerätes bestimmt (lokale Eigenschaft). Es ist zu hoffen, daß eine bessere und deutlichere Herausarbeitung dieses Unterschiedes für ein Verständnis der Spannung im Unterricht hilfreich ist.

### 1.2.3. Messung der Spannung mit dem Voltmeter

Zur Messung der Spannung mit Hilfe eines Vielfachmeßinstrumentes wird unter Zugrundelegung des OHMschen Gesetzes eine Strommessung durchgeführt. Im Unterricht dagegen wird die Spannungsmessung zunächst als eigenständige Messung deklariert, wobei nur die Schaltungsart und die Stellung des Wahlbereichsschalters im Vergleich zur Strommessung verschieden sind. Aufgrund von Meßergebnissen wird dann die Gültigkeit des OHMschen Gesetzes bzw. die Proportionalität von  $U$  und  $I$  experimentell festgestellt.

Dieser allen Physiklehrern wohlbekannte Zirkelschluß wird aber häufig verdrängt mit der Begründung, daß Schüler ihn von ihrem Verständnis aus nicht erkennen können. Er mag trotzdem teilweise dafür verantwortlich sein, daß die Größen "Strom" und "Spannung" für Schüler so oft nicht zu unterscheiden sind. Die Tatsache, daß beide Größen mit dem gleichen Instrument gemessen werden, legt eben die Vermutung nahe, daß es sich hier um die Messung von zwei gleichen oder sehr ähnlichen Größen handelt.

### 1.2.4. Gründe für die Schwierigkeiten bei der Behandlung des Spannungsbegriffes

Betrachtet man die Behandlung des Spannungsbegriffes in Hochschulbüchern im Vergleich zu den Darstellungen in den Lehrbüchern der Sek. I, so fällt auf, daß im ersteren Fall stets das elektrische Feld und der Begriff des Potentials dem Spannungsbegriff vorausgehen. Es dürfte Über-

einstimmung darüber bestehen, daß der Feld- und der Potentialbegriff im Grunde die Voraussetzung für eine klare begriffliche Fassung des Spannungsbegriffes sind. Und es ist anzunehmen, daß die fachdidaktisch so unbefriedigende Darstellung des Spannungsbegriffes auf der Sek. I aus der Annahme resultiert, daß es nicht möglich sei, einen brauchbaren Feldbegriff auf dieser Altersstufe zu vermitteln.

Dieser Annahme widerspricht allerdings die Tatsache, daß im Falle des Magnetismus in jedem Lehrbuch ohne besondere Einschränkungen von einem Magnetfeld gesprochen wird. Außerdem gibt es Lehrwerke, die ebenfalls explizit das elektrische Feld als Ursache für die Kraftwirkungen auf Ladungsträger behandeln.

Jedoch erscheint es zweifelhaft, ob dieses einmalige Ansprechen eines so schwierigen Begriffes wie den des Feldes genügt, um den Schülern als Basis für weiterführende Überlegungen zu dienen. Will man einen fundierten Feldbegriff vermitteln, so erscheint ein weitaus größerer Aufwand notwendig sowie ein mehrfaches systematisch geplantes Ansprechen und Problematisieren. Sicherlich müßte das Gravitationsfeld mit einbezogen werden, und es müßte vor allem Klarheit darüber geschaffen werden, was die Schüler sich unter einem Feld überhaupt vorzustellen haben. Ein Blick in verschiedene Lehrbücher zeigt, daß hier noch sehr verschiedene Auffassungen vorherrschen. Einige Zitate mögen dies belegen:

- Den Raum, der Feldlinien enthält, nennt man ein elektrisches Feld (DORN-BADER).
- Das Feld ist eine Vektorfunktion des Raumes (FEYNMAN Lectures).
- Das elektrische Feld ist bloß eine andere Möglichkeit, ein Ladungssystem zu beschreiben (BERKELEY Physik Kurs).
- Ein elektrisches Feld ist ein Raum, in dem auf geladene Körper Kräfte ausgeübt werden (HARBECK, Physik Oberstufe).

Hinter diesen Formulierungen verbergen sich unterschiedliche Auffassungen darüber, was physikalische Begriffe eigentlich darstellen, wie konkret ihr Bezug zur Wirklichkeit ist und was unter dieser Wirklichkeit eigentlich zu verstehen sei. Angesichts dieses erkenntnistheoretischen Problems erscheint es verständlich, daß die didaktische Aufbereitung des Feldbegriffes für die Sekundarstufe I bisher nicht gelungen ist und von daher eine überwiegend als Postulat gegebene Einführung des Spannungsbegriffes einen sinnvollen Kompromiß darstellt.

### **1.3. Darlegung und Begründung des vorliegenden Unterrichtsvorschlages**

Das Erlernen eines neuen Begriffes auf dem Weg über gesetzte und nicht weiter erläuterte Definitionen ist eine häufig angewandte Methode. Ein solches Vorgehen bleibt problematisch, wenn durch bruchstückhafte Erklärungen der Anschein eines einfachen und eindeutigen Zusammenhanges mit bekannten Größen und Begriffen erweckt wird. In einem solchen Fall besteht die Gefahr, daß die hinter den Erklärungen liegenden Schwierigkeiten verdeckt werden und die dann eintretenden Mißerfolge auf den Schüler als individuelles Versagen zurückfallen. Angesichts dieser Problematik und der Tatsache, daß bei Schülern der Sek. I ein angemessener Feldbegriff nicht vorhanden ist, wird vorgeschlagen, die Spannung zunächst ohne weitere Erklärung als ein Phänomen zu setzen, das für das Fließen des elektrischen Stromes verantwortlich ist. Darüber hinaus wird vorgeschlagen, zur Erläuterung der Spannungsverteilung bei Reihen- und Parallelschaltungen eine enge Analogie zur Druckdifferenz in einem Wasserkreis durchzuführen. Dabei soll betont werden, daß es sich hier nicht um eine Erklärung, sondern nur um einen Versuch handelt, der die Dinge plausibler machen soll.

Die Vorteile eines solchen Vergleiches zwischen Spannung und Druckdifferenz lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Wassermodell ist in dieser Unterrichtseinheit schon vorher im Unterricht behandelt worden und braucht somit nur noch ergänzt zu werden.
- Druckverhältnisse an einer strömenden Flüssigkeit sind direkt und nicht erst über Wirkungen der Wasserströmung sichtbar und erfahrbar zu machen. Insofern kann die Behandlung

des mechanischen Modells "Wasserkreislauf" den Zugang zu den elektrischen, nur indirekt erfahrbaren Phänomen erleichtern.

Die Nachteile eines solchen Vergleiches sind:

- Der Druckverlauf von einer strömenden Flüssigkeit ist nicht ohne weiteres einsichtig und muß gesondert behandelt werden. Das Stoffgebiet "Hydromechanik" findet sich zudem nicht in den Lehrplänen, so daß kaum Geräte zur Druckmessung in den Schulsammlungen vorhanden sind.
- Dem Vergleich Wasserkreis/Stromkreis liegt die Methode des Modelldenkens zugrunde, die besagt, daß in einem Wechselspiel zwischen der Welt der Phänomene und unserem theoretischen Wissen eine ständige Erweiterung und Verfeinerung des letzteren erfolgt. Dabei haben Modelle wie das Wassermodeil die Aufgabe, konkrete gegenständliche Dinge darzustellen, an denen neue Ideen entwickelt werden können, die dann ihrerseits durch Überprüfung an Experimenten zu einer Verfeinerung unseres Wissens führen. Bei dem Beispiel "Druckunterschied/Spannung" kann nun diese Methode nicht sehr weit geführt werden, da die zugrunde liegenden Kräfte relativ unterschiedlicher Natur sind. Die COULOMBkräfte zwischen elektrischen Ladungen und die Existenz eines elektrischen Feldes innerhalb eines Leiters unterscheiden sich grundsätzlich von den kurzreichweitigen mechanischen Abstoßungskräften zwischen neutralen Atomen. Von daher ist es von einem bestimmten Punkt an nicht möglich, die Erweiterung des Wissens durch Verfeinerung oder Ausbau des Modells zu bewirken, sondern es müssen wesentlich neue Aspekte und Modellannahmen eingeführt werden.

Die hier aufgeführten Nachteile werden im folgenden Unterrichtsvorschlag dadurch aufgefangen, daß zum einen die Darstellung des Druckverlaufes in einer Wasserströmung nur anhand von Abbildungen geführt wird. Dadurch wird der Unterricht unabhängig von Meßgeräten und Experimentiermaterialien. Wie die Erprobung gezeigt hat, sind die Schüler durchaus in der Lage, die gezeigten Aussagen gedanklich nachzuvollziehen. Zum anderen wird vorausgesetzt, daß bei der Behandlung der Druckdifferenz parallel zur Spannung stets auf den Modellcharakter dieser Größe, auf ihre begrenzte Gültigkeit und auf später notwendig werdende Veränderungen während des Unterrichts verwiesen wird.

#### **1.4. Zur Motivation**

Die in diesem Unterricht angestrebten Lernziele fordern vom Schüler relativ weitgehende Abstraktionen von der konkreten Anschauung und die Zusammenfassung und gleichzeitige Beachtung verschiedener Dinge und ihrer Beziehungen. Diese Art der Anforderung ist relativ hoch und wird besonders problematisch, da Schüler den Sinn solcher Anforderungen nur schwer einsehen können. Der elektrische Stromkreis ist zwar in ihrer Umgebung allgegenwärtig, seine Handhabung stellt aber i. a. keine besondere Schwierigkeit dar. Er funktioniert durch einfachste Bedienung völlig problemlos, und nur wenige Schüler sind aufgrund von fehlendem theoretischen Wissen in ihren Handlungen beeinträchtigt worden.

Erst beim Aufbau komplexer elektronischer Schaltungen ergibt sich ein Bedarf an theoretischen Kenntnissen, wie sie in dieser Unterrichtseinheit angeboten werden. Normalerweise beschäftigt sich aber nur ein Bruchteil der Schüler in dem betreffenden Jahrgang während ihrer Freizeit mit Elektronik. Für die Mehrzahl der Schüler ist somit das hier vermittelte Wissen ein Vorratswissen für zukünftige Aufgaben oder Berufe, und bekanntlich ist der Erwerb solchen Wissens auf der Schule nur schwer zu motivieren.

Hinzu kommt noch, daß die zu erklärenden Wirkungen, die bei der Beschäftigung mit dem elektrischen Stromkreis auftreten, sich im Grunde auf das Leuchten oder Nichtleuchten von Glühlampen beschränken. Diese Einfachheit ist für das Verständnis der grundlegenden Gesetze eine große Hilfe. Sie stellt aber einen Nachteil dar, wenn heutige Schüler motiviert werden sollen, für die Erklärung ihrer Umwelt das nötige Interesse aufzubringen.

Aus den hier dargestellten Gründen

- Anforderung an abstraktes Denken
- fehlende Einsicht in die Notwendigkeit solcher Abstraktionen
- fehlende Komplexität der zu erklärenden Phänomene

erscheint es problematisch, den im folgenden dargelegten Unterricht in sehr kompakter und gründlicher Form durchzuführen.

Als Alternative und zur Abschwächung der hier dargestellten Motivationsproblematik erscheint es möglich, das hier dargelegte Stoffgebiet in einzelnen kürzeren Abschnitten und unterbrochen durch andere Themenstellungen zu behandeln. Darüber hinaus sollte in einer Art Spiralcurriculum die Ausschärfung der Begriffe und Gesetze im Zusammenhang mit der Behandlung komplexerer elektronischer Aufgabenstellungen durchgeführt werden.

### **1.5. Zur Sequenzierung der Teilthemen der Elektrizitätslehre**

Wie oben näher aufgeführt, gibt es verschiedene Gründe für eine Einteilung der Elektrizitätslehre in mehrere Teilgebiete. Im folgenden wird eine solche Einteilung vorgeschlagen, wobei versucht wird, einzelne thematische in sich abgeschlossene Unterthemen oder Teilthemen zu bilden. Diese einzelnen Teilthemen erlauben eine Abwechslung durch Inhalte aus anderen Gebieten der Physik und machen i. a. wegen ihrer anwachsenden Komplexität eine Wiederholung der vorangegangenen Inhalte möglich. Die Teilthemen sind meist in Unterrichtsabschnitte gegliedert. Im folgenden wird eine kurze Charakterisierung dieser einzelnen Unterrichtsabschnitte angegeben und zusätzlich der Bezug zu dem in dieser Konzeption betonten Systemaspekt etwas ausführlicher erläutert.

es obigen Systemaspektes nützlich sein, um das praktische Wissen theoretisch zu vertiefen.

# Didaktisches Material zur Gestaltung des Unterrichts

## Überblick

1. Teilthema: Strom und Widerstand in Reihen- und Parallelschaltungen
  - 1.1. Systeme zum Transport von Energie
  - 1.2. Der Stromkreis und ähnliche Systeme
  - 1.3. Reihen- und Parallelschaltungen
2. Teilthema: Die elektrische Spannung
  - 2.1. Spannung und Druckunterschiede
  - 2.2. Spannung bei Reihen- und Parallelschaltungen
3. Teilthema: Das OHMsche Gesetz
  - 3.1. Mathematische Formulierung der Systembeziehungen
4. Teilthema: Anwendungen der Regeln des elektrischen Stromkreises
  - 4.1. Die Veränderbarkeit des Widerstandes
  - 4.2. Gefahren des elektrischen Stromes

## 1. Teilthema: Strom und Widerstand in Reihen- und Parallelschaltungen

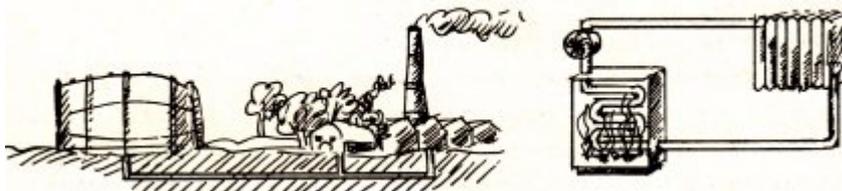
Vorbemerkung:

Zu dem folgenden Unterrichtsvorschlag ist ein Schülerheft entwickelt worden, das den Unterricht unterstützen soll. Dieses Schülerheft hat aber nicht die Funktion, dem Schüler ein völlig selbständiges Arbeiten zu ermöglichen. Vielmehr muß bei jedem neuen Kapitel vom Lehrer entschieden werden, welche zusätzlichen Informationen und Erklärungen nötig sind. Besonders das Bewußtmachen eigener Vorstellungen und der mühsame und langwierige Prozeß des Umlernens und des Neulernens bedürfen des direkten Gespräches mit einer erfahrenen Lehrperson.

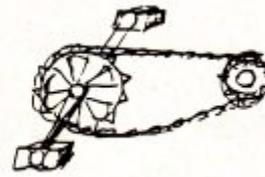
### 1.1. Systeme zum Transport von Energie

#### 1.1.1. Allgemeine Hinweise zum Unterricht und Lernziele

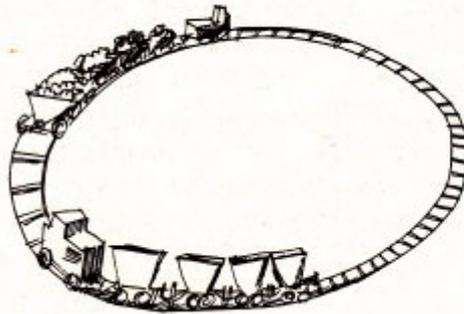
Man kann davon ausgehen, daß sich die meisten Schüler den elektrischen Strom als eine Koppelung von Energie und Materie vorstellen. Beides wird irgendwo erzeugt und dann verbraucht. Es ist das Ziel dieses Unterrichtsabschnittes, durch die explizite Behandlung verschiedener Energiequellen, Energieträger und Transportsysteme insbesondere die Vorstellung vom "Stromverbrauch" zu problematisieren und ein geeignetes Modell für die bei dem elektrischen Stromkreis vorliegende Energieübertragung zu gewinnen. Hierzu kann in einem historischen Überblick zunächst die Entwicklung der energietransportierenden Systeme und ihre Bedeutung für die Industrialisierung und Zivilisation vorgestellt werden. Es sollte deutlich werden, daß sich die verschiedenen Systeme wie folgt einteilen lassen..



Lineare und in sich geschlossene Systeme



Offene und abgeschlossene Systeme hinsichtlich des Materiestromes



Systeme mit Einzelantrieb und Systemantrieb

Außerdem sollte verdeutlicht werden, daß im Beispiel des Kettenantriebes den Schülern ein System bekannt ist, bei dem keine Materie verbraucht wird. Dieses Erkenntnis kann dazu führen, ihre als selbstverständlich angenommene Vorstellung vom Stromverbrauch in Frage zu stellen. Als Lernziele lassen sich formulieren:

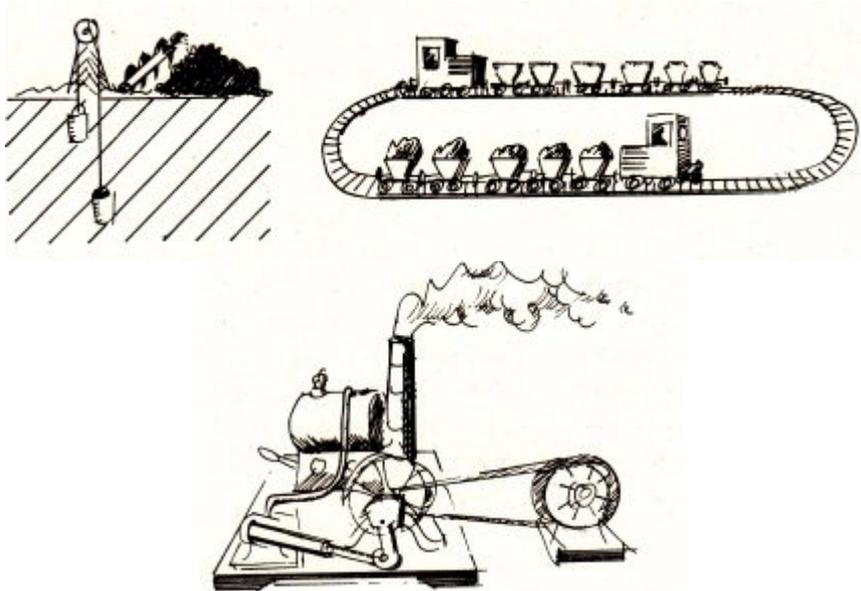
- Die Schüler sollen verschiedene Beispiele für Energiequellen und die dazugehörigen Transportsysteme nennen und darstellen können.
- Die Schüler sollen wissen, daß der Transport von Energie nicht notwendigerweise mit dem Transport von energiereicher Materie verbunden ist.
- Die Schüler sollen Beispiele für technische Systeme nennen können, in denen die sich bewegende Materie nicht verbraucht wird, sondern nur zur Energie- bzw. Kraftübertragung dient (Transmissionsriemen, Kette, Wasserkreislauf, elektrischer Stromkreis).

Zur besseren Motivation und Einbettung des hier zu behandelnden Stoffes in einen größeren Zusammenhang bietet sich ein Klassengespräch über die geschichtliche Entwicklung energieübertragender Systeme sowie deren Bedeutung für die Entwicklung unserer technischen Zivilisation an. Dieser geschichtliche Rückblick führt relativ zwanglos auf die Frage, welches der verschiedenen Systeme dem Stromkreis in seiner Struktur am ähnlichsten ist und als Modell für weitere Überlegungen zum Studium des elektrischen Stromkreises dienen kann. Bei bestehender Zeitknappheit kann zur Not auch direkt mit der Problematisierung der Schülervorstellung, vom "Stromverbrauch" begonnen werden. Sind Widersprüche zwischen den Schülervorstellungen und den entsprechenden Experimenten aufgetreten, so können daran anschließend verschiedene energieübertragende Systeme besprochen werden, um diese Widersprüche aufzulösen.

