

Mit elektrischem Druck die Spannung verstehen lernen

Die Spannung als schwierige physikalische Größe

Jan-Philipp Burde, Thomas Wilhelm

Viele Schülerinnen und Schüler besitzen auch nach der Sekundarstufe I keine angemessene Vorstellung davon, was die elektrische Spannung ist und wie man sich diese vorstellen kann. Stattdessen wird die elektrische Spannung häufig als Eigenschaft bzw. als Bestandteil des elektrischen Stromes gesehen, der die Vorstellung der meisten Schüler zu Stromkreisen dominiert [1]. Dies ist nicht nur bedauerlich, weil die Spannung eine der physikalischen Größen darstellt, welche im Alltag der Schüler eine große Bedeutung haben, sondern auch, weil ohne die Spannung ein elementares Verständnis der Elektrizitätslehre unmöglich ist.

Die Spannung ist keine einfache physikalische Größe, da sie die Differenz zweier Potenzialwerte darstellt und sich immer auf zwei Punkte in einem Stromkreis bezieht. Sie ist damit komplexer als das elektrische Potenzial, das einem Punkt bzw. einem Leiterabschnitt zugeordnet werden kann. Paradoxerweise wird von den Schülern insbesondere im Anfangsunterricht aber häufig erwartet, ein Verständnis für die Spannung zu entwickeln, ohne die dahinterstehende Größe selbst, nämlich das Potenzial, zu kennen, geschweige denn zu verstehen [2, S. 477]. Passend zu dieser grundlegenden Überlegung hat sich in der physikdidaktischen Forschung gezeigt, dass Unterrichtsansätze, die auf dem Potenzialgedanken aufbauen und mit einer visuellen Modelldarstellung des elektrischen Potenzials arbeiten (wie beispielsweise das Stäbchenmodell oder der geschlossene Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule) zu vergleichsweise großen Lernerfolgen bei den Schülern führen [3, S. 35; 4, S. 70].

Das hier vorgeschlagene Elektronengasmodell stellt einen solchen Potenzialansatz dar, versucht durch den Vergleich des elektrischen Potenzials mit dem Luftdruck bzw. „elektrischen Druck“ jedoch neue Wege zu gehen. Dabei wird besonderer Wert auf ein qualitativ fundiertes Verständnis der für die Elektrizitätslehre grundlegenden Basiskonzepte „Spannung“, „Stromstärke“ und „Widerstand“ gelegt.

Jan-Philipp Burde studierte Lehramt für Physik und Englisch an der Universität Kassel, machte sein Referendariat in England und promoviert nun am Institut für Didaktik der Physik der Universität Frankfurt über das Elektronengasmodell (burde@physik.uni-frankfurt.de).

Prof. Dr. Thomas Wilhelm war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik, promovierte an der Universität Würzburg über ein verändertes Mechanikkonzept, habilitierte dort über die Videoanalyse von Bewegungen, hatte eine Professur an der Universität Augsburg und ist nun Professor und Geschäftsführender Direktor am Institut für Didaktik der Physik der Universität Frankfurt.

Die Grundidee des Elektronengasmodells

Zunächst besteht die Idee darin, auf der intuitiven Luftdruckvorstellung der Schüler im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ aufzubauen und zu klären, dass Luftströmungen immer eine Folge von Luftdruckunterschieden sind. Nachdem an Hand einiger Beispiele geklärt wurde, dass Strömungen immer eine Folge von Druckunterschieden sind, wird dieses Verständnis auf elektrische Stromkreise übertragen, um zu erklären, wie es überhaupt zum elektrischen Strom kommt. Die Grundidee des Elektronengasmodells ist dabei, dass sich in Metallen Elektronen in Teilchenform befinden und sich dort frei bewegen können. Da die Elektronen negativ geladen sind, werden sie durch Abstoßung so weit wie möglich auseinandergetrieben, weshalb sie den ihnen zur Verfügung stehenden Raum im gesamten Leiter gleichmäßig ausfüllen. Im Leiter kommt es aufgrund der gegenseitigen Coulomb-Abstoßung der Elektronen zu einem von der Elektronendichte abhängigen elektrischen Druck (für eine fachliche Auseinandersetzung sei auf [5] verwiesen).