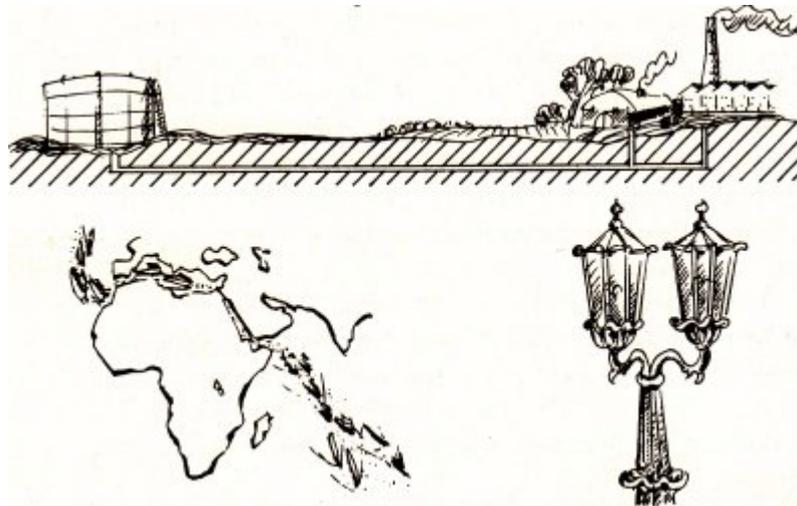
### 1.1.2. Geschichtlicher Rückblick

Als wesentliche Energiequelle für mechanische Arbeiten stand für einen sehr langen Zeitraum der Entwicklung dem Menschen nur seine eigene Muskelkraft und diejenige der von ihm gezähmten Tiere zur Verfügung. Zur Übertragung dieser Energie wurden Stangen, Seile, Ketten oder Getrieberäder benutzt. Hinzu kam die Ausnutzung der Energie des Wassers und des Windes und seit der Erfindung des Schießpulvers auch die Verwendung chemischer Energie. Mit der Entstehung der Dampfmaschine und der Verteilung der Energie mit Hilfe von Transmissionsriemen zu den verschiedenen einzelnen Maschinen wurde das Maschinenzeitalter und die erste industrielle Revolution eingeleitet.

Am Beispiel der Dampfmaschine können schon einige der im ersten Schülerheft angesprochenen Systeme zur Übertragung von Energie aufgezeigt werden. Zum einen muß die Kohle mit Hilfe von hin- und herpendelnden Schiffen, Zügen bzw. Wagen herbeigeschafft werden. Darüber hinaus wird die Energie mit Hilfe einer Dampfströmung auf die Kolben der Dampfmaschine übertragen, und schließlich treiben die verschiedenen Transmissionsriemen die Einzelaggregate an.



Die Versorgung der Haushalte mit Gas machte den Aufbau eines weit verzweigten Rohrsystems notwendig, und die Entdeckung des Erdöls führte zum Bau von Pipelines und der hin- und herpendelnden Flotte von Tankern und Tanklastzügen.



Die Entdeckung der Elektrizität und die Möglichkeit ihrer großtechnischen Erzeugung und einfachen Übertragbarkeit führte zum Aufbau des weit verzweigten Stromnetzes. Die Behandlung dieser Technikgeschichte unter dem Aspekt der Gewinnung und Übertragung von Energie führt zu der im folgenden angegebenen Auflistung entsprechender Systeme.

Energiequelle Energievorrat	Transportsystem	Verbraucher Abnehmer
Sonne	elektr.mag. Strahlen	Erde
Heizofen	Wasserleitung	Heizkörper
Bergwerk	Förderband	Halde
Ölfeld	Pipeline	Raffinerie
Öltankhafen	Tankerflotte	Tankbehälter
Gaswerk	Gasleitung	Haushalt
Antriebsrad	Kette, Riemen	angetriebenes Rad

Diese Auflistung kann erweitert werden durch biologische Systeme, wie z. B. den Blutkreislauf. Hier ist zunächst zwischen dem Herzen als Antrieb für die Strömung und der Lunge als "Belastungsstation" für den energiereichen Sauerstoff zu unterscheiden. Evtl. kann auch an dieser Stelle auf die höhere Komplexität biologischer Systeme im Vergleich zu technischen hingewiesen werden. Das Blut transportiert nicht nur Sauerstoff, sondern auch die verschiedenen Nährstoffe, und es transportiert die Reststoffe auch wieder zurück.

### 1.1.3. Einteilung der verschiedenen Systeme

Ausgehend von den in der Klasse zusammengetragenen Beispielen und im Hinblick auf eine spätere Einordnung des Stromkreises kann nun eine Einteilung nach folgenden Kriterien vorgenommen werden:

1. Lineare Systeme und in sich geschlossene Kreissysteme

2. Systeme mit Materieumsatz und System, bei denen die Materie im System erhalten bleibt.

Da der geschlossene Umlauf eine wichtige, allen Schülern bekannte Eigenschaft des Stromkreises ist, scheidet alle linearen Systeme von vornherein als Modell für den elektrischen Stromkreis aus. Die Unterscheidung nach dem zweiten Kriterium ergibt die beiden folgenden Gruppen:

Energieübertragung ohne Materieumsatz	Energieübertragung mit Materieumsatz
---------------------------------------	--------------------------------------

Kette	Förderband
Warmwasserheizung	Blutkreislauf
	Tankerflotte
	Lastzüge

.....

.....

Da Schüler häufig die Vorstellung von unabhängig sich bewegenden Einzelteilchen als Modell für den elektrischen Stromkreis anwenden, kann es zur besseren Problematisierung dieser Vorstellung angebracht sein, eine weitere Unterteilung nach den Kriterien "Systemantrieb" - "Einzelantrieb" vorzunehmen.

## 1.2. Der Stromkreis und ähnliche Systeme

### 1.2.1. Hinweise zum Unterricht und Lernziele

In diesem Abschnitt wird anhand eines Vergleiches mit anderen mechanischen Systemen die Vorstellung erarbeitet, daß beim elektrischen Stromkreis keine Materie, sondern nur analog eines Kettenantriebes bzw. eines Wasserstromes Energie übertragen und "verbraucht" wird. Kenntnisse über das Strommeßgerät und die Fähigkeit, das Gerät richtig einschalten und abzulesen zu können, sind hierbei Voraussetzung.

Als Lernziele lassen sich formulieren:

- Die Schüler sollen als Hypothese übernehmen, daß bei dem elektrischen Stromkreis die sich bewegende Materie weder erzeugt noch verbraucht wird, sondern nur zur Übertragung der Kraft bzw. zum Transport der Energie dient.
- Die Schüler sollen als Hypothese akzeptieren, daß die Ladungsträger in einem elektrischen

Stromkreis ausschließlich von der Energiequelle angetrieben werden und sich nicht aufgrund eines Eigenantriebes bewegen.

- Die Schüler sollen aufgrund der Abgeschlossenheit des Systems und aufgrund des Erhaltungssatzes von der Materie und der Ladung den Schluß ziehen können, daß in einem unverzweigten Stromkreis die an jedem Querschnitt pro Zeiteinheit vorbeifließende Materie (Ladung) konstant sein muß.
- Die Schüler sollen angeben können, daß die mit dem Strommeßgerät gemessene Größe derjenigen Ladungsmenge entspricht, die pro Sekunde durch einen Leiterquerschnitt fließt.
- Die Schüler sollen das Strommeßgerät sachgemäß in einen Stromkreis einschalten und korrekt ablesen können.
- Die Schüler sollen die Tatsache, daß der Meßwert des Stromes in einem unverzweigten Stromkreis überall derselbe ist, als einen ersten Hinweis für die Gültigkeit der angenommenen Modellvorstellungen erkennen
- Die Schüler sollen aufgrund der Abgeschlossenheit des Systems und aufgrund des Erhaltungssatzes der Materie den Schluß ziehen, daß bei einer Stromverzweigung die Summe der Teilströme gleich dem Gesamtstrom ist.
- Die Schüler sollen die drei Elemente
  - Antrieb
  - kreisförmiger abgeschlossener Materiefluß
  - Behinderung
 als grundlegend für den elektrischen Stromkreis angeben können.

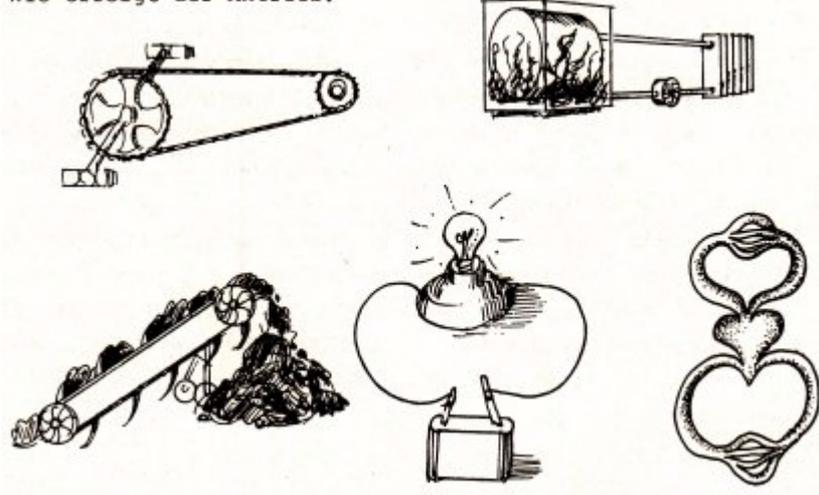
### 1.2.2. Unterscheidung zwischen offenen und geschlossenen Systemen

Um die Zuordnung des Stromkreises zu den beiden o. a. Gruppen von energieübertragenden Systemen zu erleichtern, lassen sich beispielsweise die folgenden Fragen an die Schüler stellen:

- Auf welche Weise wird bei einem elektrischen Stromkreis die elektrische Energie übertragen?
- Wird wie beim Förderband bzw. wie beim Blutkreislauf energiereiche Materie übertragen oder nur Energie ohne Materieverbrauch wie bei der Kette bzw. beim Wasserkreislauf?
- Wie erfolgt der Antrieb?

Bei der Behandlung dieser Fragen ist damit zu rechnen, daß viele Schüler von der Vorstellung eines Stromverbrauches als auch eines Materieverbrauches ausgehen. Jedoch sollte es gelingen, gerade durch die parallele Behandlung verschiedener Möglichkeiten der Energieübertragung die Vorstellung eines Stromverbrauches infrage zu stellen und dazu anzuregen, diese Vorstellung experimentell zu überprüfen.

Wie erfolgt der Antrieb?



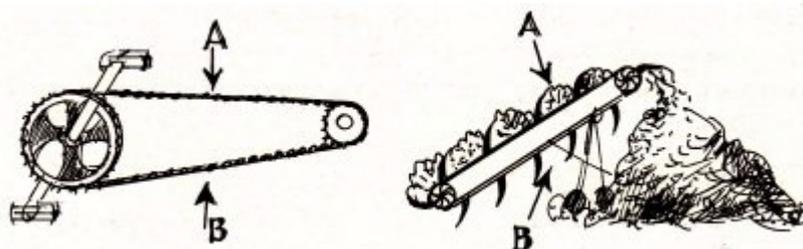
Während bei den mechanischen Systemen diese Fragen sofort durch die Anschauung beantwortet werden können, ist dies beim Stromkreis wegen der nicht direkt zugänglichen mikrophysikalischen Struktur nicht möglich. Von daher ist die Einführung eines Modells zur Deutung des Sachverhaltes notwendig.

Diese Art der Problemstellung führt zu der folgenden Frage:

- Durch welche Messung kann man an einem verdeckten System wie dem Stromkreis feststellen, ob Materie verbraucht wird oder nicht?

Um diese Frage zu beantworten, müssen die Schüler evtl. mit Unterstützung des Lehrers zunächst von der äußeren Form der mechanischen Systeme abstrahieren und den folgenden Schluß ziehen:

- Bei den Systemen mit Materieverbrauch (Förderband, Blutkreislauf) ist die Materiemenge, die an den Punkten A und B pro Sekunde vorbeifließt, unterschiedlich. Bei den anderen Systemen ist diese Größe gleich.



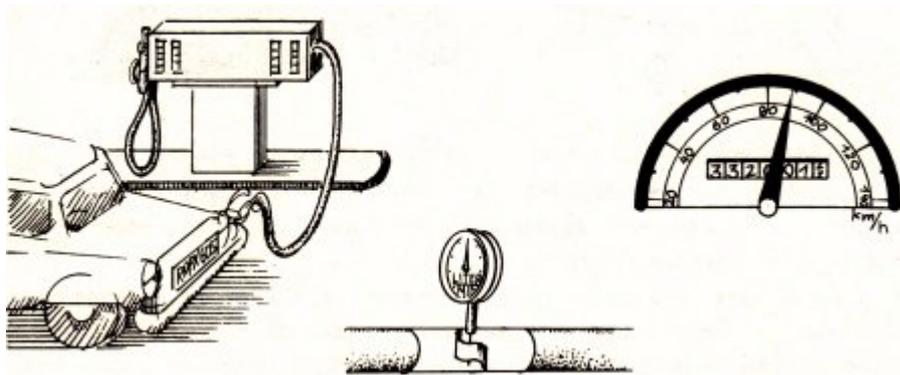
Ist dieses Ergebnis erzielt, so ist damit sowohl die Basis für eine Deutung der Messung des elektrischen Stromes gelegt, als auch eine Methode gefunden, um den elektrischen Stromkreis einer der beiden Systemgruppen zuzuordnen.

Bevor eine solche Messung am Stromkreis erfolgen kann, muß den Schülern zunächst mitgeteilt werden, daß das Strommeßgerät etwas mißt, das zu einer solchen Größe (fließende Ladungsmenge pro Zeiteinheit) proportional ist. Ohne eine solche Mitteilung hat die Messung mit einem Strommeßgerät nur eine geringe Aussagekraft, da die Schüler in der Regel keine Vorstellung von der Funktionsweise eines solchen Gerätes haben. Für einen Lernenden ist es z. B. auch naheliegend anzunehmen, daß mit dem Strommeßgerät die Geschwindigkeit der Teilchen und nicht der Mengendurchsatz pro Zeiteinheit bestimmt wird. Es ist hier ebenfalls denkbar, daß das Strommeßgerät nur die vorbeifließende Materie des Transportbandes und nicht die darauf geladene Menge der energiereichen Materie bestimmt.

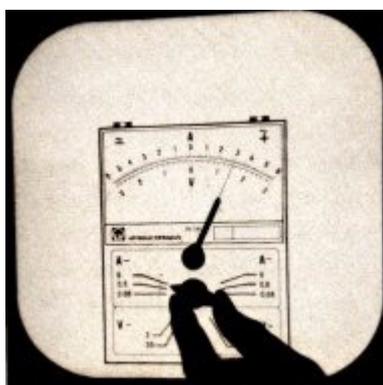
Weiterhin muß eine Information über die Art der Schaltung eines Strommeßgerätes sowie über die Art der Ablesung erfolgen. Die Schaltungsart des Strommeßgerätes erscheint an dieser Stelle den Schülern als trivial und kann erst später im Vergleich mit der Schaltung eines Spannungsmeßgerätes als wichtig erkannt werden.

Wie die Erfahrung gezeigt hat, gelingt es den Schülern nicht ohne weiteres, zwischen den Größen "Mengendurchsatz" und "Mengendurchsatz pro Zeitdauer" zu unterscheiden. Um die Bedeutung der Messung eines Mengendurchsatzes pro Zeitdauer hervorzuheben, ist evtl. zur besseren Abgrenzung ein Vergleich mit der Messung beim Benzintanken angebracht. Bei dieser allen Schülern vertrauten Messung wird nur die durchgeflossene Menge bestimmt und infolgedessen wächst der Meßwert proportional mit der Zeit. Um einen von der Zeit unabhängigen Meßwert zu erhalten, ist daher die Bestimmung der durchfließenden Menge pro Zeiteinheit erforderlich. Es mag weiterhin hilfreich sein, die Analogie zum Tachometer heranzuziehen, bei

dem ebenfalls die "durchfließenden" Kilometer pro Stunde gemessen werden.

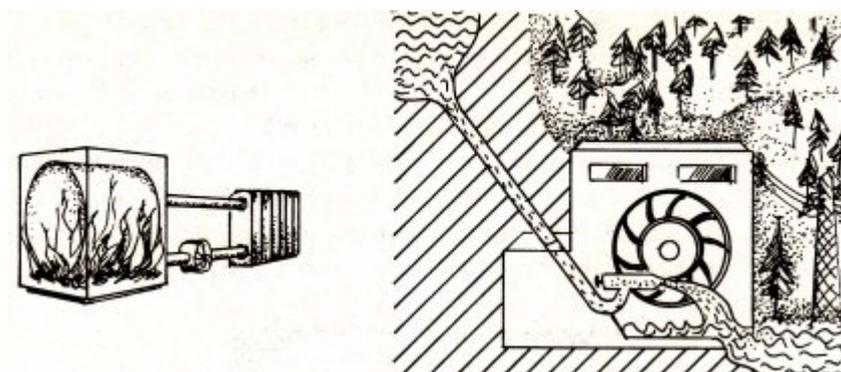


Falls ein Vielfachmeßinstrument verwendet wird, ist das Ablesen und Umrechnen aufgrund der verschiedenen Meßbereiche gesondert zu üben. Das Üben des Ablesens und Umrechnens der Skalenteile mit der ganzen Klasse wird erleichtert durch den Einsatz einer Overheadfolie (oder einer Meßgeräatrappe), wobei der Zeiger und der Meßbereichschalter durch geeignete, auf der Folie liegende Gegenstände angedeutet werden.



### 1.2.3. Unterscheidung zwischen verschiedenen geschlossenen Systemen

Ist deutlich geworden, daß als Modell für den Stromkreis nur ein System geeignet erscheint, das hinsichtlich des Materietransportes abgeschlossen ist, so ist noch zwischen Systemen zu unterscheiden, die die Energie auf verschiedene Art und Weise übertragen. Bei einer Warmwasserheizung mit Pumpenantrieb oder bei einer schnell fließenden Wasserströmung steckt zu jedem Zeitpunkt ein großer Teil der Energie im Transportsystem.



Beim Abschalten muß daher stets diese, in den Leitungen steckende Energie zusätzlich abgeführt werden. Umschalteffekte sind notwendigerweise von der Länge der Leitungen abhängig. Außerdem sollte ein Unterschied auftreten, wenn eine Leitung nur kurzfristig abgeschaltet wird, so daß die in der Leitung steckende Energie bis zum erneuten Einschalten nicht abgeführt wurde.

Deutlich verschiedene Verhältnisse liegen bei einem Kettenantrieb vor bzw. bei einer schleichenden Flüssigkeitsströmung, die unter hohem Druck steht. In diesem Fall steckt in jedem Augenblick nur relativ wenig Energie im System selbst und dieser Energieanteil ist umso kleiner, je kleiner die Geschwindigkeit und je geringer die Masse des umlaufenden Materiestromes ist. Dagegen tritt bei diesen Systemen die Kraftübertragung längs des Materieflusses in den Vordergrund. Es ist offensichtlich, daß der elektrische Stromkreis der letzten Gruppe zuzuordnen ist, und es ist anzustreben, daß die Schüler im Laufe des Unterrichts lernen, den Stromkreis dieser Systemgruppe zuzuordnen.

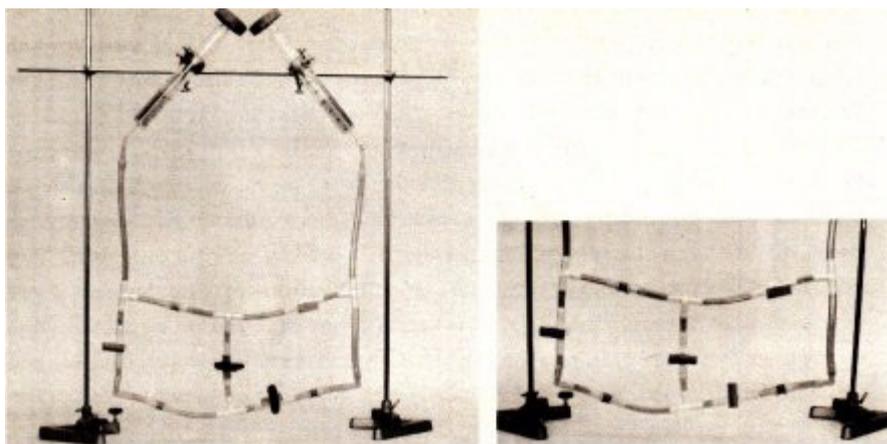


Allerdings erfordert dies die Fähigkeit, klar zwischen Kraft und Energie unterscheiden zu können. Außerdem wird ein gutes Vorstellungsvermögen über Abläufe in Kreissystemen vorausgesetzt. Es mag daher durchaus sein, daß eine zu ausführliche Diskussion für einige Schüler eher verwirrend als hilfreich ist. In diesem Fall kann diese Diskussion an dieser Stelle auch ausgelassen werden, um sie zu gegebener Zeit und im Zusammenhang mit entsprechenden Aufgabenstellungen einzubringen. Wichtig erscheint nur, daß die Lehrer sich bewußt sind, daß die Vermischung der beiden Systemgruppen und die mangelnde Unterscheidungsfähigkeit zwischen den beiden Arten der Energieübertragung zu Verständnisschwierigkeiten beim Erlernen weitergehender Zusammenhänge und Regeln bezüglich des elektrischen Stromkreises führen kann.

#### 1.2.4. Das Kolbenprobermodell

Vor- und Nachteil des Modells

Der Kettenantrieb als Modell für den elektrischen Stromkreis hat den großen Vorteil, daß er den Schülern bekannt ist. Sein wesentlicher Nachteil besteht u. a. darin, daß dies Modell keine Stromverzweigungen zuläßt. Von daher liegt es nahe, möglichst frühzeitig auf das Modell der schleichenden Flüssigkeitsströmung überzugehen. Als Konkretisierung eines solchen Modells wurde während der Erprobung das in der folgende Abbildung dargestellte sogenannte Kolbenprobermodell eingesetzt. .



Es hat folgende Vorteile:

- Das Modell läßt sich mit einfachen Mitteln aufbauen.
- Das Modell erlaubt quantitative Messungen (Volumenbestimmung am Kolbenprober und Zeitmessung).
- Es lassen sich alle wichtigen Gesetze des elektrischen Stromkreises in einer Analogie sowie die wesentlichen Systemzusammenhänge aufzeigen.

- Die Größe der Antriebskraft in Abhängigkeit des Gesamtwiderstandes kann direkt körperlich wahrgenommen werden.

Nachteile des Modells:

- Die "Energiequelle" stellt eine Trennung des Kreislaufes dar und erlaubt somit keinen kontinuierlichen Kreislauf über längere Zeit.
- Die Ausgänge der Kolbenprober sind relativ eng, so daß alle zusätzlichen Widerstände sehr groß sein müssen, um meßbare Effekte hervorzubringen.
- Die mit dem Modell zu erzielenden Effekte sind wenig ergiebig, um Schüler zu fesseln. Dies gilt besonders dann, wenn die Schüler dem zu erlernenden Stoff kein besonderes Interesse entgegenbringen.

Wie die Erfahrung gezeigt hat, stellen die beiden ersten Punkte keine ernsten Probleme dar. Die Schüler akzeptieren i. a., daß die Kolbenprober einen Ersatz für einen kontinuierlichen Antrieb des Wasserstromflusses darstellen. Werden außerdem die zusätzlichen Widerstände groß genug gewählt, so treten die Engstellen am Ausgang der Kolbenprober zunächst nicht in Erscheinung. Sie können später als Modell für den Innenwiderstand einer Energiequelle sogar noch gewinnbringend aufgegriffen werden.

Schwerwiegender ist der letzte Einwand. Es hat sich gezeigt, daß Schüler zunächst schon einige Schwierigkeiten haben, wenn sie die Analogie zwischen dem Kolbenprobermodell und dem Stromkreis herstellen sollen. Darüber hinaus haben sie Mühe, sich in die Verhältnisse einer strömenden Flüssigkeit einzudenken und beispielsweise den Satz von der Erhaltung der Materie auf verschiedene Strömungsquerschnitte anzuwenden. So sinnvoll und fruchtbar solche gedankliche Arbeit auch sein mag, so führt sie bei Schülern doch leicht zu Frustrationen und Ablehnung. Dies gilt insbesondere dann, wenn keine interessanten Vorgänge erklärt werden können, sondern, wie in diesem Beispiel, nur eine einfache Wasserströmung betrachtet wird. Dazu kommt dann noch, daß die gewonnenen Erkenntnisse zunächst auf einen anderen fremden Realitätsbereich, nämlich den des elektrischen Stromkreises, übertragen werden müssen und dann auch dort kaum eine Handlungsrelevanz besitzen. Um die hier angedeutete Motivationsproblematik zu umgehen, sollte man im Unterricht die Behandlung des Kolbenprobermodells nicht für längere Zeit zum Mittelpunkt machen und alle anstehenden Fragen dazu ausführlich erläutern. Vielmehr sollten immer die elektrischen Phänomene und die Erklärungsversuche der Schüler Ausgangspunkt und Schwerpunkt aller aufzuwerfenden Fragen sein.

Erst wenn Widersprüche oder Fragen aufkommen, die nicht mehr ohne weiteres aufgelöst oder beantwortet werden können, sollte das Kolbenprobermodell als Hilfe herangezogen werden. Begleitet dieses Modell in dieser Funktion für eine längere Zeit den Unterricht, so können sich die Schüler mit dem Modelldenken und dem ständigen Wechseln zwischen Modell und Stromkreis vertraut machen und positive Erfahrungen über den Nutzen eines solchen Modells sammeln.

Als Fernziel des Unterrichts ist anzustreben, daß die Schüler von sich aus in Problemsituationen das Modell heranziehen, um sich zunächst in diesem besser vorstellbaren Realitätsbereich Klarheit zu verschaffen.

Im folgenden werden die wichtigsten mit dem Kolbenprober zu behandelnden Fragen zusammengestellt. Es sei noch einmal daraufhingewiesen, daß dies kein Vorschlag für einen entsprechenden kontinuierlichen Unterricht bedeutet.

### **1.2.5. Äußere Analogie zwischen Stromkreis und Wassermodell (Kolbenprobermodell)**

Es hat sich in der Erprobung gezeigt, daß viele Schüler einige Zeit benötigen, um die Analogie zwischen dem Modell und dem Stromkreis zu erfassen. Von daher erscheint es angebracht, durch das Ausfüllen der im folgenden dargestellten Tabelle zu überprüfen, inwieweit die Schü-

ler in der Lage sind, diese Analogie herzustellen.

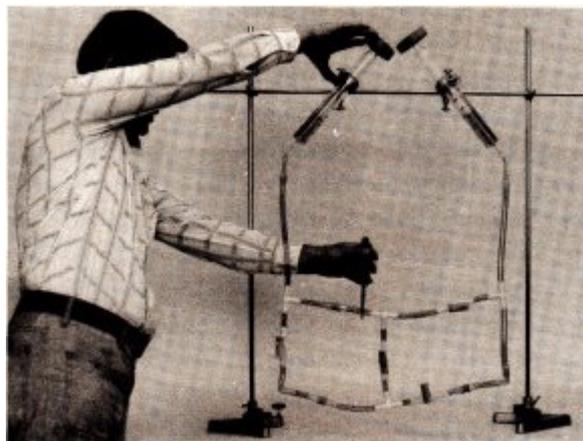
Stromkreis	Wasserkreis
Energiequelle	
Leiter	
Widerstand	
Schalter	
Strom	
Größe des Stromes	

### 1.2.6. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Strömungsquerschnitten

An dem Kolbenprobermodell läßt sich der Zusammenhang zwischen den "Wasserteilchen" dadurch besonders gut verdeutlichen, daß der eine Kolben der Bewegung des anderen wie von selbst folgt, gleich, ob man den Kolben hereindrückt oder herauszieht.

Diese Tatsache ist für viele Schüler zunächst eine Überraschung und stellt eine Hilfe dar, um den Blick für den Zusammenhang zwischen allen "Wasserteilchen" bei ihrer Bewegung zu öffnen.

Dieser Zusammenhang des gesamten Kreislaufes läßt sich noch einmal von einer anderen Blickrichtung aus aufgreifen, wenn man in einer strömenden Flüssigkeit eine Engstelle erzeugt und fragt, an welcher Stelle des Kreislaufes durch diese neue Engstelle das Fließen des Wassers zusätzlich behindert wird.

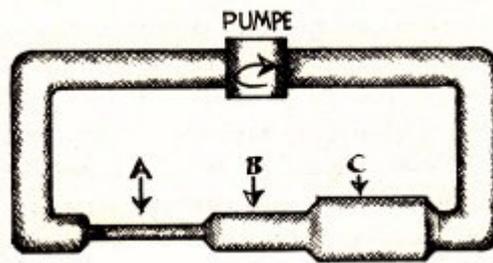


Die ersten Antworten der Schüler beziehen sich häufig nur auf das Wasser, das gerade durch die Engstelle fließt oder sich kurz vor der Engstelle befindet. Häufig erkennen sie dann jedoch auch, daß das Wasser bis zum antreibenden Kolben insgesamt behindert wird. Und es gibt auch Antworten, die den Menschen, der die Kraft aufbringt, noch in die Behinderung mit einbeziehen. Eine Antwort wie "das hängt ja alles miteinander zusammen" stellt einen guten Erfolg im Sinne der angestrebten Lernziele dar. Jedoch kommen die Schüler nur selten von allein darauf, daß auch das Wasser, das die Engstelle schon passiert hat, am gleichschnellen Weiterfließen gehindert wird.

Diese Tatsache läßt sich an dem Kolbenprobermodell durch die verringerte Geschwindigkeit des zweiten Kolbens demonstrieren und bietet einen guten Anlaß, um über die Schülervorstellungen bezüglich der fließenden Wasserteilchen zu sprechen. Zu vermuten ist, daß viele Schüler an isolierte Teilchen mit eingebautem "Antrieb" denken oder an eine Bewegung infolge von Trägheit, und nicht an die vorhandene Wechselwirkung.

### 1.2.7. Konstanz des Mengendurchsatzes pro Zeitdauer in einem abgeschlossenen System

Die Erkenntnis, daß aufgrund der Abgeschlossenheit des Systems und aufgrund der Erhaltung der Materie des Wassers der Mengendurchsatz pro Zeitdauer an jedem Querschnitt konstant sein muß, ist alles andere als einfach zu erfassen. Die Größe "Mengendurchsatz pro Zeiteinheit" ist im allgemeinen den Schülern nicht bekannt und muß ausführlich erarbeitet werden. Es hat sich gezeigt, daß viele Schüler zunächst die Geschwindigkeit des Wasserstromes als konstant für alle Querschnitte annehmen. Falls diese Vorstellung im Unterricht aufkommt, stellt ihre Widerlegung eine gute Möglichkeit im Sinne der hier zu leistenden Aufgabe dar. Die Widerlegung der Vorstellung von der Konstanz der Geschwindigkeit gelingt relativ gut durch die Behandlung eines Wasserkreislaufes (Tafelbild) mit einer Engstelle und einer Verbreiterung.



- Ist die Geschwindigkeit der Strömung an allen drei Querschnitten gleich oder unterschiedlich?
- Ist die Wassermenge, die pro Zeiteinheit durch die drei Querschnitte A,B,C fließt, gleich oder unterschiedlich?

Die 1. Frage wird häufig von Schülern positiv beantwortet, bei der 2. Frage bekommt der größere Querschnitt den Zuschlag. Es ist zu vermuten, daß die Schüler die folgenden Vorstellungen ihren Antworten zugrunde gelegt haben:

- Je schneller eine Strömung fließt, desto mehr Materie fließt vorbei. Es kann aber nicht an einer Stelle plötzlich mehr fließen als an einer anderen Stelle, also ist die Strömungsgeschwindigkeit überall gleich groß.
- Je größer ein Strömungsquerschnitt, desto mehr Materie fließt hindurch. Also fließt beim Querschnitt C am meisten Wasser vorbei.

Jede einzelne dieser Argumentationen ist richtig, wenn man von unabhängigen Querschnitten und unabhängigen Strömungsteilchen spricht. Beispielsweise fahren an einer breiten Autobahn mehr Autos an einem Beobachter vorbei als an einer Landstraße, und eine Verbreiterung einer Straße führt nicht automatisch dazu, daß die Autos schneller werden. Der Widerspruch entsteht, wenn verschiedene Querschnitte in einen Systemzusammenhang gebracht werden und wenn die strömende Flüssigkeit als inkompressibel in einem abgeschlossenen System gedacht werden muß. Ein solcher Systemzusammenhang wird im täglichen Leben nur selten sichtbar. Er kann an der oben dargestellten Skizze eines Wassermodells gut verdeutlicht werden und sollte zu dem folgenden Ergebnis führen:

- Die Größe "Wassermenge pro Zeitdauer" ist in einem unverzweigten Stromkreis an jedem Querschnitt konstant. Diese Größe entspricht dem Meßwert des elektrischen Stromes.

Es sei betont, daß die hier vorliegende Anwendung der Kontinuitätsgleichung von vielen Schülern häufig nicht in einem einzigen Schritt gemeistert wird. Die Betrachtung einzelner, isolierter Strömungsquerschnitte kehrt häufig wieder, der Systemzusammenhang wird häufig übersehen. Von daher muß diese Aufgabe in den folgenden Unterrichtsabschnitten möglichst oft wiederholt werden.

Eine Überprüfung des Lernerfolges läßt sich am Beispiel einer Stromverzweigung durchführen. Falls das oben dargestellte Ergebnis wirklich von den Schülern verstanden worden ist, sollte ih-

re Anwendung auf eine Stromverzweigung ohne weiteres zur ersten KIRCHHOFFschen Regel (Gesamtstrom gleich Summe der Teilströme) führen. Die Erfahrung zeigt, daß dies i. a. nicht der Fall ist. Von daher bietet sich eine Behandlung der Stromverzweigung an dieser Stelle an. Dies empfiehlt sich auch deshalb, weil viele Schüler dazu neigen, eine einmal gelernte Regel zu verallgemeinern und auf alle irgendwie ähnlichen Fälle anzuwenden. Wird also von Schülern die einmal gelernte Regel

"Der Strom ist überall gleich groß"

nicht sofort durch die Stromverzweigung relativiert, so sind mit einiger Sicherheit später diese unzulässigen Verallgemeinerungen zu erwarten. Die Stromverzweigung läßt sich an dem erweiterten Kolbenprobermodell vorführen.

Die weitere Behandlung der Parallel- und Reihenschaltung ist im nächsten Kapitel dargelegt.

### **1.2.8. Die grundlegenden Strukturen des Systems "Stromkreis"**

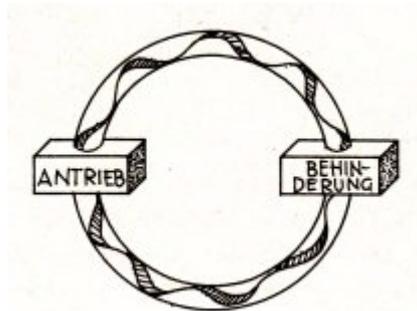
#### **(und ähnlicher Systeme)**

Nachdem aus einem breiten Spektrum verschiedener energieübertragender Systeme schrittweise ein passendes Modell für den elektrischen Stromkreis ausgesondert wurde, liegt es von der Sache her nahe, an dieser Stelle die grundlegende Struktur dieses Modells als abschließende Abstraktion zu behandeln. Das soll jedoch nicht heißen, daß dieser Schritt auch im Unterricht an dieser Stelle in jedem Fall angebracht ist. Es mag sein, daß Schülern der Stromkreis noch zu wenig bekannt ist, um den Sinn und die Notwendigkeit solcher zusätzlicher Abstraktionen und Verfeinerungen einzusehen. Ein solches Vorgehen kann somit auf Unverständnis und Ablehnung stoßen. Von daher kann es zur Vermeidung solcher Komplikationen durchaus angebracht sein, diese Strukturbetrachtung zunächst zu überspringen, um sie bei späteren Aufgaben und Fragestellungen einzubringen, wenn ihr Nutzen auch von den Schülern erkannt werden kann.

Betrachtet man die drei technischen Realisierungen

- Kette oder Riemenantrieb
- schleichende Wasserströmung
- elektrischer Stromkreis

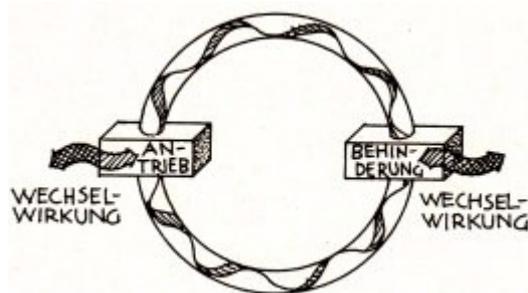
und grenzt zunächst alle Energiefragen aus, so erhält man eine gemeinsame Struktur, bestehend aus den drei wesentlichen Elementen:



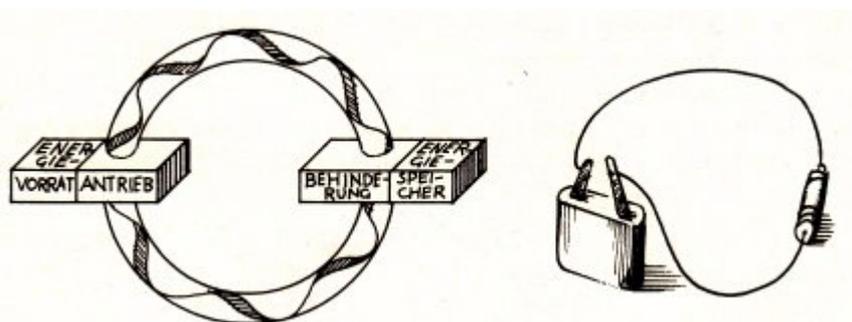
- Antrieb zur Bewegung des in sich abgeschlossenen Materieflusses
- Ein in sich abgeschlossener Materiefluß
- Ort oder Teil, an dem oder durch den der Materiefluß in seiner Bewegung behindert wird.

In dieser Struktur wird das System als nach außen abgeschlossen gekennzeichnet. Diese Abgeschlossenheit bezieht sich jedoch nur auf den Aspekt des Materietransportes. Damit das System funktionsfähig wird, ist mindestens je eine Wechselwirkung zur Auf- und Abgabe der Energie

in bezug auf ein äußeres System notwendig.



Liegt die Energiequelle als Batterie vor und wird keine nutzbare Energie nach außen abgegeben (Erwärmung eines Widerstandes), so ist es für die Schüler i. a. schwer, die Energieprozesse aus dem System begrifflich auszugrenzen. Für diesen Spezialfall erscheint es daher angebracht, die folgende, entsprechend abgewandelte Darstellung zu wählen.



In Abhängigkeit vom Vorverständnis der Schüler kann dann noch der Materietransport als Bewegung von Ladungsträgern (Elektronen im Leiter, Ionen in Flüssigkeit) hingewiesen werden. Dabei muß jedoch stets deutlich werden, daß ein vorhandener Zusammenhang zwischen diesen Ladungsträgern nur eine ganzheitliche "ringförmige" Bewegung erlaubt.

### 1.3. Reihen- und Parallelschaltungen

#### 1.3.1. Hinweise zum Unterricht und Lernziele

Die Energieübertragung von einer Quelle zu mehreren Verbrauchern kann bekanntermaßen entweder in Form einer Reihenschaltung oder einer Parallelschaltung erfolgen. Ziel dieses Unterrichtsabschnittes ist es, den Schülern diesen relativ einfachen, aber dennoch grundsätzlichen Unterschied zu verdeutlichen und die verschiedenen damit zusammenhängenden Gesetzmäßigkeiten bezüglich der Stromverzweigung und des Gesamtwiderstandes einer Schaltung aufzuzeigen. Bei der Verwendung des Konzeptes von der Erhaltung der Materie und unter Beachtung der Tatsache, daß das System abgeschlossen ist, sollte die Behandlung einer Stromverzweigung eigentlich keine besonderen Schwierigkeiten aufwerfen. Wie oben schon erwähnt, ist es erfahrungsgemäß für viele Schüler jedoch nicht ohne weiteres möglich, das Konzept von der Erhaltung der Materie auf eine strömende Flüssigkeit zu übertragen. Dies äußert sich z. B. dadurch, daß die Schüler häufig den Teilströmen und dem Gesamtstrom jeweils den gleichen Meßwert zuschreiben.

Die Behandlung der Parallelschaltung führt zusätzlich zu Schwierigkeiten, wenn entsprechende Schaltungen nach einer Skizze aufgebaut werden sollen. Im Gegensatz zu einer Reihenschaltung ist bei einer Parallelschaltung die relative Lage der Verzweigungspunkte zu den anderen Bestandteilen von entscheidender Bedeutung. Der sichere Umgang mit einer Parallelschaltung erfordert somit die Fähigkeit, wichtige Strukturelemente einer konkreten Schaltung zu erkennen und sich einen ganzheitlichen Überblick über ein System zu verschaffen. Gleichzeitig ist es notwendig zu erkennen, daß die Länge einer Zuleitung unerheblich ist und verschiedene Punkte ei-

ner Zuleitung im elektrischen Sinne identisch sind.