Ursächlich für die Ungleichverteilung der Elektronen im Leiter sind dabei die Pole der Batterie. Da am Minuspol ein Elektronenüberschuss herrscht, kommt es in dem mit ihm verbundenen Leiterabschnitt zu einer erhöhten Elektronendichte und damit zu einem erhöhten „elektrischen Druck“. Der positiv geladene Pluspol hingegen „saugt“ ähnlich einem Staubsauger die negativen Elektronen aus dem mit ihm verbundenen Leiterabschnitt, weshalb es hier zu einer verringerten Elektronendichte und damit einem geringeren elektrischen Druck kommt. Durch Gleichsetzen des elektrischen Drucks mit dem elektrischen Potenzial kann so die Spannung als elektrischer Druckunterschied interpretiert werden, der die Elektronenströmung in Stromkreisen bewirkt.

Das Unterrichtskonzept

Das hier vorgeschlagene Unterrichtskonzept nach dem Elektronengasmodell legt besonderen Wert auf die Entwicklung eines fundierten qualitativen Verständnisses der Grundgrößen „Spannung“, „Stromstärke“ und „Widerstand“. Dabei wird einer bildhaft-anschauungsorientierten Vorstellung des Potenzials als elektrischem Druck und der Spannung als

elektrischem Druckunterschied eine besondere Bedeutung zugeschrieben. Um den Schülern eine angemessene Vorstellung des elektrischen Drucks zu ermöglichen, ist eine kurze Auseinandersetzung mit der Elektrostatik und dem Luftdruck zu Beginn der Unterrichtsreihe vorgesehen.

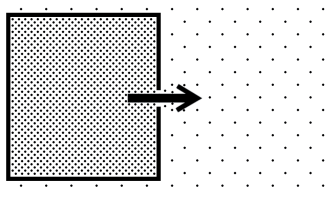
1. Elektrostatik und Atomvorstellung

Sofern die Schüler aus ihrem bisherigen Unterricht keine Kenntnisse zur Elektrostatik mitbringen, wird zunächst erarbeitet, dass geladene Körper elektrische Kräfte aufeinander ausüben und diese mit zunehmendem Abstand kleiner werden. Vor dem Hintergrund der für das Elektronengasmodell wichtigen Vorstellung der sich gegenseitig abstoßenden Elektronen wird insbesondere die elektrostatische Abstoßung demonstriert, z.B. mit negativ geladenen und an Fäden aufgehängten leitend beschichteten Tischtennisbällen. Mit Blick auf die für das Unterrichtskonzept zentrale Idee des Elektronengases wird im Anschluss am Beispiel von Kupfer der atomare Aufbau elektrisch geladener Metalle besprochen. Ziel ist hier, die Vorstellung zu vermitteln, dass beispielsweise Körper deshalb elektrisch negativ geladen sind, weil sie mehr negativ geladene, frei bewegliche Elektronen besitzen als positiv geladene, ortsfeste Atomrümpfe.

2. Luftströmungen durch Druckunterschiede

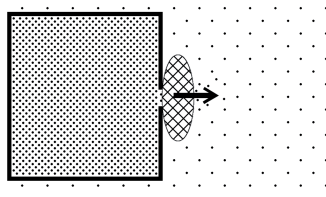
Als nächstes wird an das aus dem Alltag gewonnene Vorwissen der Schüler zu Luftdruckphänomenen angeknüpft, indem am Beispiel eines aufgeblasenen Luftballons oder Fahrradreifens besprochen wird, dass die Luft von Überdruck zu Normaldruck strömt. Ergebnis sollte die Erkenntnis sein, dass eine Luftströmung immer eine Folge von Druckunterschieden ist und dass zwischen den Größen Druck und Druckunterschied klar differenziert werden muss. Mit Hilfe einer Einwegspritze aus Kunststoff, deren Öffnung auf der einen Seite mit dem Daumen zugehalten werden kann und deren Kolben auf der anderen Seite verschoben werden kann, kann jeder Schüler nicht nur Primärerfahrungen zum Druck und Druckunterschied sammeln, sondern ebenso erfahren, dass die Luft auch von Normaldruck zu Unterdruck strömt. Abgeschlossen wird die Einheit mit einer Hinführung zur Widerstandsvorstellung, indem die Schülerinnen ein Stück Stoff (z.B. ein Schal, Kragen oder Ärmel) nehmen und Luft durch dieses blasen. Je dicker das Stück Stoff dabei gefaltet wird, desto stärker ist die Hemmung bzw. Behinderung der Luftströmung (siehe Abb. 1). Die Hemmung bzw. Behinderung der Luftströmung durch den Stoff wird dann als Widerstand bezeichnet.