Als Hilfe für die Entwicklung und den Ausbau dieser Fähigkeiten wird vorgeschlagen, die verschiedenen Schaltungsarten an dem erweiterten Kolbenprobermodell durchzuführen. Da eine Wasserströmung unmittelbar anschaulich ist, kann die Behandlung an dem Kolbenprobermodell den Zugang zu den abstrakten Vorgängen im verzweigten elektrischen Stromkreis erleichtern.

Um die Struktur eines Stromkreises, d. h. die Anzahl und die Anordnung der Verzweigungspunkte zu verdeutlichen, ist die ausführliche Behandlung einer Schaltskizze als symbolische Darstellung des Stromkreises unerlässlich. Wie die Erfahrung gezeigt hat, ist die Kenntnis der Schaltsymbole allein auf keinen Fall ausreichend, um von einem konkreten Stromkreis eine Schaltskizze anzufertigen. Für die Lösung einer solchen Aufgabe sind zusätzliche Fähigkeiten notwendig wie

- Systematisches Verfolgung einer Leiterschleife
- Wiederanknüpfen an Verzweigungspunkten
- Vernachlässigung der Länge einer Zuleitung
- ....

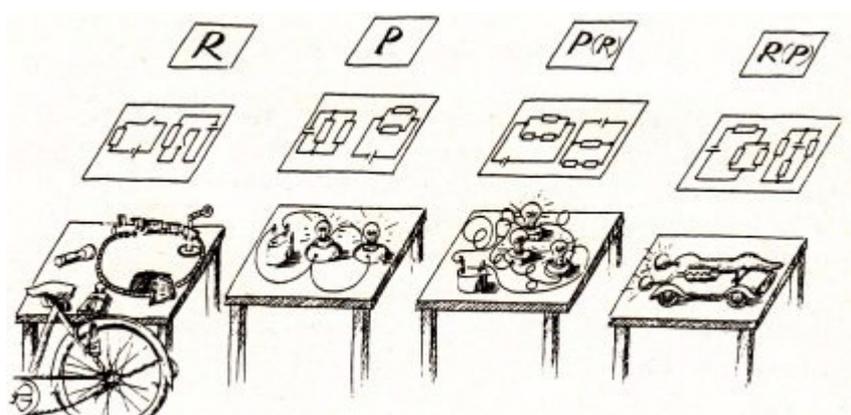
Sollen diese Fähigkeiten aufgebaut werden, so muß ausführliche Gelegenheit zum Üben zur Verfügung stehen. Das Gleiche gilt für die umgekehrte Aufgabe, den Aufbau einer Schaltung aufgrund einer vorgegebenen Schaltskizze. Als eine besondere Schwierigkeit kommt bei dieser letzten Aufgabe die Tatsache hinzu, daß ein und dieselbe Schaltung durch verschiedentlich ausgeführte Schaltskizzen wiedergegeben werden kann. Bei der Behandlung komplexer elektronischer Schaltungen ist es z. B. notwendig, von der speziellen Ausführungsform der Schaltskizze zu abstrahieren und die gemeinsame Grundstruktur zu erkennen. Da die Behandlung elektronischer Bauteile für einen nicht unerheblichen Teil der Schüler eine wesentliche Anwendungs-komponente der Physikkenntnisse darstellt, sollte diesem Problembereich auch im Unterricht genügend Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Als Lernziele lassen sich formulieren:

- Die Schüler sollen erkennen, daß man mehrere Verbraucher auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten mit einer Energiequelle verbinden kann, nämlich "in Reihe" oder "parallel".
- Die Schüler sollen mit Hilfe des ersten KIRCHHOFFSchen Gesetzes Voraussagen über die Größe von Teilströmen bei einer Stromverzweigung machen können.
- Die Schüler sollen die Normvorschriften für Schaltsymbole und Schaltskizzen kennen und von einer realen Schaltung eine Schaltskizze anfertigen können.
- Die Schüler sollen anhand einer Schaltskizze einen Stromkreis aufbauen können.
- Die Schüler sollen unterschiedlich ausgeführte Schaltskizzen des gleichen Stromkreises als gleichwertig erkennen.
- Die Schüler sollen einsehen, daß die Größe der Teilströme in den Parallelzweigen eines Stromkreises abhängig ist von der jeweiligen Größe des parallelen Widerstandes.

### 1.3.2. Schaltkreis - Schaltskizze und Schaltungsart

Der Inhalt dieses Abschnittes läßt sich in eine mehr inhaltliche und mehr formale Seite aufteilen. Solche Aufteilung wird an der folgenden Abbildung verdeutlicht.



Auf dieser Abbildung sind auf der unteren Ebene zunächst verschiedene konkrete Stromkreise dargestellt. Darüber liegen auf einer symbolischen Ebene die zugehörigen Schaltskizzen. Jedoch auch diese Schaltskizzen können, wie schon erwähnt, noch in verschiedener Form dargestellt werden, so daß auf einer dritten formalen Ebene nur noch Zeichen der zugrundeliegenden Schaltstrukturen angegeben sind.

Die mehr inhaltliche Seite des folgenden Abschnittes beschäftigt sich mit den Stromverzweigungen und der Abhängigkeit der Teilströme von den jeweiligen Parallelwiderständen. Hier befinden wir uns auf der unteren Ebene. Die mehr formale Seite bezieht sich auf das Erlernen der Symbole auf der zweiten und dritten Ebene und vor allem auf die Fähigkeit, zwischen diesen Ebenen zu wechseln und die jeweiligen Bezüge herzustellen.

Diese Aufteilung in formale und inhaltliche Aspekte hat jedoch nur eine Hilfsfunktion im Sinne einer klaren und verständlichen Darstellung. Im Unterricht werden sich diese verschiedenen Aspekte nicht trennen lassen, sondern sich gegenseitig bedingen und durchdringen.

Die in den folgenden Aufgabenstellungen geforderte Denkleistung bezieht sich auf den abstrahierenden Übergang von der konkreten Ebene über eine ikonische Darstellung bis hin zu einer rein formalen Beschreibung. Es mag angebracht sein, dieses hier bildhaft bzw. modellhaft dargestellte Problem der Abstraktion bzw. des abstrahierenden Denkens anhand der obigen Abbildung selbst zum Gegenstand des Unterrichts zu machen.

### 1.3.3. Schaltskizzen und Schaltungsstrukturen

Im Schülerheft sind Übungsblätter angegeben, die dazu anleiten, aus verschiedenartigen Schaltskizzen die gleiche Grundstruktur herauszufinden. Ebenfalls sind Aufgaben vorhanden, die da-

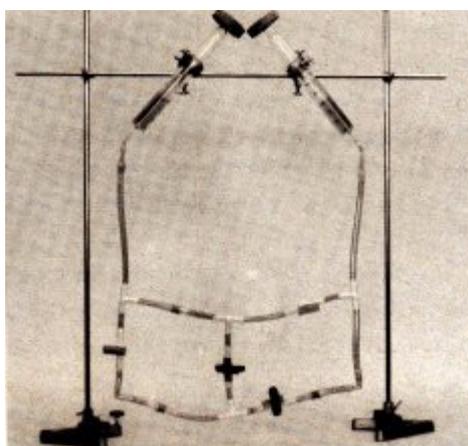
zu auffordern, aus einer gegebenen konkreten Schaltung (als Abbildung) eine Schaltskizze anzufertigen. Die umgekehrte Aufgabenstellung - Herstellung einer Schaltung nach einer Schaltskizze - kann nur entsprechend den in der Schule vorhandenen Schülergeräten durchgeführt werden.

#### 1.3.4. Stromverzweigungen, Anordnung von Widerständen, Kurzschluß

Wie schon erwähnt, kann der Umgang mit Schaltskizzen und Schaltungsstrukturen nur erfolgreich gelernt werden, wenn gleichzeitig die adäquaten inhaltlichen Vorstellungen über das zugrundeliegende System thematisiert werden. Hierbei geht es im wesentlichen um den Einfluß von Widerständen auf den Stromfluß, und zwar in Abhängigkeit von der Schaltungsart. Als Sonderfall einer Parallelschaltung sollte dann noch der Kurzschluß hervorgehoben werden.

#### 1.3.5. Widerstände in einer Reihenschaltung

Der Einfluß eines zweiten in Reihe geschalteten Widerstandes kann anhand des Kolbenprobermodells oder mit Hilfe einer elektrischen Schaltung demonstriert werden.



Dabei tritt zunächst nur die Erfassung der gegenläufigen Beziehung "je größer der Widerstand, desto kleiner der Strom" häufig als Schwierigkeit auf. Darüber hinaus erscheint die Aussage "Je mehr Widerstände, desto größer der Gesamtwiderstand" den Schülern als trivial. Daß diese Aussage alles andere als trivial ist, wird spätestens dann deutlich, wenn das Verhalten einer Parallelschaltung behandelt wird. Auch in diesem Fall argumentieren viele Schüler nach der einfachen Regel:

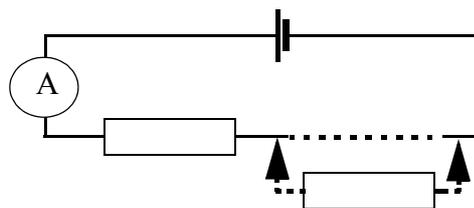
Je mehr Widerstände, desto größer der Gesamtwiderstand, desto kleiner der Strom.

Dies deutet darauf hin, daß auch der Einfluß von Reihenwiderständen auf den Gesamtstrom nicht wirklich erkannt worden ist. Um diesen so einfach erscheinenden Fall zu problematisieren, ist es evtl. sinnvoll, nach der Wirkung unterschiedlich enger Autobahnstellen auf den Gesamtverkehr zu fragen. Da es sich bei Autos auf der Autobahn um den Strom einzelner, relativ unabhängiger "Teilchen" handelt und nicht um ein zusammenhängendes System, ist die engste Stelle bestimmend für den gesamten Verkehrsstrom. Hinter einer Baustelle mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung, z. B. von 10 km/h, haben zusätzliche Baustellen mit einer geringeren Geschwindigkeitsbegrenzung zwar einen Einfluß auf jeden einzelnen Autofahrer - die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit wird reduziert - aber der gesamte Autostrom (Autos pro Minute) wird nicht verändert. Nur bei Vorhandensein einer starken Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilchen (konstanter Abstand) führt jede zusätzliche Behinderung zu einer entsprechenden Verkleinerung des gesamten Stromes.

Eine gute Aufgabe zur Prüfung, ob die hier erläuterten Gedankengänge von den Schülern wirk-

lich erfaßt worden sind, ist die Frage nach dem Einfluß eines zusätzlichen sehr kleinen Widerstandes.

In einen Stromkreis wird ein zusätzlicher Widerstand in Reihe geschaltet. Wenn sich dabei der Strom nicht merklich ändert, was kann dann über den dazu geschalteten Widerstand gesagt werden?

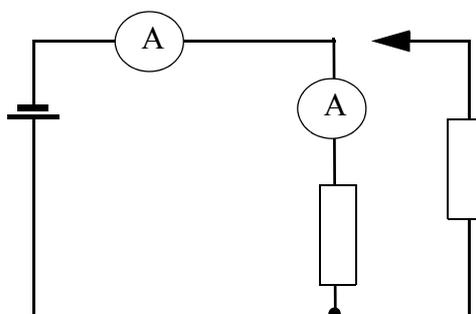


### 1.3.6. Widerstände in einer Parallelschaltung (Schülerheft, S. 169 f)

Die Behandlung der Parallelschaltung erweitert den einfachen Stromkreis in einer qualitativen Weise. Hierbei wird ein Strukturelement eingeführt, das den Aufbau sehr verzweigter und komplexer Netze ermöglicht, und erfahrungsgemäß scheitern viele Schüler an diesem Punkt.

Während der Erprobung sind zwei Lernschwierigkeiten sichtbar geworden, die in relativ vielen Fällen einen weiteren Lernfortschritt blockieren. Zum einen tritt die schon früher erwähnte Schwierigkeit auf, den Satz von der Erhaltung der Materie auf einen Stromfluß in einem abgeschlossenen System zu übertragen. Die Schüler sehen die verschiedenen Querschnitte rechts und links von einer Stromverzweigung als voneinander unabhängig und schließen aufgrund äußerlicher Gleichheit auf gleiche Strömungsverhältnisse. Erschwerend kommt hinzu, daß viele Schüler das Ergebnis, das sie bei einer Reihenschaltung gelernt haben (der Strom ist überall konstant), generalisierend auf alle Stromkreise übertragen.

Die zweite Lernschwierigkeit tritt auf, wenn Voraussagen über die Größe des Gesamtstromes beim Hinzuschalten eines Parallelkreises gemacht werden sollen. Viele Schüler ordnen der Energiequelle die Eigenschaft zu, einen bestimmten konstanten Strom liefern zu können, der sich beim nachträglichen Anschließen eines Parallelkreises entsprechend aufteilt. Insofern sind sie sehr häufig der Ansicht, daß beim Hinzuschalten eines Parallelkreises der Gesamtstrom gleich bleibt, dafür aber der Strom in dem ersten Parallelzweig kleiner wird.



Diese Antwort kann zunächst am Stromkreis selbst oder auch an dem erweiterten Kolbenprobermodell widerlegt werden. Jedesmal kann gezeigt werden, daß beim Hinzuschalten eines Parallelzweiges der Gesamtstrom größer wird. Notwendig ist allerdings, im Vorgriff auf den nächsten Unterrichtsabschnitt, die Energiequelle als eine Quelle mit konstanter "Antriebskraft" und nicht als Lieferant eines konstanten Stromes einzuführen.

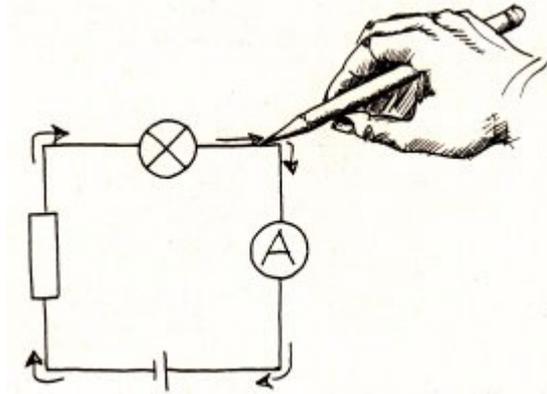
### 1.3.7. Kurzschluß

Der Kurzschluß stellt einen Sonderfall einer Parallelschaltung dar und kann erst verstanden werden, wenn die Verhältnisse von Parallelschaltungen geklärt sind. Im Schülerheft sind mehrere Schaltungen dargestellt mit der Aufforderung, die eingebauten Kurzschlüsse zu lokalisieren. Dabei bietet es sich an, die Eigenschaft eines Strommeßgerätes in diesem Zusammenhang noch einmal wiederholend aufzugreifen. Gerade die Schwierigkeit, die Schüler beim Lösen dieser Aufgaben haben, machen deutlich, welche Anforderungen an Abstraktionsfähigkeit und Er-

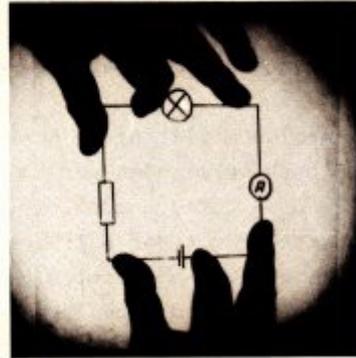
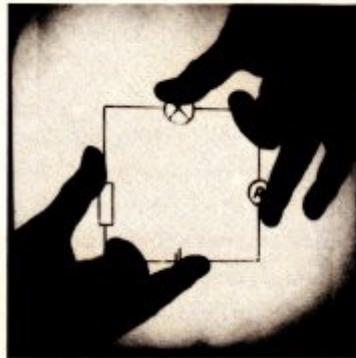
kennen von Zusammenhängen mit solchen relativ einfachen Aufgaben verbunden sind.

### 1.3.8. Richtung des Stromflusses

Zum Abschluß sei noch einmal darauf hingewiesen, daß bei der Erklärung des Stromflusses in einer bestimmten Schaltung das übliche Nachfahren der Stromleitung mit einem Finger bzw. einem Zeigestock von Minus nach Plus der Vorstellung eines Flusses von isolierten Teilchen Vorschub leistet.



Von daher erscheint es angebracht zu sein, ein solches punktförmiges Nachfahren zunächst völlig zu vermeiden und stets die ganzheitliche, ringförmige Bewegung des gesamten Stromkreises zu verdeutlichen.



# 1. Teilthema: Die elektrische Spannung

## 1.1. Spannung und Druckunterschied

### 1.1.1. Hinweise für den Unterricht und Lernziele

Im folgenden Unterrichtsvorschlag wird zunächst der Druckverlauf an einem Wasserkreis ausführlich behandelt. Hierdurch wird es notwendig, zunächst den Begriff "Druck" kurz zu besprechen. Dabei kommt es nicht darauf an, in der üblichen Breite alle Aspekte wie Höhenabhängigkeit, Abgrenzung zur Kraft u. a. zu behandeln. Vielmehr erscheint es nur als wichtig, daß die Schüler erkennen, daß die Einwirkung einer Kraft auf eine Flüssigkeit sich aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Teilchen dem ganzen System mitteilt. Darüber hinaus ist die Erkenntnis von Bedeutung, daß eine Flüssigkeit durch einen Druckunterschied im Sinne eines Ausgleiches in Bewegung versetzt wird (soweit dies durch die äußeren Randbedingungen möglich ist).

Die Behandlung des Druckverlaufes an einer schleichenden Flüssigkeitsströmung führt dann zusammen mit den entsprechenden elektrischen Versuchen zu einer Erarbeitung des zweiten KIRCHHOFF'schen Gesetzes.

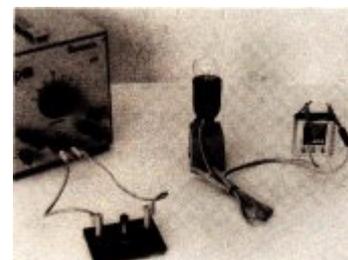
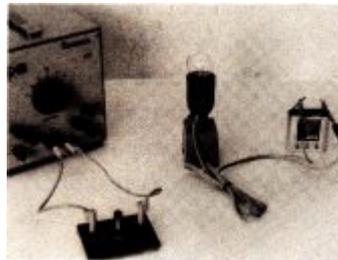
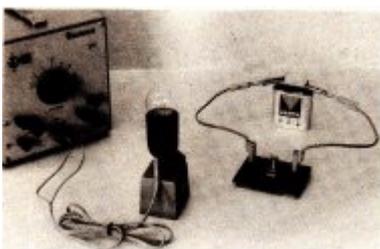
Als Lernziele für diesen Unterrichtsabschnitt lassen sich formulieren:

- Die Schüler sollen lernen, wie mit einem Vielfachinstrument die Spannung gemessen werden kann.
- Die Schüler sollen die Spannung beschreiben als eine Voraussetzung (Antrieb) für das Fließen eines elektrischen Stromes.
- Die Schüler sollen erkennen, daß das Fließen eines Wasserstromes durch den von der Pumpe erzeugten Druckunterschied hervorgerufen wird.
- Die Schüler sollen einsehen, daß Wasser stets von einem Ort mit hohem Druck zu einem Ort mit niedrigem Druck fließt, falls dies durch die äußeren Randbedingungen nicht verhindert wird.
- Die Schüler sollen erkennen, daß der Druck längs einer strömenden Flüssigkeit stets abnimmt, und daß die Summe aller Druckunterschiede gleich dem insgesamt von der Pumpe erzeugten Druckunterschied ist.