Situation A



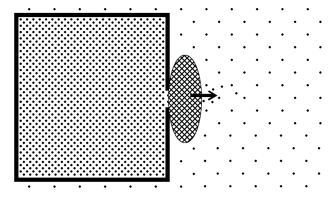
Kein (Stoff-)Widerstand,
Große Elektronenströmung

Situation B



Kleiner (Stoff-)Widerstand,
Mittlere Elektronenströmung

Situation C



Großer (Stoff-)Widerstand,
Kleine Elektronenströmung

Abb. 1: Intensität der Luftströmung in Abhängigkeit vom Druckunterschied und dem (Stoff-)Widerstand

3. Batterie, elektrisches Potenzial und Spannung

In dieser Einheit wird die Vorstellung vom Luftdruck auf den in Leitern herrschenden elektrischen Druck übertragen. Hierzu wird angenommen, dass am Minuspol einer Batterie ein Elektronenüberschuss herrscht und am Pluspol ein Elektronenmangel. In Folge herrscht also am Minuspol ein elektrischer Überdruck, während am Pluspol ein elektrischer Unterdruck herrscht (siehe Abb. 2). Wird nun ein bisher neutrales Leiterstück mit dem Minuspol verbunden, so strömen

Elektronen aufgrund des elektrischen Druckunterschieds in den Leiter, bis in diesem der gleiche elektrische Überdruck herrscht wie zuvor am Minuspol der Batterie. Analog führt das Verbinden eines bisher neutralen Leiterstücks mit dem Pluspol dazu, dass Elektronen vom bisherigen elektrischen Normaldruck im Leiter zum elektrischen Unterdruck am Pluspol strömen, bis sich im Leiter der gleiche elektrische Unterdruck einstellt wie am Pluspol. Da keine absoluten Werte für das Potential eingeführt werden, wird auf eine

explizite Diskussion der Erdung einzelner Leiterabschnitte im Rahmen der Elementarisierung des Unterrichtskonzepts bewusst verzichtet.

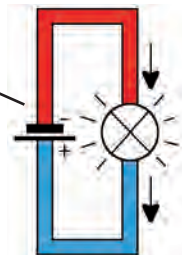
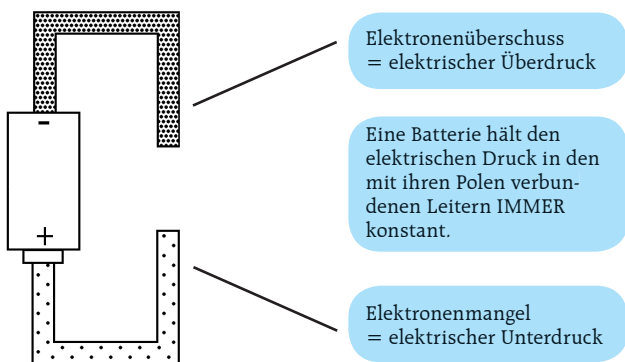
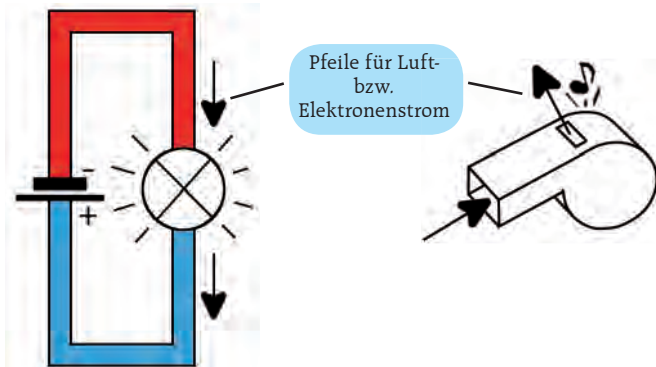


Abb. 2: Punktedarstellung (links) und Farbdarstellung (rechts) des elektrischen Drucks.

Während zum unmittelbaren Einstieg in die Diskussion von elektrischem Über- und Unterdruck in elektrischen Schaltungen auf die von den Luftdruckbeispielen bekannte Punktedichtedarstellung zurückgegriffen wird, erscheint ein baldiger Wechsel auf die Farbdarstellung des elektrischen Drucks sinnvoll (siehe Abb. 2). Der Grund hierfür ist, dass Schüler den elektrischen Druck mit Farbstiften nicht nur viel leichter einzeichnen können, sondern so auch eine potenziell verwirrende Diskussion der Strömungsgeschwindigkeiten der Elektronen vor und nach einem Widerstand unnötig wird. An verschiedenen offenen Schaltungen wird anschließend der Unterschied zwischen elektrischem Druck und elektrischem Druckunterschied eingeübt sowie typische Spannungswerte im Alltag (Batterie, Steckdose, Hochspannungsleitung) besprochen. Dabei wird insbesondere immer wieder betont, dass Druck und Druckunterschied nicht das Gleiche ist. Auch ist es wichtig, den Schülern bewusst zu machen, dass der elektrische Druck in den Leitern ausschließlich von den Batteriepolen bestimmt wird und nicht von der Länge oder Abmessung der Leiter abhängt.

4. Der elektrische Strom und Widerstand

Nachdem die Vorstellung vom elektrischen Druck am Beispiel offener Schaltungen ohne Stromfluss etabliert wurde, werden die elektrischen Druckunterschiede analog zur vorherigen Betrachtung von Luftdruckunterschieden nun als Ursache für Elektronenströmungen in Stromkreisen eingeführt. Hierzu wird an einem einfachen Stromkreis bestehend aus Batterie und Lämpchen besprochen, dass in Folge des am Lämpchen anliegenden elektrischen Druckunterschieds Elektronen durch das Lämpchen strömen und dieses zum Leuchten bringen (siehe Abb. 3).



Alle Elektronen, die auf der einen Seite in das Lämpchen hineinströmen, strömen auf der anderen Seite auch wieder heraus.

Alle Luftteilchen, die in die Trillerpfeife geblasen werden, strömen auch wieder durch das obere Loch heraus.

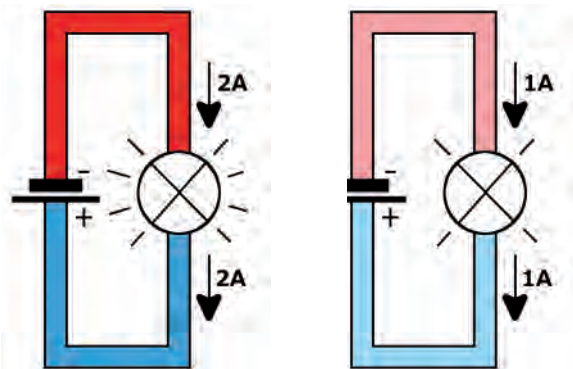
Abb. 3: Gegenüberstellung von Elektronen- und Luftströmung um der Stromverbrauchsvorstellung entgegenzuwirken.

Für jedes Elektron, das vom elektrischen Überdruck durch das Lämpchen zum elektrischen Unterdruck strömt, pumpt die Batterie ein Elektron vom Unterdruck in den Bereich des Überdrucks, weshalb der am Lämpchen anliegende Druckunterschied konstant bleibt und nicht abnimmt. Durch den Vergleich des Lämpchens mit einer Trillerpfeife, die pfeift

und dabei keine Luftteilchen verbraucht, wird der Stromverbrauchsvorstellung begegnet. Die Stromstärke selber wird als „Intensität der Elektronenströmung“ eingeführt, da so einerseits Assoziationen mit dem alltäglichen Kraftbegriff vermieden werden und andererseits das Formelzeichen I (für Intensität) leichter verständlich wird.

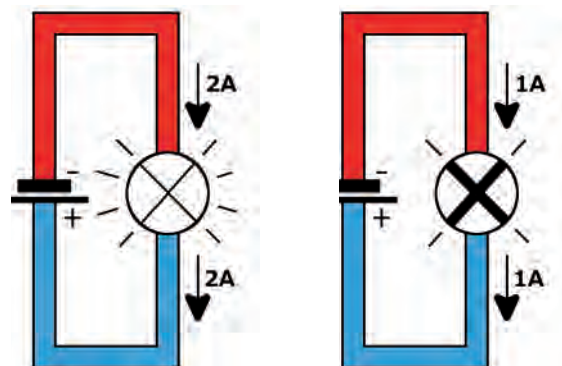
Im Anschluss wird der Einfluss der Spannung auf die Elektronenströmung sowie vom Widerstand auf die Elektronenströmung halb-quantitativ über „je ... desto ...“ Beziehungen erarbeitet. Dabei ist das Ziel, bei den Schülern ein qualitatives Verständnis der Wirkzusammenhänge im Stromkreis zu erreichen, wonach die Spannung die Elektronenströmung kausal bewirkt und der Widerstand diese lediglich beeinflusst. Die Höhe des Potentials wird in der Farbdarstellung mit Hilfe unterschiedlicher Farbintensitäten visualisiert. Dabei gilt, dass der Druck bzw. das Potential umso höher ist, je intensiver das Rot ist, bzw. umso niedriger ist, desto intensiver das Blau ist (siehe Abb. 4).