### 1.1.2. Einstieg

Als Möglichkeiten für einen Einstieg in diesen Unterrichtsabschnitt seien genannt:

- Zusammenstellung verschiedener Spannungsquellen (Batterie, Trafo, Steckdose) sowie Diskussion der Frage nach der Bedeutung der Voltangabe. Die häufig sehr unterschiedlichen Aussagen der Schüler aufgrund ihres verschiedenen Vorwissens können dann zum Anlaß eines genaueren Studiums genommen werden.
- Durchführung der drei im folgenden dargestellten Versuche als Demonstration



Material: 25 V-Netzgerät; Glühlampe 24V, 3W; 1 Glühlampe 2,5V, 0,25W

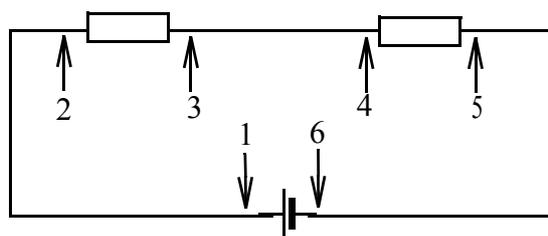
Eindrucksvoller ist dieser Versuch natürlich mit der Netzspannung von 220 V und entsprechenden Lampen (220 V / 75 W; 3,8 V / 0,3 A). Ein solcher Versuch darf aber aus Sicherheitsgründen nur vorgeführt werden, wenn eine spezielle Lampenfassung für die Verbindung der 3,8V Lampen mit der Netzspannung von 220 V vorhanden ist. Außerdem ist dafür Sorge zu tragen, daß bei dem Zerplatzen der kleinen Lampe keine Splitter wegfliegen können. Dabei sollte nicht

versäumt werden, den Ausgang des dritten Versuches vorher von den Schülern vorhersagen zu lassen. Da diese Vorhersagen i. a. mit dem Ausgang des Experimentes im Widerspruch stehen, ergibt sich von hieraus eine Begründung für ein näheres Studium der Spannung.

### 1.1.3. Spannungsmessung an einer Reihenschaltung

Es erscheint sinnvoll, den Unterricht zunächst mit Schülerübungen zur Spannungsmessung fortzusetzen, um anschließend die aufkommenden Fragen am Modell näher zu erläutern. Durch dieses Vorgehen wird verhindert, daß das Wassermodell als solches zu sehr in den Vordergrund tritt. Es wird vielmehr in seiner Funktion als Erklärungshilfe in den Unterricht einbezogen.

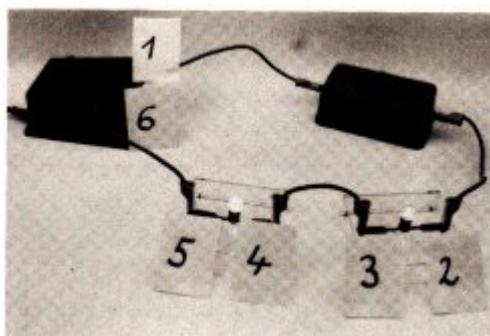
Vor der Durchführung der Schülerexperimente ist eine Übungsphase zur Handhabung des Vielfachmeßinstrumentes als Voltmeter notwendig. Dabei muß die grundsätzlich verschiedene Schaltungsweise des Voltmeters gegenüber dem Amperemeter hervorgehoben werden. Da die Schüler allerdings weder eine Vorstellung von der Art des Meßvorganges noch von der gemessenen Größe haben, kann es nicht ausbleiben, daß dieser Unterschied für einige Zeit nicht gesehen wird und es immer wieder zu Fehlmessungen kommt. Ein Übungsblatt zu dieser Frage ist im Schülerheft vorgesehen. Dort finden sich ebenfalls Hinweise für mögliche Schülerversuche. Diese sind derart ausgelegt, daß die Schüler sofort mit dem komplexen Problem der Teilspannungen in einem Serienkreis sowie der Beziehung zwischen Teilspannung und Gesamtspannung konfrontiert werden. Dies wird vorgeschlagen, da einfache Spannungsmessungen allein nicht motivierend genug erscheinen. Die bei einer solchen Messung zu erzielenden Resultate setzen sich zudem nicht deutlich von den Resultaten bei der Strommessung ab. Die den Schülern gestellte Aufgabe besteht darin, den folgenden Stromkreis aufzubauen und die Spannung zwischen den jeweils benachbarten Meßpunkten zu bestimmen.



Verwendet man für diesen Versuch einfache Widerstände und eine Batterie als Spannungsquelle, so ist der Versuch relativ problemlos durchzuführen. Allerdings kann es für Schüler durchaus schwierig sein, den Übergang von der Schaltskizze zur Schaltung fehlerfrei durchzuführen und jeweils die richtigen Meßpunkte zu identifizieren. Deshalb ist es angebracht, zunächst die einzelnen Meßpunkte in der konkreten Schaltung zu kennzeichnen (Nummern auf Papierstreifen, Nummern mit Kreide auf der Tischplatte), um erst danach die Messung durchführen zu lassen.

Etwas lebendiger und motivierender wird dieser Versuch, wenn statt der Widerstände kleine Lämpchen mit unterschiedlicher Leistungs- und Spannungsangabe benutzt werden (mit einstellbarem Trafo als Spannungsquelle). In diesem Fall können die Lämpchen zunächst einzeln und dann in Reihe geschaltet werden. Je nach Bauart der Lämpchen ergeben sich unterschiedliche Helligkeiten bei unterschiedlicher Einstellung des Trafos und die Untersuchung dieser

Tatsache gibt dem ganzen Versuch etwas mehr Farbe.



Nachteilig bei dieser Anordnung ist die Tatsache, daß viele Schüler nicht sorgfältig genug mit den Lämpchen umgehen und somit ist mit einem gewissen Ausfall wegen Überlastung zu rechnen. Werden die Meßergebnisse der verschiedenen Gruppen an der Tafel gesammelt und verglichen, so lassen sich 3 Gesetzmäßigkeiten ablesen (korrekte Messungen vorausgesetzt).

- Die Teilspannungen an den Widerständen sind kleiner als die Spannung an der Energiequelle.
- Die Spannung zwischen zwei Punkten einer Zuleitung ist gleich Null
- Die Summe der Teilspannungen längs des Stromkreises ist gleich der Gesamtspannung der Energiequelle.

Eine Erklärung dieser drei Befunde kann im Anschluß anhand des Wassermodells versucht werden.

#### 1.1.4. Druckunterschied im Wasserkreis als Antrieb

Da es sich bei der Spannung um eine Art "Antrieb" des elektrischen Stromes handelt, eröffnet die Frage nach dem Antrieb des Wasserstromes die nächste Unterrichtsaktivität.

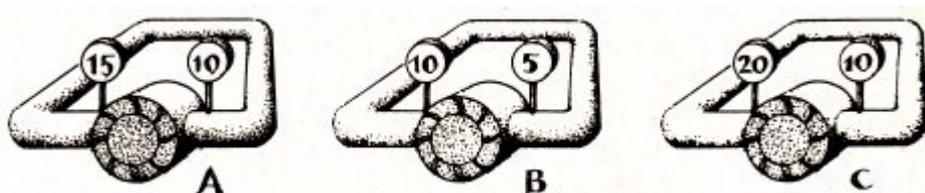
Die zu erwartenden Antworten der Schüler zu dieser Frage liegen zunächst auf der konkreten Ebene (Pumpe, Wasserrad, Kolben) und führen nach der Aufforderung, allgemeinere Kennzeichen zu nennen, erfahrungsgemäß zu der Aussage, daß der Druck der Anlaß für eine Wasserströmung ist. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die meisten Schüler nicht zwischen Kraft und Druck im physikalischen Sinn differenzieren können. Für sie ist häufig Druck eine spezielle, auf Flüssigkeiten ausgeübte Kraft.

In einem anschließenden Klassengespräch muß dann erarbeitet werden, dass Druck allein keine Wasserströmung erzeugt, sondern dass nur ein Druckunterschied längs eines Rohres dies bewirken. In einem geschlossenen Kreis kann Wasser nur von einem Ort mit höherem Druck zu einem Ort mit niedrigerem Druck fließen.

Dieser Druckunterschied wird üblicherweise durch eine Pumpe erzeugt.

Wie die Erfahrung gezeigt hat, erfassen einige Schüler diese Aussagen nicht in ihrer richtigen Bedeutung. Sie sehen häufig nicht den Unterschied der beiden Druckwerte, sondern ihr Verhältnis als bestimmend für die Antriebsfunktion der Pumpen an.

Diese Fehlinterpretation läßt sich beispielsweise überprüfen durch den Vergleich der folgenden drei Pumpen.



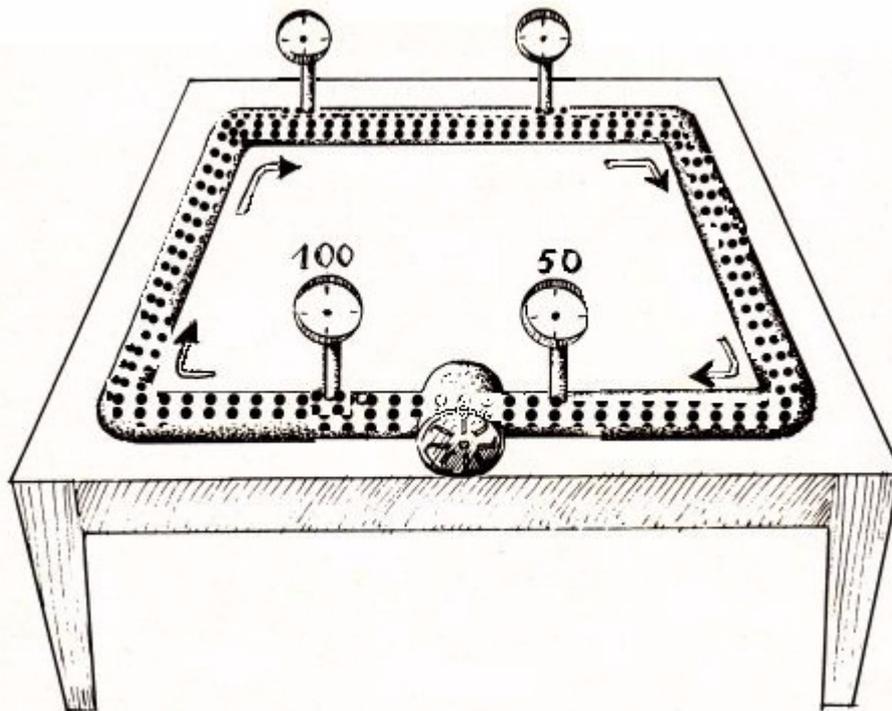
Auf die Frage, durch welche der drei Pumpen das Wasser in gleicher Weise angetrieben wird, entscheiden sich viele Schüler zunächst für die Pumpen B und C mit der Begründung, daß hier

das Verhältnis von Eingangs- zu Ausgangsdruck gleich ist.

Dieses Mißverständnis muß ausgeräumt werden, da sonst der folgende Unterrichtsstoff nicht sinnvoll eingeordnet werden kann. Als erläuterndes Beispiel können die Verhältnisse beim Seilziehen oder beim Austarieren einer Waage herangezogen werden.

### 1.1.5. Druckverlauf längs einer strömenden Flüssigkeit

Mit Hilfe der beiden obigen Aussagen über die Ursache und Richtung einer Wasserströmung kann dann die Frage nach dem zu erwartenden Druckverlauf längs eines Wasserkreises in Angriff genommen werden. Dazu wird angenommen, daß die Pumpe einen bestimmten Druckunterschied aufrecht erhält und sich in dem Wasserkreis eine stationäre Strömung einstellt.



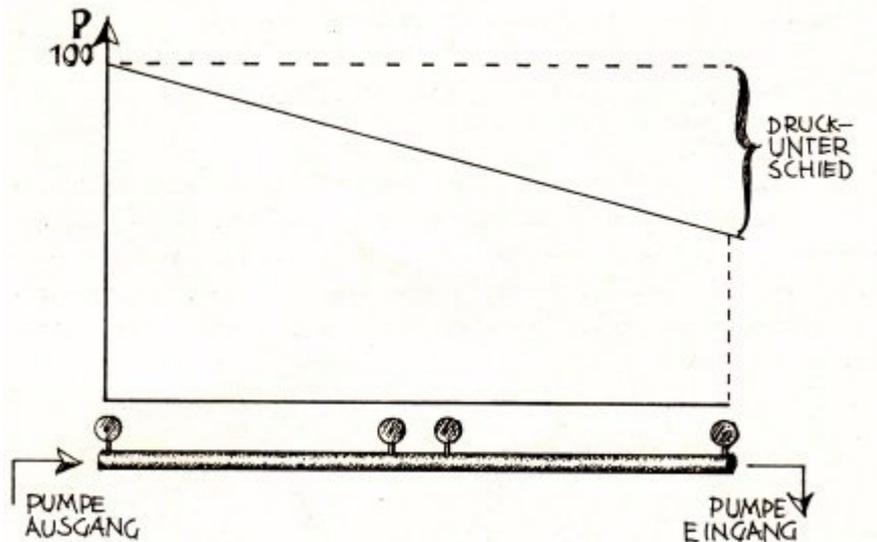
In dieser Abbildung<sup>1</sup> wird angedeutet, daß das gesamte Rohr mit einem gleichmäßig verteilten Stoff gefüllt ist, so daß der Strömung ein gleichmäßiger Widerstand entgegengesetzt wird. Zusätzlich sind vier Druckmesser angegeben. Die an der Pumpe angenommenen Druckangaben sind natürlich willkürlich. Insbesondere erscheint es für die nachfolgenden Überlegungen nicht notwendig, an dieser Stelle auf die Einheiten der Druckmessung einzugehen. Vielmehr wird aus Gründen der Zeitersparnis empfohlen, ganz allgemein nur von "Druckeinheiten" zu reden. Die zu lösende Aufgabe besteht nun darin, den Druckverlauf und daraufhin die auftretenden Druckunterschiede längs des Kreises zu bestimmen.

Ist die Funktion des Stoffes als Strömungswiderstand verdeutlicht, so gelingt es i. a., den Schülern den linearen Druckabfall längs des Rohres plausibel zu machen. Unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen Stoffverteilung gibt es kaum Argumente, die gegen einen linearen Druck-

---

1. Während der Erprobungsphase wurden diese und die folgenden Abbildung zur Vermeidung aufwendiger Tafelbilder mit Hilfe eines Tageslichtprojektors präsentiert.

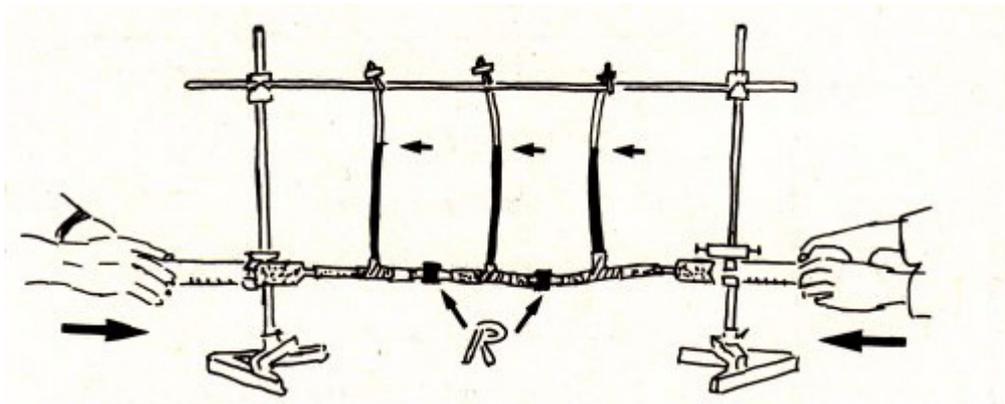
abfall längs des Rohres sprechen.



Offen bleibt dabei, welche Vorstellungen sich die Schüler vom Druck in einer strömenden Flüssigkeit machen und wie sie sich eine Abnahme des Druckes erklären.

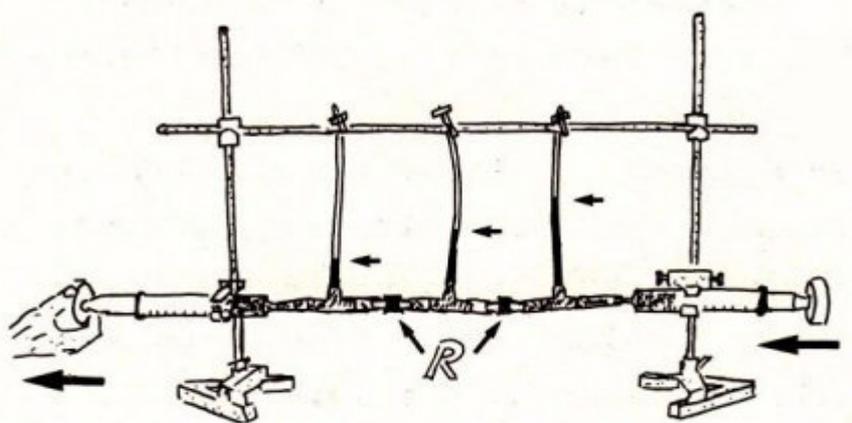
Falls es zu einer Diskussion über diese Frage kommt, kann zur Unterstützung und Klärung der Vorstellung der folgende Versuch durchgeführt werden:

a) Ruhende Flüssigkeit



Im statischen Fall ist der Druck überall gleich groß

b) Strömende Flüssigkeit



Bei einer strömenden Flüssigkeit nimmt der Druck in Folge der Reibung an den Wänden in Strömungsrichtung ab.

### **1.1.6. Anmerkungen zum Aufbau und zur Durchführung der Versuche a und b**

Die drei Steigrohre sind nach der Füllung mit Wasser mit Schlauch-klemmen zu verschließen. Die unterschiedlich stark zusammengedrückten Luftsäulen ergeben dann ein Maß für den Druck. Der Strömungswiderstand wird durch Verengung mittels Schlauchklemmen oder durch die in dem Kolbenprobermodell verwendeten Frittenscheiben erzeugt.

## **1.2. Spannung bei Reihen- und Parallelschaltungen**

### **1.2.1. Hinweise für den Unterricht und Lernziele**

Im folgenden Abschnitt wird die Analogie zwischen dem Druckunterschied bei hintereinander und parallel geschalteten Widerständen und den entsprechenden Teilspannungen in einem elektrischen Stromkreis durchgeführt. Dabei geht es - allgemein gesprochen - um die Erkenntnis, daß sich das Gleichgewicht zwischen Antrieb und Behinderung nicht nur für das gesamte System, sondern auch für jedes einzelnen Teilelement einstellt. Für den gleichen Mengendurchsatz pro Zeitdauer braucht man bei großen Widerständen einen großen Antrieb und entsprechend bei kleinen Widerständen einen kleinen Antrieb. Im konkret vorliegenden Fall des Wassermodells bedeutet dies die Einsicht, daß nur ein sehr kleiner Druckunterschied längs eines dicken Zuleitungsrohres auftritt, während der hauptsächliche Druckabfall längs eines Widerstandes festzustellen ist. Übertragen auf den elektrischen Stromkreis bedeutet dies, daß die Spannung längs einer Zuleitung praktisch gleich Null ist, während Teilspannungen nur an Widerständen auftreten.

Ein weiterer Schwerpunkt in diesem Abschnitt liegt bei der Problematisierung der häufig anzutreffenden Schülervorstellung, daß der Spannung - und auch dem Druck - ein mengenartiger Charakter zugeschrieben wird. Dies äußert sich in der immer wieder von Schülern aufgestellten Vermutung, daß sich die Spannung bei einer Parallelschaltung aufteilt. Gerade bei dieser Lernschwierigkeit kann die Analogie zum Druckverlauf in einer schleichenden Wasserströmung hilfreich sein.