Zusammenhang: Spannung – Elektronenströmung



Umso größer die Spannung (Druckunterschied), desto größer die Elektronenströmung

Zusammenhang: Widerstand – Elektronenströmung



Umso größer der Widerstand, desto schwerer ist es für die Elektronen, durch das Lämpchen zu strömen und desto kleiner ist daher die Elektronenströmung.

Abb. 4: Die Abhängigkeit der Intensität der Elektronenströmung von Spannung und Widerstand.

5. Die Parallelschaltung

Parallelschaltungen eignen sich im Elektronengasmodell hervorragend zur weiteren Festigung und gegenseitigen Abgrenzung der grundlegenden Größen „elektrischer Druck“, „elektrischer Druckunterschied“ und „Intensität der Elektronenströmung“. Eingeführt wird die Parallelschaltung damit, dass ein zweites identisches Lämpchen parallel zum ersten geschaltet wird. Nun muss herausgearbeitet werden, dass eine (ideale) Batterie die elektrischen Drücke in den mit ihren Polen direkt verbunden Leitern konstant hält – unabhängig von deren Länge oder der Anzahl der parallelgeschalteten Lämpchen. Der Druckunterschied am ersten Lämpchen hat sich also nicht verändert, weshalb sich auch die Intensität der Elektronenströmung durch das erste Lämpchen nicht geändert haben kann. Da am zweiten Lämpchen der gleiche Druckunterschied wie am ersten anliegt, muss die Elektronenströmung durch das zweite Lämpchen genauso groß sein wie durch das erste. Die nun zusätzlich vorhandene Elektronenströmung durch das zweite Lämpchen muss von der Batterie bereitgestellt werden, weshalb sich die Intensität der Elektronenströmung durch die direkt mit den Polen der Batterie verbundenen Leiterstücke verdoppelt.

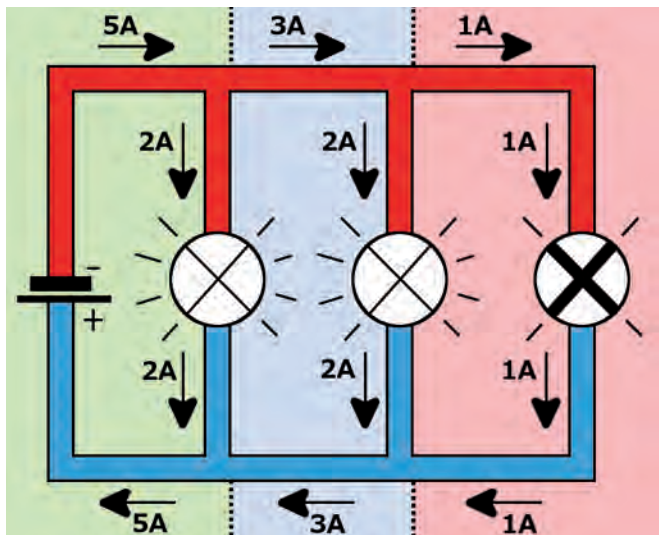


Abb. 5: Parallelschaltung von drei Lämpchen inklusive möglicher Elektronenströmungen. Das rechte Lämpchen hat einen doppelt so großen Widerstand wie die anderen beiden.

Wird nun ein weiteres Lämpchen mit doppelt so großem Widerstand zu den beiden bisherigen Lämpchen parallel geschaltet (siehe Abb. 5), so liegt auch an diesem der gleiche elektrische Druckunterschied an. Da nun aber der Widerstand doppelt so groß ist, ist die Intensität der Elektronenströmung durch dieses Lämpchen nur halb so groß. Trotzdem muss die Batterie auch diese Elektronenströmung bereitstellen und entsprechend mehr Elektronen pro Zeit vom Plus- zum Minuspol „pumpen“.

An verschiedenen Parallelschaltungen wird im Anschluss erarbeitet, dass zwei Lämpchen immer dann parallel geschaltet sind, wenn an ihren Seiten jeweils die gleichen elektrischen Drücke bzw. Farben anliegen. Im Anschluss kann geschaut werden, wo im Alltag überall Parallelschaltungen vorkommen und weshalb es beispielsweise gefährlich ist, viele Mehrfachsteckdosen hintereinanderschalten.

6. Der Kondensator

Die Analyse der Lade- und Entladevorgänge von Kondensatoren ermöglicht es, die Schüler an das Denken in Übergangszuständen heranzuführen, was eine Vorbereitung zum Verständnis der Vorgänge bei Reihenschaltungen darstellt. Die Grundidee hinter den Übergangszuständen ist dabei, dass sich die elektrischen Drücke und Elektronenströmungen zwar äußerst schnell im Stromkreis einstellen, der stationäre Gleichgewichtszustand (hier Endzustand genannt) jedoch nur schrittweise über sogenannte Zwischenzustände erreicht wird.