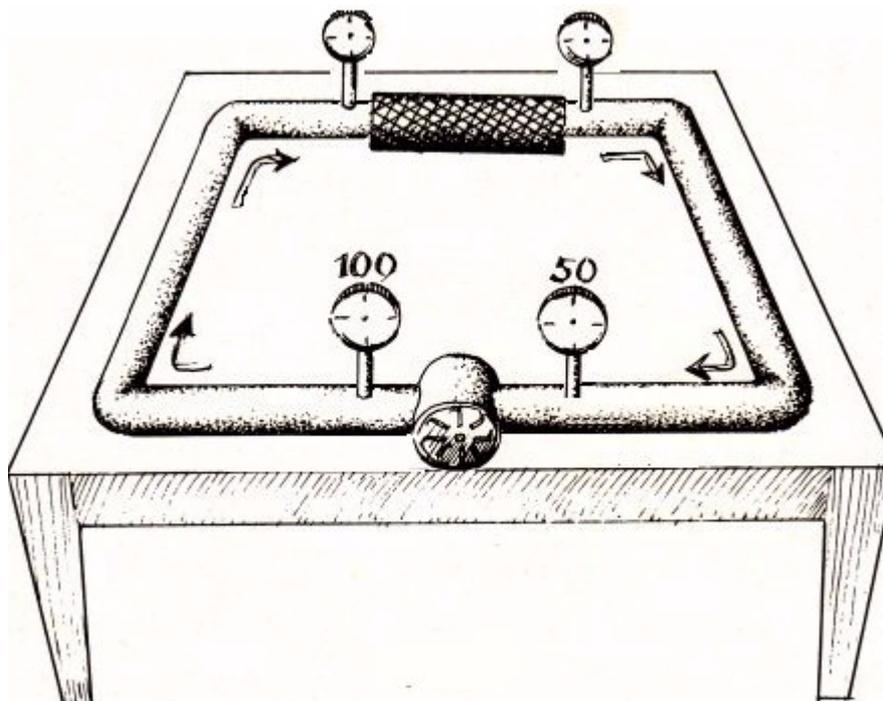
Als Lernziele lassen sich formulieren:

- Die Schüler sollen erkennen, daß die in einem Stromkreis auftretende Teilspannung der Druckdifferenz längs eines Widerstandes im Wassermodell analog ist.
- Die Schüler sollen erkennen, daß der Druckunterschied längs eines dicken Schlauches viel kleiner ist als längs eines nachfolgenden Widerstandes und die diesbezügliche Analogie zum elektrischen Stromkreis herstellen können.
- Die Schüler sollen durch Analogieschluß zum Wassermodell sowie durch experimentelle Erfahrung zu der Erkenntnis gelangen, daß die Summe aller Teilspannungen in einer Reihenschaltung gleich der Gesamtspannung der Energiequelle ist.
- Die Schüler sollen durch Analogieschluß zum Wassermodell sowie durch experimentelle Erfahrung zu der Erkenntnis gelangen, daß die Teilspannungen bei parallelen Widerständen gleich groß sind.

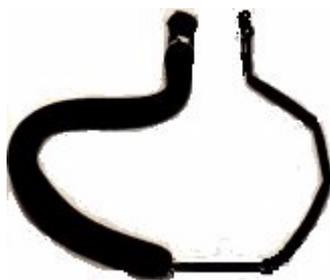
### **1.2.2. Druckverlauf längs eines Widerstandes**

Mit Hilfe der folgenden Abbildung läßt sich überprüfen, inwieweit die Schüler schon mit der

Vorstellung von Druckverlauf in einem Wasserrohr vertraut sind.

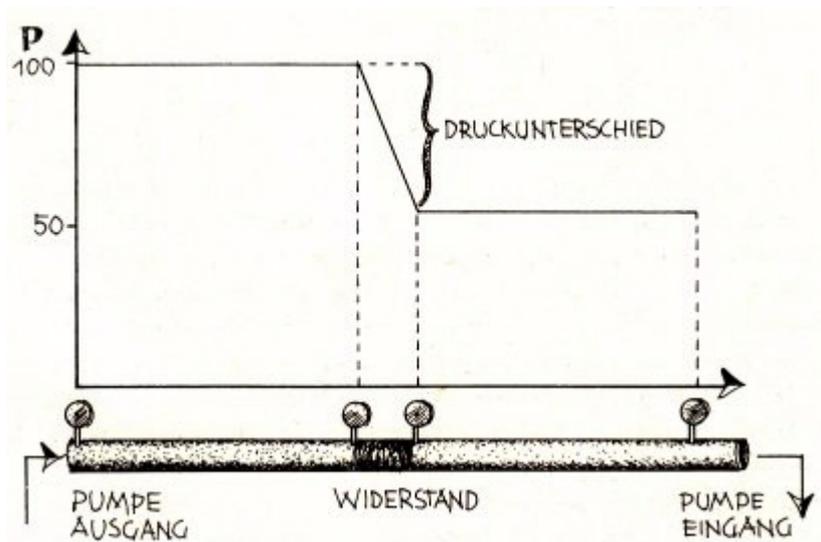


Auf dieser Abbildung ist der eigentliche Strömungswiderstand nur noch zwischen den beiden oberen Druckmessern angebracht, während das sonstige Rohr nur noch einen sehr geringen Strömungswiderstand aufweist. Mit dieser Anordnung wird die Analogie zum Stromkreis bestehend aus Zuleitungen und einem einzelnen Widerstand (außer der Spannungsquelle) hergestellt und es stellt sich erneut die Frage nach dem Druckverlauf und den auftretenden Druckunterschieden. Bei der Behandlung dieses Falles wird häufig von Schülern vermutet, daß an der Stelle vor dem Strömungswiderstand der größte Druck herrscht. Es ist anzunehmen, daß eine solche Vermutung wiederum von der Vorstellung von einer Strömung bestehend aus kleinen individuell sich bewegenden Teilchen herrührt (eigener Antrieb oder Trägheit). Diese Vorstellung muß natürlich, wenn sie angesprochen wird, ausführlich behandelt und "widerlegt" werden. Als Unterstützung für eine solche Widerlegung mag die (auch im Schülerheft vorhandene) Abbildung dienen, auf der der Druck in einem Wasserstrom durch die Ausdehnung des Schlauches direkt abzulesen ist.



Auf dieser Abbildung wird der Druck direkt durch die Ausdehnung des Schlauches angezeigt, und es wird deutlich, daß unmittelbar vor einem Widerstand kein besonders hoher Druck vorhanden ist. Anhand dieser Abbildung sollte es gelingen, die Frage nach dem Druckverlauf vor,

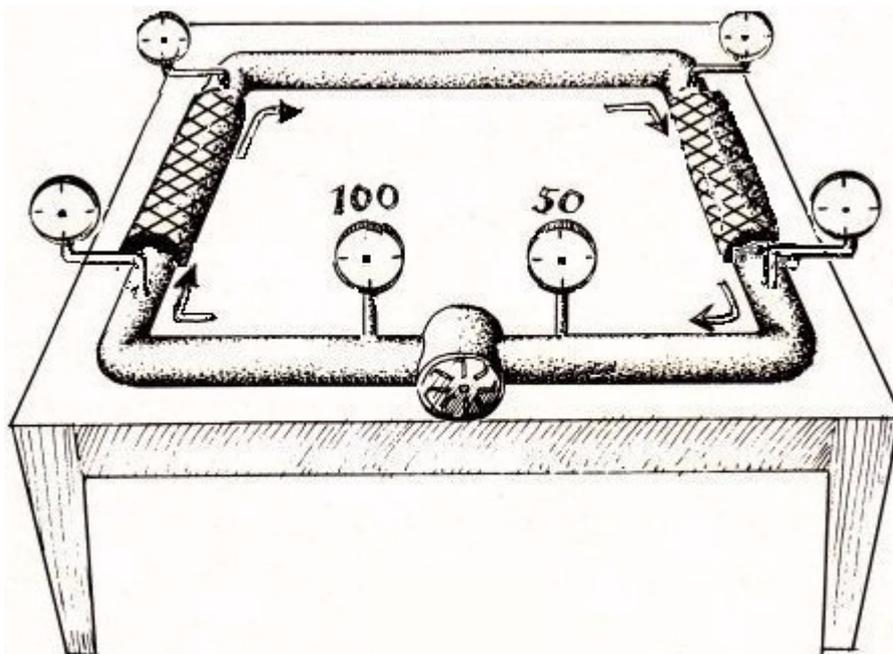
längs und hinter einem Strömungswiderstand erfolgreich zu beantworten.



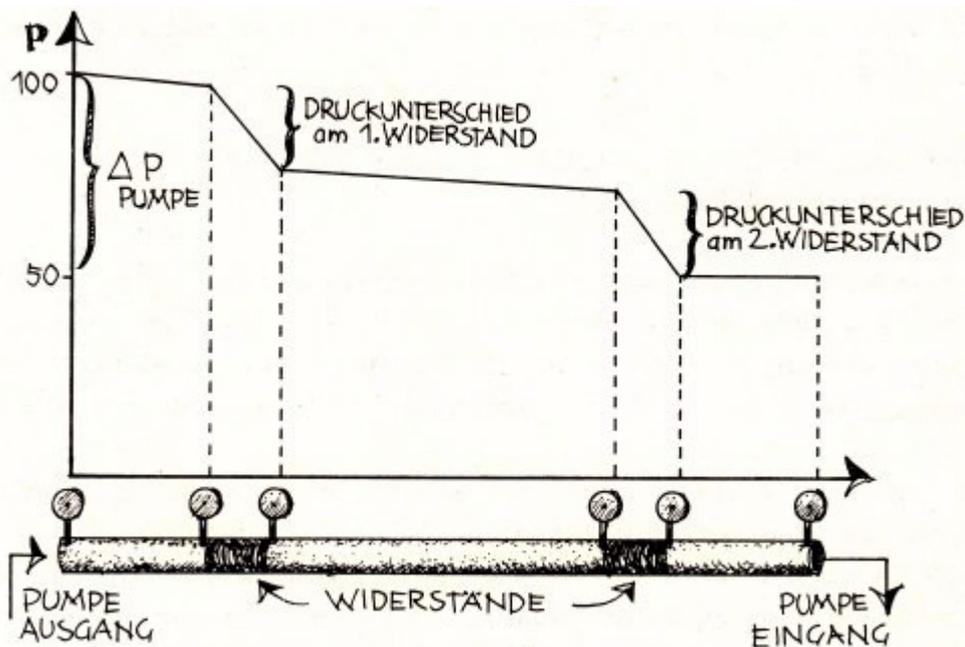
### 1.2.3. Druckverlauf in einer Reihenschaltung

Das Problem der Reihenschaltung kann zur Übung und Festigung der Vorstellungen vom Druckverlauf in einer Wasserströmung noch einmal mit Hilfe der folgenden Abbildung behandelt werden.

Hier geht es um die Bestimmung des Druckverlaufes und der auftretenden Druckunterschiede bei zwei in Reihe angebrachten Strömungswiderständen.

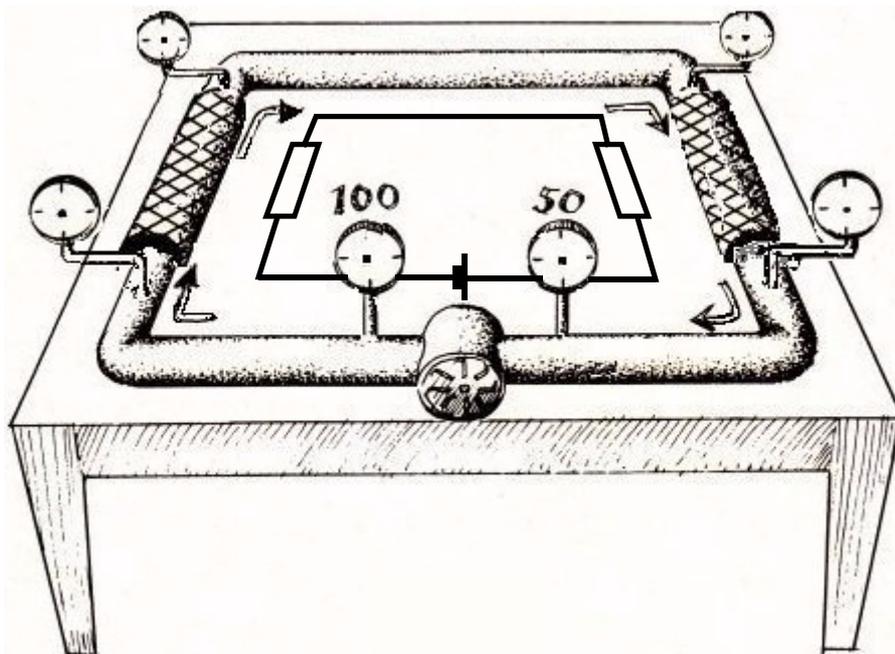


Das im Klassengespräch erarbeitete Ergebnis kann folgendermaßen dargestellt werden:



#### 1.2.4. Analogie von Druckdifferenz und Spannung

Mit diesem Ergebnis kann zum Abschluß der Bezug zum Ausgangsversuch dieses Unterrichtsabschnittes (Spannungsmessung an zwei Widerständen bzw. Lämpchen) hergestellt und die Ergebnisse des Versuches gedeutet werden.



Die Bewältigung dieser Aufgabe stellt - wie die Erfahrung gezeigt hat - eine recht große Anforderung an die Schüler dar. Es müssen hierbei sowohl die Druckverhältnisse am Wasserkreis als auch die Ergebnisse der Spannungsmessung am Stromkreis im Zusammenhang gesehen und im einzelnen verknüpft werden. Im Schülerheft sind verschiedene Aufgaben als Übungsfeld für die Bewältigung dieser Aufgabe angegeben.

#### 1.2.5. Spannungsmessung in einer Parallelschaltung (Schülerheft, S. 194)

In diesem Abschnitt soll der Spannungsverlauf bei einer Parallelschaltung aufgezeigt werden. Dabei geht es vor allem um eine Problematisierung der sehr häufig vorhandenen Schülervor-

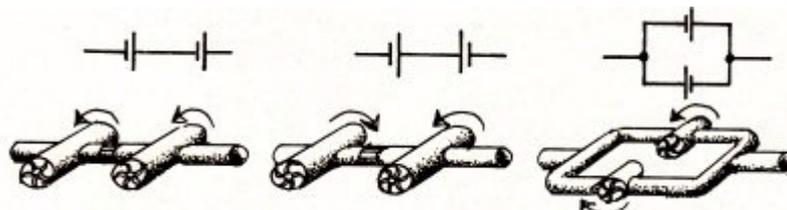
stellung, daß eine Spannung sich aufteilt und gleichmäßig auf die einzelnen Parallelzweige verteilt.

Es wird vorgeschlagen, zunächst anhand der Aufgaben im Schülerheft Spannungsmessungen durchführen zu lassen.

Auch in diesem Falle ist es aus Motivationsgründen günstig, wenn als Widerstände zwei Lämpchen mit unterschiedlicher Leistungsangabe benutzt werden können. Die Gefahr der Überlastung einer Lampe ist bei variabler Spannungsquelle in diesem Fall allerdings besonders groß. Wird für einen Erklärungsversuch der Meßergebnisse das Wassermodell herangezogen, so läßt sich überprüfen, inwieweit die Schüler in konstruktiver Weise die bisher gelernten Sätze über das Wassermodell anwenden können und zu dem Schluß gelangen, daß der Druckunterschied an zwei parallelen Widerständen unabhängig von der Größe der Widerstände gleich sein muß. Diese am Wassermodell gewonnene Aussage muß dann in analoger Weise auf den Stromkreis übertragen werden.

### 1.2.6. Reihen- und Parallelschaltung von Energiequellen

Als weitere Anwendungsmöglichkeit für Reihen- und Parallelschaltungen bietet sich das Zusammenfügen mehrerer Energiequellen an. Von den grundsätzlich vorhandenen vier Schaltungsmöglichkeiten für zwei Zellen lassen sich die ersten drei relativ einfach durch Analogie zu Wasserpumpen einsichtig machen.



Hierbei muß nur vorausgesetzt werden, daß die verwendeten Pumpen unabhängig vom vorhandenen Druck stets nur einen bestimmten Druckunterschied zwischen Eingang und Ausgang herstellen.

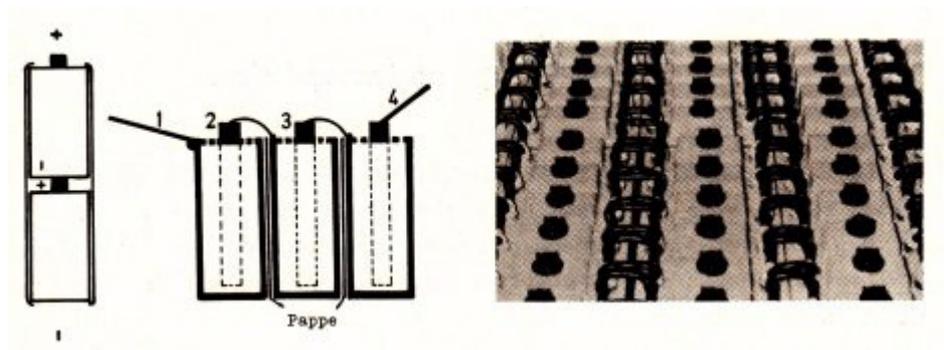
Etwas schwieriger kann sich die Erklärung zweier parallel geschalteter Pumpen erweisen.



Hier ist vielleicht nicht sofort klar, was die zweite Pumpe bewirkt, wenn die erste schon den richtigen Druckunterschied hergestellt hat. Es ist für Schüler nicht ganz selbstverständlich, daß dann die zweite Pumpe auf den Druckunterschied praktisch keinen Einfluß mehr hat.

Die technische Anwendung der Reihenschaltung von Energiequellen läßt sich am Akku, an einer 4,5 V Flachbatterie oder an der Schaltung einer Taschenlampe mit mehreren Monozellen

demonstrieren.



Die Art der Reihenschaltung der Monozellen lässt sich allerdings erst verstehen, wenn der Aufbau solcher Zellen bekannt ist.

# 1. Teilthema: Das OHMsche Gesetz

## 1.1. Mathematische Formulierung der Systembeziehungen

### 1.1.1. Allgemeine Hinweise

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit einem Teilgebiet der Elektrizitätslehre, dem wegen der darin enthaltenen Mathematisierung physikalischer Sachverhalte ein hoher Stellenwert im traditionellen Physikunterricht zukommt. Die Mathematisierung gilt allgemein als eine der fundamentalen Eigenschaften der Physik als Wissenschaft und die zumindest exemplarische Darstellung dieses Aspektes auch in der Sek. I als unverzichtbar. Darüber hinaus liefern das OHMsche Gesetz und die KIRCHHOFFSchen Regeln eine bequeme Basis für die Auswahl von Testaufgaben, die somit einen großen Einfluß auf die Beurteilung des Lernerfolges von Schülern haben.

Im Teil A dieser Unterrichtseinheit ist schon ausführlich dargelegt worden, in welcher Form mit Hilfe von Gleichgewichtsbetrachtungen an dem zugrundeliegenden System eine Mathematisierung durchgeführt werden kann. Im folgenden wird diese Argumentation noch einmal kurz zusammenfassend dargestellt und zwar in bezug auf die Bedeutung für den konkreten Unterricht.

### 1.1.2. Die Unterscheidung von Zahlen- und Größenkalkül

Während im Mathematikunterricht Operationen mit Zahlen im Mittelpunkt stehen, werden im Physikunterricht diese Operationen - häufig ohne explizite Ausführung - auf Größen übertragen. Dieser Übergang beginnt schon sehr früh bei der Einführung von Flächen und Volumina und setzt sich dann über die Einführung von Produkt- und Quotientengrößen während des gesamten Physikunterrichts fort. Die mit diesem Wechsel zusammenhängende Problematik läßt sich in der folgenden Frage vereinfacht darstellen:

Wenn  $3 \times 4$  cm bedeutet, daß  $4$  cm  $3$  x addiert werden sollen, was bedeuten dann  $3$  cm  $\times 4$  cm? Sicherlich "meistern" viele Schüler diese Schwierigkeit durch rezeptartige Ausführung von Regeln und durch Gewöhnung. Es ist jedoch eine offene Frage, wie oft diese Schwierigkeit bei Schülern Verständnisbarrieren erzeugt und dadurch zu der weit verbreiteten Abneigung gegenüber einer Mathematisierung im Physikunterricht beiträgt.

### 1.1.3. Halbquantitative Ableitungen

Um zu einer halbquantitativen Fassung der Beziehung zwischen  $U$ ,  $I$  und  $R$  in der Form von Jесто-Beziehungen zu gelangen, sind Betrachtungen über ein Fließgleichgewicht an dem zugrunde liegenden System notwendig. Solche Gleichgewichtsbetrachtungen können den Schülern zunächst an der ihnen bekannten Fahrradkette plausibel gemacht werden und müssen dann als Hypothese auf den Stromkreis übertragen werden.

### 1.1.4. Übergang zu meßbaren Größen

Um zu einer strengen quantitativen Fassung der bestehenden Beziehungen zwischen  $U$ ,  $I$  und  $R$  zu kommen, ist es zunächst erforderlich, die Ebene der Phänomene und der ganzheitlichen Betrachtungsweise zu verlassen und sich mit Hilfe möglichst eindeutiger Meßverfahren auf die rein quantitative Größen, auf das Meßbare, und nur das Meßbare zu beschränken.

Dieser Übergang, der für viele Physiker den Eintritt in den eigentlichen Rahmen der Physik bedeutet, stellt zumindest für Schüler einen schwierigen Abstraktionsprozeß dar. Von daher erscheint es angebracht, diesen Abstraktionsprozeß explizit zum Gegenstand des Unterrichts zu machen, und dies nicht nur einmal, sondern immer dann, wenn bei der Einführung neuer Begriffe dieser Abstraktionsprozeß vollzogen wird.

### 1.1.5. Experimentelle Ergebnisse und hypothetische Setzungen

Bei der Ausschärfung eines qualitativen Begriffes in Richtung einer quantitativen Fassung kommen Setzungen bzw. hypothetische Annahmen ins Spiel, die nicht aus Experimenten bzw. sinnlich beobachtbaren Phänomenen abgeleitet werden können. Beispielsweise müssen über

die Frage, wann zwei unterschiedliche Gegenstände den gleich großen elektrischen Widerstand haben und unter welchen Bedingungen ein Widerstand als konstant anzusehen ist, im voraus Abmachungen getroffen werden. Diese Abmachungen werden dann durch das Experiment als sinnvoll bestätigt.

## 1.2. Lernziele

Als Lernziele lassen sich formulieren:

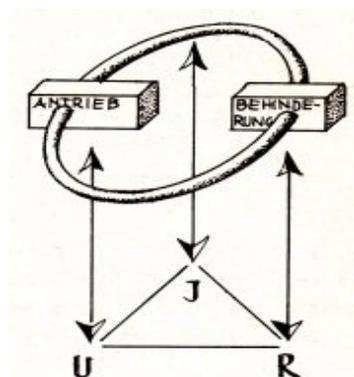
- Die Schüler sollen die drei Elemente
  - Antrieb/Energiezufuhr
  - Ringförmiger abgeschlossener Materie(Ladungs)fluß/ Energieübertragung
  - Behinderung/Energieabgabe
 als wesentlich für ein System erkennen, in dem wie beim Stromkreis Energie ohne direkte Kopplung an Materie übertragen wird.
- Die Schüler sollen diese allgemeinen Systemelemente den physikalischen Größen "Spannung", "Strom" und "Widerstand" zuordnen können.
- Die Schüler sollen für den stationären Fall die Größe des Stromes als Ergebnis eines Gleichgewichtes zwischen Antrieb und Behinderung auffassen und hieraus auf die halbquantitativen Beziehungen zwischen U, I und R schließen können.
- Die Schüler sollen wissen, daß das Gesetz  $R = U/I$  nur für den stationären Fall abgeleitet wurde und für nichtstationäre Fälle neu überprüft werden muß.
- Die Schüler sollen das Gesetz  $R = U/I$  auf Reihen- und Parallelschaltungen von Gleichstromkreisen anwenden und die Gesamtwiderstände sowie die Beziehungen zwischen Teilströmen und Widerständen berechnen können.
- Die Schüler sollen erkennen, daß die Schlußweise: "Proportionalität von U und I bedeutet konstanter Widerstand" sinnvoll ist und durch das Experiment unterstützt wird.
- Die Schüler sollen wissen, daß der Wert des Widerstandes durch die Vorschrift  $1\Omega = 1 \text{ V/A}$  festgelegt wird.

## 1.3. Hinweise für den Unterricht

### 1.3.1. Verdeutlichung des Übergangs vom Qualitativen zum Quantitativen

Die bei diesem Abschnitt zu bearbeitenden Lernschritte setzen eine konzentrierte Mitarbeit voraus und bedürfen der intensiven Unterstützung durch den Lehrer. Aus diesem Grund tritt in dieser Phase das Schülerheft etwas zurück. Die dort angeführten Inhalte beschränken sich überwiegend auf Anleitungen zum Experimentieren und zum Üben, während die Informationen zum Erfassen neuer Vorstellungen, Begriffe und Regeln verstärkt vom Lehrer eingebracht werden müssen.

Die Quantifizierung qualitativ entwickelter Begriffe ist ein für die Physik wesentlicher Schritt und kann an dieser Stelle den Schülern erneut vorgestellt und begründet werden. Evtl. erleichtert Die folgende Abbildung kann dazu dienen, die verschiedenen Ebenen zu verdeutlichen.



### 1.3.2. Halbquantitative Beziehungen (Schülerheft, S. 202)

Die Überlegungen, die zum Erfassen der halbquantitativen Beziehungen hinführen, lassen sich folgendermaßen gliedern:

4. Der konstante Strom ergibt sich als Fließgleichgewicht zwischen Antrieb und Behinderung.
5. Aufgrund dieses Zusammenhanges müssen feste Beziehungen zwischen den drei Größen U, I und R bestehen, d. h. die einzelnen Größen können sich nicht unabhängig voneinander verändern.
6. Unter Konstanthaltung einer Größe wird der Zusammenhang zwischen den beiden anderen in einer "Je-desto"-Formulierung festgelegt.

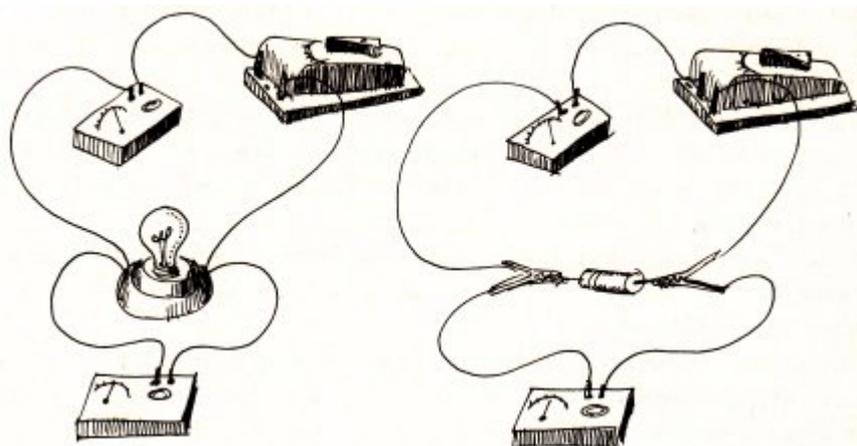
	Antrieb	Materiefluß	Behinderung
Wenn der Antrieb konstant bleibt und die Behinderung kleiner wird, dann wird der Materiefluß größer.	konstant		
Wenn der Materiefluß konstant bleiben soll, muß der Antrieb größer werden, falls die Behinderung größer wird.		konstant	
Wenn die Behinderung konstant bleibt und der Antrieb größer wird, dann wird der Materiefluß größer.			konstant

Für das Erfassen des Fließgleichgewichtes kann eine Analogie zur Fahrradkette hilfreich sein. Wie die Erfahrung gezeigt hat, gelingt die Formulierung der halbquantitativen Beziehung zwischen U, I und R ohne größere Schwierigkeiten.

### 1.3.3. Quantitative Formulierung

Bei der Meßbarkeit eines Widerstandes kann zunächst die Frage geklärt werden, woran man die Gleichheit des elektrischen Widerstandes bei zwei äußerlich verschieden aussehenden Leitern feststellen kann. Im Hinblick auf die im Schülerheft vorgeschlagenen Versuche empfiehlt es

sich, diese Frage konkret anhand des folgenden Versuchsaufbaues zu diskutieren.



Da sich der elektrische Widerstand als eine Summe von Einzeleffekten (Wechselwirkung zwischen Elektron und Gitter) zusammensetzt, kann nur eine makrophysikalische Messung Aussagen über die Größe des Widerstandes geben. Von daher erscheint es naheliegend, die Gleichheit zweier Widerstände zu postulieren, wenn bei gleicher Spannung jeweils der gleiche Strom fließt.

Danach kann die Frage gestellt werden, wie ein Widerstand verdoppelt bzw. verdreifacht werden kann. Der Vorschlag, mehrere Widerstände in Reihe zu schalten, erscheint vielen Schülern als selbstverständlich. Um diese angebliche Selbstverständlichkeit zu erschüttern, kann es notwendig sein, noch einmal an das Beispiel von Baustellen bei einer Autobahn zu erinnern. In diesem Fall gilt nicht das einfache Prinzip der Additivität.

Ist experimentell festgestellt worden, daß der Strom sich umgekehrt proportional zur Zahl der in Reihe geschalteten Widerstände verhält, so wird schließlich die Frage gestellt, wann ein Widerstand bei der Veränderung von Strom und Spannung als konstant anzusehen ist. Bei dieser Frage fehlt Schülern häufig die Vorstellung, daß ein Widerstand sich überhaupt verändern kann. Für sie ist es vielmehr selbstverständlich, daß ein äußerlich gleichbleibender Gegenstand auch einen konstanten elektrischen Widerstand aufweist.

Die Aufgabe des Lehrers besteht nun darin, Möglichkeiten für eine Veränderung des Widerstandes für Schüler einsichtig zu machen. Hier mögen Hinweise auf eine Temperaturabhängigkeit oder auf Halbleitereffekte genügen. Evtl. ist es aber auch notwendig, die Änderung des Stromflusses durch Erhitzen eines Drahtes zu demonstrieren.

Ist die Möglichkeit einer Veränderbarkeit des Widerstandes deutlich geworden, so kann i. a. Einigkeit darüber erzielt werden, daß eine Konstanz des Widerstandes sich an einer Proportionalität von  $U$  und  $I$  erkennen läßt.

- Falls bei doppelter Spannung (Antrieb) der Strom (die Durchsatzmenge pro Zeiteinheit) verdoppelt wird, so deutet dies auf einen konstanten Widerstand hin.
- Steigt der Strom überproportional, so deutet dies auf einen kleineren Widerstand hin. Steigt der Strom weniger als proportional, so läßt dies auf einen größeren Widerstand schließen.

Mit dieser Setzung im Hintergrund läßt sich jetzt gut die Messung von  $U$  und  $I$  für die beiden oben dargestellten Verbraucher begründen. Dabei finden die Schüler heraus, daß der Widerstand des elektronischen Bauteiles konstant bleibt, während der Widerstand der Glühlampe mit steigendem Strom größer wird.

Diese Veränderung des Widerstandes kann als Temperatureinfluß gedeutet werden, wobei vom Lehrer die Information gegeben werden muß, daß für einen großen Bereich der Elektrizitätslehre und für einen großen Bereich aller Stoffe experimentell das Gesetz

$$R = \text{konstant für } T = \text{konstant}$$

bestätigt wurde.

Ist die Bedeutung dieses Gesetzes erarbeitet worden, so muß jetzt noch die Vorschrift für die Festlegung der Maßeinheit für den Widerstand  $1\Omega = \frac{1V}{1A}$  mitgeteilt werden:

### 1.3.4. Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung

Im Schülerheft sind Beispiele angegeben, wie das Gesetz  $R = U/I$  zur Bestimmung einer der drei Größen in komplexeren Schaltkreisen herangezogen werden kann.

In diesem Zusammenhang ist das Konzept des Gesamtwiderstandes wichtig, das noch gemeinsam erarbeitet werden muß.

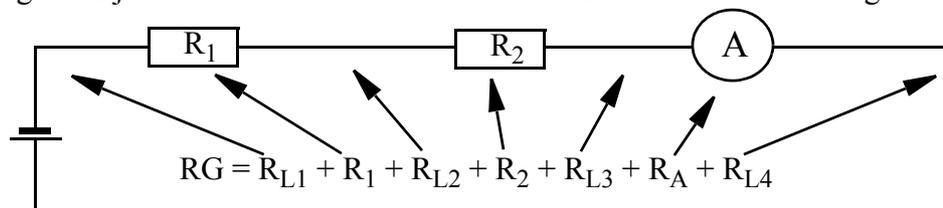
Im Falle der Reihenschaltung ist diese Frage relativ einfach. Sie wurde auch schon bei der Diskussion der Vergrößerung eines Widerstandes behandelt.

Als Problem tritt höchstens auf, daß die Schüler das Ergebnis

$$R_G = R_1 + R_2 + R_3 +$$

als selbstverständlich empfinden. Als Problematisierung dieser Einschätzung wird noch einmal auf das schon besprochene Beispiel einer Baustelle auf einer Autobahn verwiesen oder auf ähnliche Fälle, bei denen das Flaschenhalsprinzip zur Anwendung kommt.

Zur Verdeutlichung des Systemzusammenhanges scheint es hilfreich zu sein, wenn zunächst der Beitrag eines jeden einzelnen Bauelementes zum Gesamtwiderstand aufgezählt wird.



In einem zweiten Schritt wird dann

$$R_{Li} = R_A = 0$$

gesetzt und es folgt:

$$R_G = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

### 1.3.5. Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung

Im Falle einer Parallelschaltung ist das richtige Erfassen des Gesamtwiderstandes erfahrungsgemäß für Schüler bedeutend schwieriger. Es widerspricht der alltäglichen Erfahrung, daß durch das Hinzufügen von Widerständen ein Prozeß erleichtert wird. Diese Schwierigkeit kann verringert werden, wenn zunächst statt von Widerständen von parallelen Strombahnen gesprochen wird, die, wie jede andere Strombahn auch, einen Widerstand haben.

Eine weitere Schwierigkeit entsteht dadurch, daß die Formel für den Gesamtwiderstand aus dem OHMschen Gesetz mit Hilfe algebraischer Verfahren abgeleitet wird. Ein solches Verfahren stößt häufig auf Unverständnis.

Zur Erarbeitung der notwendigen Lernschritte und zur besseren Klärung kann der Lernweg in folgende Stufen eingeteilt werden:

7. Beim Hinzuschalten einer zweiten parallelen Strombahn wird der Gesamtwiderstand kleiner als der ursprünglich vorhandene Widerstand.
8. Der Gesamtwiderstand ist immer kleiner als der kleinste einzelne Widerstand. (Man kann immer mit dem kleinsten Widerstand beginnen und dann die weiteren hinzuschalten.)
9. Der Gesamtwiderstand muß in eindeutiger (berechenbarer) Weise mit den Einzelwiderständen zusammenhängen.
10. Die Gleichung für den Gesamtwiderstand läßt sich aus dem folgenden Gesetzen ableiten:

$$R = \frac{U}{I}$$

$$U_1 = U_2$$

$$I_G = I_1 + I_2$$

Ableitung:

Frage: Wie groß muß  $R_G$  sein, damit der gleiche Strom fließt wie in der Parallelschaltung?

$$U_1 = U_2 = U_G \quad I_1 = \frac{U_G}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_G}{R_2} \quad I_G = I_1 + I_2$$

$$I_G = \frac{U_G}{R_1} + \frac{U_G}{R_2} = U_G \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad I_G = \frac{U_G}{R_G} \quad \frac{1}{R_G} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

5. Vergleich der Ergebnisse mit eigenen Schätzungen

Tabelle 1:

Beispiel	Schätzung	Ergebnis
$R_1 = R_2$	$R_G$ sollte halb so groß sein wie $R_1$ .	$\frac{1}{R_G} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} = \frac{2}{R_1}$ $R_G = \frac{R_1}{2}$
$R_1 = 1\Omega$ $R_1 = 3\Omega$	$R_G$ sollte kleiner sein als $1\Omega$ aber größer als $0,5\Omega$ .	$\frac{1}{R_G} = \frac{1}{1\Omega} + \frac{1}{3\Omega} = \frac{4}{3\Omega}$ $R_G = \frac{3}{4}\Omega$
$R_1 = 10\Omega$ $R_1 = 100\Omega$	$R_G$ sollte nur etwas kleiner sein als $10\Omega$	$\frac{1}{R_G} = \frac{1}{10\Omega} + \frac{1}{100\Omega} = \frac{11}{100\Omega}$ $R_G = \frac{100}{11}\Omega \approx 9,1\Omega$

6. Die Gleichung für  $R_G$  ergibt sich für mehr als zwei Parallelwiderstände mit einer entsprechenden Ableitung:

$$\frac{1}{R_G} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

### 1.3.6. Potentiometerschaltung

In diesem Abschnitt liegt der Schwerpunkt auf der Berechnung von Teilspannungen in einer Reihenschaltung.

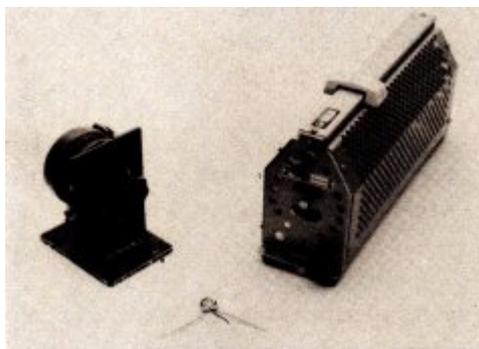
Ausgehend von der Konstanz des Stromes und unter Anwendung der Gleichung  $R = U/I$  auf

jeden einzelnen Widerstand ergibt sich

$$I_G = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$$

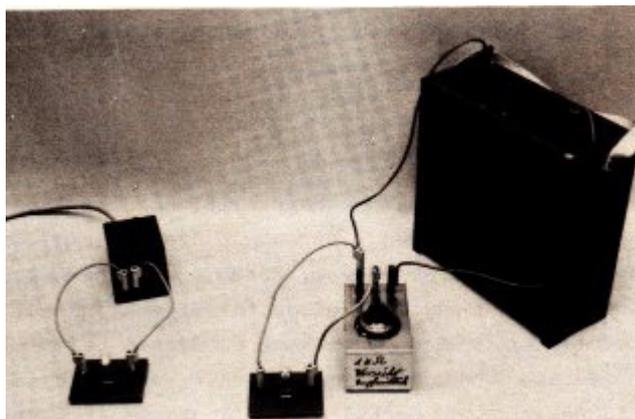
Auch wenn dies kein neues Ergebnis darstellt, sondern schon in dem ursprünglichen Gesetz enthalten ist, so hat diese Formulierung doch Vorteile. Sie erlaubt es einmal, durch Anwendung der Proportionalität eine Teilspannung bzw. einen Teilwiderstand auf einfache Weise zu bestimmen. Zum anderen kann an diesem Beispiel gezeigt werden, wie die Anwendung algebraischer Verfahren in der Physik dazu dient, Beziehungen aufzudecken, die in einem physikalischen Gesetz verborgen sind.

Die Verwendung eines Potentiometers setzt voraus, daß die lineare Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge eines Drahtes bekannt ist. In dieser Unterrichtseinheit wird diese Abhängigkeit explizit erst im nächsten Abschnitt behandelt und muß gegebenenfalls vorgezogen werden. Dabei liegt erfahrungsgemäß eine Schwierigkeit für Schüler in der Zuordnung der Bauteile mit ihren drei Anschlüssen zur Schaltskizze.



Dieser Schritt sollte möglichst mit unterschiedlichen technischen Ausführungen eingeübt werden.

Wie schon im ersten Abschnitt erwähnt, kann das Arbeiten mit Potentiometerschaltungen zu Schwierigkeiten führen, wenn Schüler versuchen, sich mit einem Potentiometer ähnlich wie mit einem Transformator eine variable Spannungsquelle herzustellen.



Während bei der Spannungsquelle eine Glühlampe mit den passenden Anschlußwerten leuchtet, bricht bei einem Potentiometer üblicherweise die Spannung zusammen. Dieser für den Fachmann einsichtige Tatbestand wirkt für einen Schüler sehr überraschend und unverständlich, wenn als Spannung nur der Meßwert genommen und das jeweils mit eingeschlossene System vernachlässigt wird.

Im Fall eines Potentiometers liegt die Ursache für die Spannung (die EMK) außerhalb des Systems, im Falle des Trafos ist sie mit eingeschlossen. Insofern liegen unterschiedliche Systeme

vor, wodurch ein unterschiedliches Verhalten verständlich wird.

Tritt dies Problem im Unterricht auf und wird es explizit behandelt, so ist dies eine gute Gelegenheit, um noch einmal abschließend über die Ursache der Spannung in einer Batterie und über das Auftreten der Spannung in einem Leitungsnetz (evtl. im Vergleich zum Wassermmodell) zu sprechen. Wenn genügend Zeit zur Verfügung steht, kann an dieser Stelle auch auf den Innenwiderstand einer Spannungsquelle eingegangen werden.

### **1.3.7. Teilströme in einer Parallelschaltung**

Eine weitere Anwendung der Gleichung  $R = U/I$  auf Schaltkreise stellt die Berechnung von Teilströmen in einer Parallelschaltung dar.

Aus  $U_1 = U_2$  und  $U_1 = I_1 \cdot R_1$  und  $U_2 = I_2 \cdot R_2$  folgt:

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Dies ist ein weiteres Beispiel für die Anwendung von algebraischen Verfahren zur Aufdeckung vorhandener Beziehungen.