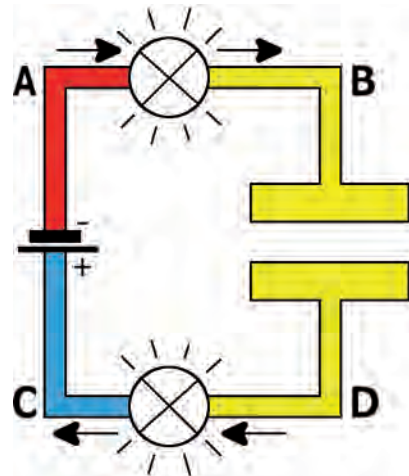


Abb. 6: Übergangszustand beim Laden eines Kondensators.

Die schrittweise Diskussion von Lade- und Entladevorgängen bei Kondensatoren mit Hilfe von Übergangszuständen eignet sich ferner in besonderer Weise dazu, den Schülern bewusst zu machen, dass Elektronenströmungen ausschließlich eine Folge von elektrischen Druckunterschieden sind. Wird wie in Abb. 6 jeweils ein passendes Lämpchen vor jede der beiden Kondensatorplatten geschaltet (z.B. ein Kondensator mit einer Kapazität von $20.000 \mu\text{F}$ in Kombination mit zwei Lämpchen von 6 V und 0,05 A), lässt sich gut beobachten, dass diese zunächst hell und dann immer schwächer leuchten, weil mit jedem Elektron, das durch die Lämpchen strömt, der an den Lämpchen anliegende elektrische Druckunterschied und damit der Antrieb der Elektronenströmung schwächer wird. Dass dabei auch das untere Lämpchen zeitgleich mit dem oberen anfängt zu leuchten, kann von den Schülern damit erklärt werden, dass sich auch in der unteren Kondensatorplatte bereits Elektronen befinden (Bereich D, gelb), die dann in Folge des elektrischen Unterdrucks im mit dem Pluspol verbundenen Leiterstück (Bereich C, blau) anfangen, durch das Lämpchen zu strömen. So kann insbesondere der weitverbreiteten Stromaussendevorstellung begegnet werden, wonach die Batterie die einzige „Stromquelle“ in einem Stromkreis sei und aus dieser „Strom“ vom Minuspol ausgehend in den Stromkreis strömt – wie Öl, das aus einem Fass ausläuft.

7. Die Reihenschaltung

Reihenschaltungen werden im Elektronengasmodell mit Hilfe der bereits erwähnten Übergangszustände analysiert. Wie in Abb. 7 an einer Reihenschaltung von vier identischen Lämpchen dargestellt, herrscht im Anfangszustand,

d.h. so lange der Stromkreis noch nicht mit der Batterie verbunden ist, in allen Leiterteilen ein elektrischer Normaldruck (gelb). Sobald die Pole dann mit den Leitern verbunden werden, stellen sich zunächst ein elektrischer Überdruck (intensives Rot) im Leiterstück bis zum oberen Lämpchen und ein elektrischer Unterdruck (intensives Blau) im Leiterstück bis zum unteren Lämpchen ein. In den anderen Leiterstücken verändert sich der elektrische Druck zunächst noch nicht, da im Übergangszustand noch keine Elektronen durch die Lämpchen geflossen sind. Im nächsten Schritt strömen Elektronen in Folge der am oberen und unteren Lämpchen anliegenden Druckunterschiede durch die Lämpchen. Dies führt dazu, dass der Druck im oberen rechten Leiterabschnitt in Folge der einströmenden Elektronen ansteigt (blasses Rot), während er im unteren rechten Leiterabschnitt aufgrund der in Richtung Pluspol wegströmenden Elektronen absinkt (blasses Blau). Im mittleren rechten Leiterabschnitt bleibt der elektrische Normaldruck (gelb) bestehen, da in Folge der gleich großen elektrischen Druckunterschiede am mittleren oberen und mittleren unteren Lämpchen gleich viele Elektronen von oben einströmen wie Elektronen nach unten wegströmen. Im Modell nimmt mit zunehmender Anzahl an Widerständen im Stromkreis die Intensität der Elektronenströmung ab, da sich der von der Batterie erzeugte elektrische Druckunterschied auf mehr Widerstände aufteilen muss.