# **1. Teilthema: Anwendungen der Regeln des elektrischen Stromkreises**

## **1.1. Die Veränderbarkeit des Widerstandes**

### **1.1.1. Allgemeine Hinweise und Lernziele**

Der spezifische Widerstand sowie die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes werden üblicherweise im Zusammenhang mit der Einführung des Widerstandes behandelt. In dieser Unterrichtseinheit folgt dieses Kapitel am Ende des Lehrganges, und zwar aus zweierlei Gründen. Zum einen soll eine deutliche Trennung zwischen dem überwiegend systembedingtem Gesamtwiderstand einer Schaltung und dem mehr durch Materialeigenschaften bedingtem spezifischen Widerstand erreicht werden. Zum anderen läßt sich die Behandlung des spezifischen Widerstandes als Anwendung des bisherigen Unterrichtes durchführen.

Eine weitere wichtige Anwendung des bisherigen Unterrichtes ist die Behandlung der Gefahren des elektrischen Stromes. Hier ist es besonders wichtig, daß die Schüler die Gefahr erkennen, die auftritt, wenn sie selbst Teil des Stromkreissystems werden. Darüber hinaus ist es wichtig, aufzuzeigen, daß das Haus über die Erde und die Hochspannungsleitung stets schon fast einen geschlossenen Stromkreis bildet, der durch das einfache Berühren einer nicht isolierten spannungsführenden Leitung geschlossen wird.

Als Lernziele lassen sich formulieren:

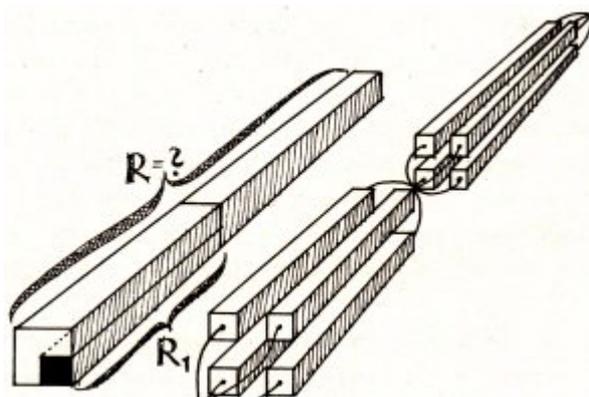
- Die Schüler sollen wissen, daß der Widerstand eines Drahtes proportional mit seiner Länge zunimmt.
- Die Schüler sollen erkennen, daß der Zusammenhang zwischen Widerstand und Länge eines Drahtes gleichbedeutend ist mit der Regel für den Gesamtwiderstand einer Reihenschaltung.
- Die Schüler sollen wissen, daß der Widerstand in einem Draht sich umgekehrt proportional zu seinem Querschnitt verhält.
- Die Schüler sollen erkennen, daß der Zusammenhang zwischen Widerstand und Querschnitt gleichbedeutend ist mit der Regel für den Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung.
- Die Schüler sollen angeben können, daß der spezifische Widerstand eines Materials keine für eine Stoffart festliegende Größe ist, sondern beispielsweise von Verunreinigungen im Material und vor allem auch von der Temperatur abhängt.
- Die Schüler sollen mit Hilfe der Angaben des spezifischen Widerstandes und der geometrischen Abmessung eines Drahtes dessen Widerstand berechnen können.

### **1.1.2. Der spezifische Widerstand**

Die Bestimmung der Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge und dem Querschnitt eines Leiters sowie von seiner Materialeigenschaft kann einmal direkt über das Experiment gewählt werden.

Es ist aber auch möglich und evtl. fruchtbarer, aufgrund des bisherigen Unterrichtes und der bisher gelernten Gesetzmäßigkeiten den Schülern die Aufgabe zu stellen, den Widerstand eines

Drahtes im Vergleich zu einem Einheitsdraht vorauszusagen.



Dabei muß allerdings ein Draht mit vorgegebenen Abmessungen in Gedanken zunächst in einzelne Drahtstücke mit Einheitsmaßen ( $l = 1 \text{ m}$ ;  $q = 1 \text{ mm}^2$ ) zerlegt und dann entsprechend als Reihen- und Parallelschaltung zusammengefügt werden.

Aufgrund ihrer Kenntnisse über den Gesamtwiderstand von Reihen- und Parallelschaltungen sollte es möglich sein, diese Frage im voraus zu beantworten, um sie danach experimentell zu überprüfen. Bei der Anwendung der Gesetze für die Parallelschaltung wird allerdings stillschweigend vorausgesetzt, daß der Strom den ganzen Querschnitt erfüllt und nicht nur längs der Oberfläche fließt. Im letzteren Fall ergäbe eine Vervielfachung des Querschnittes nur eine Verdopplung der Oberfläche und somit auch nur eine Verdopplung des Stromes. Gerade die Herausstellung dieser Fragestellung kann dazu geeignet sein, die folgenden Messungen für die Schüler interessanter zu machen. Bei der Einführung des spezifischen Widerstandes als Materialgröße können Lernschwierigkeiten auftreten, und zwar in zweierlei Hinsicht. Zum einen handelt es sich hier um eine Größe, die zahlenmäßig gleich ist mit dem Widerstand eines Drahtes mit bestimmten Abmessungen ( $l = 1 \text{ m}$ ;  $q = 1 \text{ mm}^2$ ). Für Schüler ist es jedoch bekannterweise nicht leicht, den spezifischen Widerstand als eine eigene Größe mit eigener Dimension von dem Widerstand des Einheitsdrahtes zu differenzieren. Diese Differenzierung tritt generell bei der Einführung von Quotientengrößen auf, wie z. B. beim Druck oder bei der spezifischen Wärme, und kann wohl nur allmählich und durch wiederholtes Ansprechen gelernt werden.

Eine zweite Schwierigkeit liegt in der unterschiedlichen Kennzeichnung von  $\rho$ . Die beiden in der Literatur üblichen Bezeichnungen  $\Omega \text{ m}$  und  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  führen leicht zur Verwirrung. Hier tritt in verschärfter Form das Problem der Kennzeichnung von Einheiten auf, das an dieser Stelle sicherlich nicht auf Anhieb zu lösen ist.

Als Überprüfung des Lernerfolges kann die umgekehrte Fragestellung gewählt werden:

Wie kann bei bekanntem Widerstand und bekannten geometrischen Abmessungen auf den Widerstand eines Drahtes der Länge  $l = 1 \text{ m}$  und dem Querschnitt  $A = 1 \text{ mm}^2$  geschlossen werden? Zur Verdeutlichung der Abhängigkeit des Widerstandes von den geometrischen Abmessungen eines Drahtes kann ebenfalls das Wassermodell zur Hilfe genommen werden, wobei sich aber hier nur halbquantitative Übereinstimmungen ergeben.

Allerdings ist der experimentelle Nachweis hierfür relativ aufwendig und zeitraubend. Von daher wird man sich i. a. auf einen beschreibenden Vergleich beschränken, wobei die fehlende quantitative Übereinstimmung eine wichtige Möglichkeit darstellt, eine der Grenzen des Wassermodells aufzuzeigen.

Zum Abschluß dieses Unterrichtsabschnittes sollte dann noch experimentell nachgewiesen werden, daß verschiedene Materialien verschiedene spezifische Widerstände besitzen. Soweit vorhanden, sollte auch der unterschiedliche Widerstand des gleichen Stoffes mit unterschiedlicher Verunreinigungskonzentration (Stahl, Eisen) aufgezeigt werden. Dies scheint besonders wich-

tig im Sinne der später zu behandelnden Halbleitertechnologie.

### **1.1.3. Temperaturabhängigkeit des Widerstandes**

Als zusätzliche Erweiterung, die in vielen Lehrplänen gefordert und in allen Lehrbüchern durchgeführt wird, bietet sich die Behandlung der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes an.

Diese Tatsache kann zunächst rein phänomenologisch behandelt und von den Schülern als experimentell zu überprüfende Tatsache gelernt werden. Dabei scheint es der Vollständigkeit halber als wichtig, aufzuzeigen, daß das Temperaturverhalten bei verschiedenen Stoffen sehr unterschiedlich sein kann.

Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich jedoch, wenn ein Bezug zum OHMschen Gesetz hergestellt wird und die indirekte Wirkung des Stromes auf den Widerstand (über die Temperaturerhöhung) ins Blickfeld gerät. Für diesen Fall ist die bisherige einfache Gleichgewichtsbetrachtung nicht mehr ohne weiteres möglich. Wenn durch die Änderung des Stromes der Widerstand verändert wird, so ist zunächst nicht klar, ob, und wenn ja, welches Gleichgewicht sich einstellt. Dies wird besonders deutlich, wenn das Verhalten eines Materials mit einem negativen Temperaturkoeffizienten betrachtet wird.

Wenn eine kleine Stromvergrößerung eine höhere Temperatur und dadurch einen kleineren Widerstand bedingt, der seinerseits zu einer weiteren Vergrößerung der Stromstärke führt, so sollte sich ein Aufschaukelungskreis ohne eine stabile Gleichgewichtslage ergeben.

Mit dieser Frage sind Probleme der Rückkopplung bzw. Regelung von Systemen angesprochen, die an dieser Stelle wohl nicht ausführlich behandelt werden können.

## **1.2. Gefahren des elektrischen Stromes**

### **1.2.1. Allgemeine Hinweise und Lernziele**

Die Begründung für eine ausführliche Behandlung des elektrischen Stromkreises in der allgemeinbildenden Schule leitet sich z. T. aus dem Lernziel ab, den Schülern zu einer rationalen Einstellung gegenüber der sie umgebenden technischen Umwelt zu verhelfen. Im Falle des elektrischen Stromes bedeutet dies u. a., daß sie sowohl über die Gefahren aufgeklärt werden, wie auch über die Möglichkeiten des gefahrlosen Umganges mit der Elektrizität.

Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, zum Abschluß dieser Unterrichtseinheit und unter Zusammenfassung aller bisher erarbeiteten Kenntnisse dieses Thema gesondert zu behandeln.

Als Lernziele lassen sich formulieren:

- Die Schüler sollen in einer Realsituation, in der eine Gefährdung des Menschen auftreten kann, den durch den menschlichen Körper geschlossenen Stromkreis erkennen.
- Die Schüler sollen die Größe des den menschlichen Körper durchfließenden Stromes abschätzen können.
- Die Schüler sollen das Ausmaß der Gefährdung des Menschen in einer konkreten Situation abschätzen können.
- Die Schüler sollen Sicherheits- und Schutzmaßnahmen für eine konkrete Situation begründen können.
- Die Schüler sollen wissen, daß ein Pol der Steckdose und damit eine Zuleitung des im Haushalt verwendeten Stromkreises mit der Erde verbunden ist.
- Die Schüler sollen wissen, daß der menschliche Körper den elektrischen Strom leitet und die Bedingungen für besonders hohe Leitfähigkeit nennen können.

### **1.2.2. Unfälle durch Einwirkung des elektrischen Stromes**

Als Einstieg für diesen Unterrichtsabschnitt und als Begründung für das Teilthema können zunächst Informationen über Art und Zahl der durch den elektrischen Strom verursachten Unfälle in der Bundesrepublik Deutschland vermittelt werden.

Von den ca. 40 000 tödlichen Unfällen werden etwa 300 pro Jahr durch die Einwirkung elektri-

scher Energie verursacht.

Diese verteilen sich wie folgt auf die einzelnen Bereiche:

HAUSHALT	GEWERBE u. INDUSTRIE	LANDWIRTSCHAFT	HOCHBAU	SONSTIGE
~35%	~35%	~15%	~15%	5%

### Tödliche Unfälle in den einzelnen Bereichen

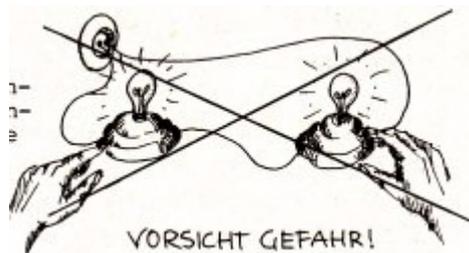
Eine Analyse der Unfallursachen beim Umgang mit der Elektrizität zeigt, daß die meisten Unfälle durch menschliche Unzulänglichkeiten verursacht werden. Im Vergleich dazu treten Unfälle durch fehlerhafte Geräte und Anlagen zahlenmäßig zurück.

### 1.2.3. Gefährdung durch Einschluß in den Stromkreis

In einem ersten Schritt muß geklärt werden, daß der elektrische Strom grundsätzlich nur dann gefährlich ist, wenn der Mensch Teil eines Stromkreises wird. Dies kann auf verschiedene Art und Weise geschehen.

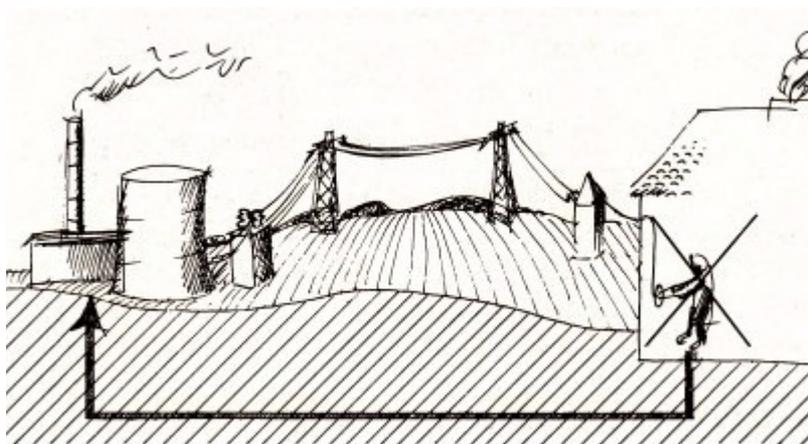


Der Mensch berührt die offenen Enden eines Stromkreises und wird so mit den beiden Polen der Spannungsquelle verbunden.



Der Mensch überbrückt eine Lampe und wird somit als Parallelzweig mit den beiden Polen der Spannungsquelle verbunden.

Eine solche Berührung kann normalerweise nur beim Einsatz von unsachgemäßem Material geschehen (Bananenstecker für 220 V), da üblicherweise das Berühren offener Stellen durch die Formgebung der Kuppelungen und Passungen verhindert wird.



Der Mensch wird durch Berühren eines nichtisolierten spannungsführenden Leiters Teil eines Stromkreises, wobei die Erdverbindung zum Kraftwerk die Rückleitung darstellt. Diese letztere Tatsache ist den Schülern i. a. nicht bekannt und sollte entsprechend deutlich herausgestellt werden.

#### 1.2.4. Wirkungen des Stromes auf den menschlichen Körper

Bildet der Mensch einen Teil eines Stromkreises, so hängt das Ausmaß der Wirkung entscheidend von der Stromstärke ab.

Über das Ausmaß dieser Wirkung lassen sich folgende grobe Richtwerte angeben.

##### **Bereich I: $I < 25 \text{ mA}$**

Die willkürlichen Bewegungen der Muskulatur werden behindert, es treten leichte Verkrampfungen auf. Die Wirkungen hören jedoch nach Beendigung des Stromdurchganges auf, es treten keine Nachwirkungen auf.

##### **Bereich II: $25 \text{ mA} < I < 80 \text{ mA}$**

Starke Verkrampfung der Muskulatur mit heftigen Schmerzen, Herzunregelmäßigkeiten; bei Einwirkungsdauer von einigen Sekunden tritt Bewußtlosigkeit und Tod auf; Lähmung kann u. U. durch Wiederbelebungsversuche behoben werden.

##### **Bereich III: $80 \text{ mA} < I < \text{ca. } 3 \text{ A}$**

Herzkammerflimmern mit Todesfolge, falls der Stromdurchgang länger als einige Zehntelsekunden dauert.

##### **Bereich IV: $I > \text{ca. } 3 \text{ A}$**

Kein Herzkammerflimmern mehr, jedoch Tod durch schwere Verbrennungen (Lichtbogenwirkung).

#### 1.2.5. Berechnung der Stromstärke

Wird der menschliche Körper direkt mit einer Spannungsquelle verbunden, und vernachlässigt man irgendwelche Übergangswiderstände, so kann man als durchschnittlichen Wert für den Widerstand eines menschlichen Körpers  $R = 1,5 \text{ k}\Omega$  annehmen. Daraus folgt für  $I = 25 \text{ mA}$  (Bereich I)  $U = I \cdot R = 40 \text{ V}$

Ab 40 Volt treten also Gefährdungen im Sinne des Bereiches II auf.

Für  $U = 220 \text{ V}$  ergibt sich:  $I = E = 0,2 \text{ A}$  d. h. man befindet sich im tödlichen Bereich III.

Bei einer Berührung der Netzspannung im Haushalt liegt nun glücklicherweise der Fall vor, daß die Verbindung mit der Erde über verschiedene Isoliermaterialien verläuft. Dadurch tritt zu dem Körperwiderstand  $R_1$  ein häufig sehr viel größer Übergangswiderstand  $R_2$  hinzu, der in Reihe liegt und der einen größeren Strom verhindert. Allerdings ist dieser Übergangswiderstand beim Berühren einer Wasserleitung nicht gegeben. Von daher kann auf die besonderen Gefahren der Benutzung elektrischer Geräte im Badezimmer hingewiesen werden.

Im Schülerheft sind einige Aufgaben zu diesem Thema angegeben.

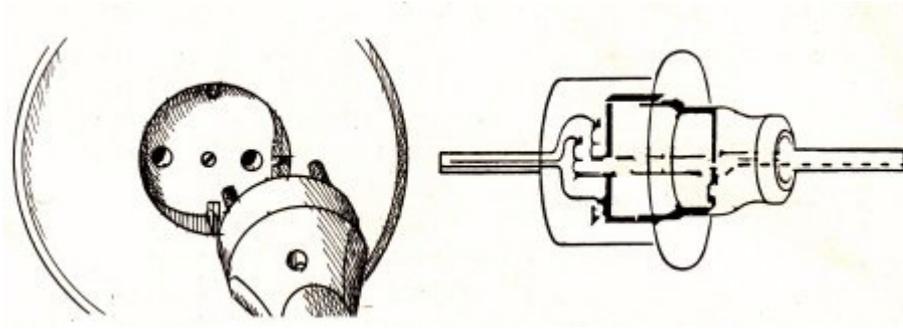
#### 1.2.6. Schutzmaßnahmen

Eine wirkungsvolle Schutzmaßnahme besteht darin, das Berühren von spannungsführenden Leitern weitgehend auszuschließen. Dies wird durch die sogenannte Schutzisolierung erreicht, bei der das elektrische Gerät samt Anschlußleitungen total mit Isolierstoff umhüllt ist, also keine leitenden Außenteile besitzt. Diese Schutzmaßnahme wird z. B. bei vielen isolierumhüllten Haushaltsgeräten angewandt.

Wenn die Berührung spannungsführender Teile nicht ausgeschlossen werden kann, sollen die auftretenden Stromstärken den Grenzwert des Bereiches I von 25 mA nicht wesentlich überschreiten. Dies wird erreicht durch eine Spannung, die unter dem Wert  $U = R_m \cdot I = 40 \text{ V}$

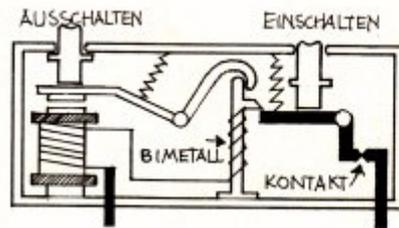
bleibt. Sie wird als Schutzkleinspannung bezeichnet und dient bei vielen Geräten als Schutzmaßnahme. So beträgt z. B. bei Kinderspielzeugen die maximal zulässige Spannung nur 24 V. An den Stellen, an denen das Öffnen des Stromkreises unumgänglich ist (Steckkontakte) wird durch die Ausformung der Steckteile eine Berührung spannungsführender Teile praktisch ver-

hindert.



### 1.2.7. Funktion der Sicherung

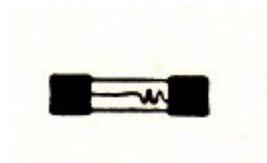
Im Zusammenhang mit den Gefahren des elektrischen Stromes kann auch noch einmal auf die Funktion von Sicherungen hingewiesen werden, die sowohl zum Schutz von Leitungen als auch von Geräten dienen und somit indirekt auch zum Schutz des Menschen beitragen. Je nach Interessenlage der Schüler können die verschiedenen Ausführungen der Sicherungen besprochen werden.



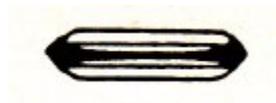
Automatische Sicherung



Schmelzsicherung



Feinsicherung



Autosicherung