Anfangszustand Übergangszustand Endzustand

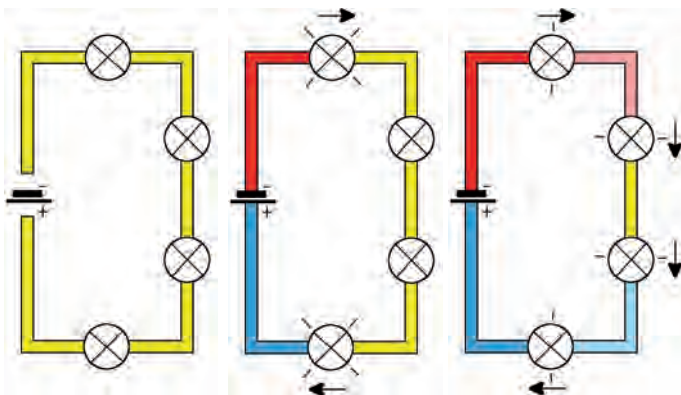


Abb. 7: Schrittweise Analyse einer Reihenschaltung von vier identischen Lämpchen mit Hilfe von Übergangszuständen.

Werden zwei Lämpchen mit unterschiedlichem Widerstand in Reihe geschaltet, so lassen sich auch hier die elektrischen Drücke und Elektronenströmungen mit Hilfe von Übergangszuständen herleiten (siehe Abb. 8). Im Anfangszustand herrscht überall im Stromkreis ein elektrischer Normaldruck (gelb), da noch keine Batterie angeschlossen ist. Nach Anschluss der Batterie herrscht im oberen Leiterabschnitt ein elektrischer Überdruck (rot) und im unteren Leiterabschnitt ein elektrischer Unterdruck (blau). Im mittleren Leiterabschnitt herrscht noch elektrischer Normaldruck (gelb), weil gedacht noch keine Elektronen durch die Lämpchen geströmt sind. Da nun an beiden Lämpchen die gleichen elektrischen Druckunterschiede anliegen, der Widerstand am oberen Lämpchen aber doppelt so groß ist wie am unteren, strömen weniger Elektronen von oben in den mittleren Leiterabschnitt rein als Elektronen durch das untere Lämpchen

mit dem geringeren Widerstand wegströmen. In Folge sinkt der elektrische Druck im mittleren Leiterabschnitt so lange (gelb → blasses Blau), bis der elektrische Druckunterschied über dem oberen Lämpchen so groß ist, dass die Intensität der Elektronenströmung durch beide Lämpchen exakt gleich groß ist. Da sich jetzt sowohl die elektrischen Drücke als auch die Elektronenströmungen nicht mehr ändern, ist der Endzustand erreicht.

Anfangszustand Übergangszustand Endzustand

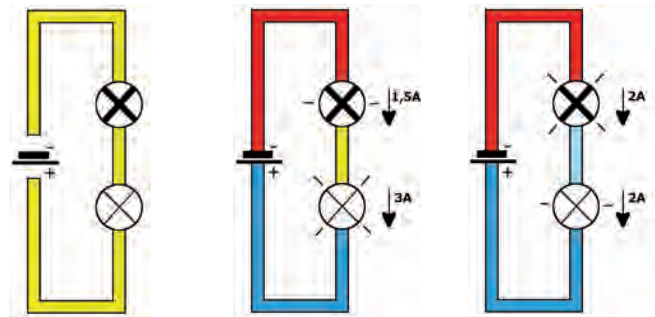


Abb. 8: Schrittweise Analyse einer Reihenschaltung von zwei Lämpchen mit unterschiedlichem Widerstand.

8. Messung und Berechnung von Stromstärke, Spannung und Widerstand

Nachdem bei den Schülern ein qualitatives Verständnis der grundlegenden Größen Spannung, Stromstärke und Widerstand aufgebaut wurde, werden diese dann mit Hilfe der Widerstandsdefinition $R := U/I$ auch quantitativ in direkten Zusammenhang miteinander gebracht. Zur Bestimmung der Spannung und der Stromstärke werden daher zunächst die beiden Messgeräte Volt- und Amperemeter eingeführt und zur klaren optischen Abgrenzung vom restlichen Stromkreis dreidimensional dargestellt. Das Voltmeter ist dabei mit zwei „Fühler-Kabeln“ ausgestattet, mit deren Hilfe es die elektrischen Drücke in den Leiterabschnitten vor und nach einem Widerstand misst und so den jeweiligen elektrischen Druckunterschied bestimmt (siehe Abb. 9). Ab diesem Punkt wird ferner auf die bisher verwendete Darstellung breiter Leiterschläuche zu Gunsten der üblichen Leiterbahnen verzichtet.

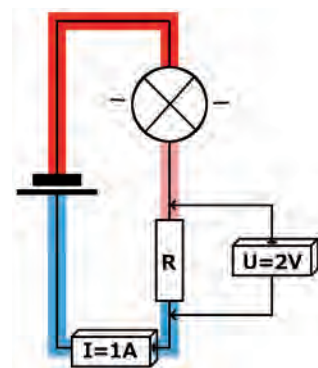


Abb. 9: Darstellung der Anschlussbedingungen von Volt- und Amperemeter in einem einfachen Stromkreis.

Entsprechend der Widerstandsdefinition $R := U/I$ wird der so berechnete Widerstandswert dann im Modell interpretiert als der elektrische Druckunterschied, der nötig ist, um eine Elektronenströmung von 1 A durch den Widerstand zu treiben. Bei den meisten Widerständen steigt dieser Widerstandswert mit zunehmender Stromstärke an. Im Unterrichtskonzept wird das Ohm'sche Gesetz, d.h. die Konstanz des Widerstandwertes deshalb als Spezial- und nicht als Regelfall behandelt. Zum Schluss wird der den Schülern bereits bekannte Wirkzusammenhang, wonach die Spannung die Elektronenströmung kausal bewirkt und der Widerstand diese lediglich beeinflusst, wieder aufgegriffen, um ihn für Ohm'sche Widerstände in die quantifizierte Form $I = U/R$ zu bringen (siehe Abb. 10). An dieser Stelle wird den Schülern auch mitgeteilt, dass die Intensität der Elektronenströmung üblicherweise „Stromstärke“ genannt wird.

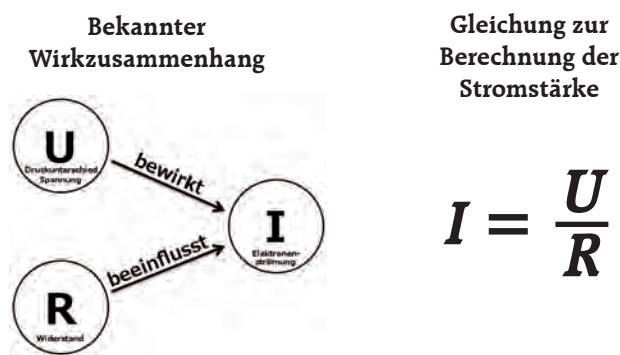


Abb. 10: Übergang vom qualitativen zum quantitativen Zusammenhang der Größen I, U und R.

Bisherige Erfahrungen

In Einzelunterricht (sogenannte Teaching Experiments) mit neun Gymnasialschülern (sechste Schulstufe) wurde bereits untersucht, inwiefern Schülerinnen und Schüler das Elektronengasmodell akzeptieren und verstehen. Die Teaching Experiments hatten dabei einen Umfang von ca. drei Schulstunden und wurden ausschließlich mit Schülern durchgeführt, die bisher noch keinen Elektrizitätslehreunterricht bekommen hatten. Dabei zeigte sich, dass das Unterrichtskonzept von den Schülern angenommen wird und sie mit den Grundkonzepten hinter dem Elektronengasmodell wie der Elektrostatik sowie der Atom- und Luftdruckvorstellung keine nennenswerten Schwierigkeiten zu haben scheinen. Die anfängliche Einführung in die Elektrostatik bereitet den Schülern also ebenso wenige Probleme wie die Vorstellung von freibeweglichen, sich gegenseitig abstoßenden Elektronen und ortsfesten Atomrümpfen in Metallen. Auch hat sich gezeigt, dass die Schüler aufgrund ihrer Alltagserfahrungen beispielsweise mit Fahrradreifen bereits ein intuitives Luftdruckverständnis im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ mitbringen, was für das hier vorgeschlagene Unterrichtskonzept völlig ausreichend ist. Die genutzten Schülerexperimente mit (Luft-)Spritzen zur Festigung und Vertiefung dieser Vorstellung wurden von den Schülern als hilfreich empfunden.

Besonders positiv hervorzuheben ist, dass allen Schülern der anschließende Transfer dieses für das Unterrichtskonzept zentralen Luftdruckverständnisses auf den nach dem Modell in elektrischen Stromkreisen herrschenden elektrischen Druck ohne Weiteres gelang. So entwickelten die meisten Schüler bereits nach kurzer Zeit ein grundlegendes, aber anschauliches Spannungskonzept und besaßen mit dem Verständnis der Spannung als Druckunterschied eine plausible Erklärung dafür, wie es überhaupt zu einem elektrischen Strom in Stromkreisen kommen kann. Im Gegensatz zu traditionellen Ansätzen wurde die Spannung also als Differenzgröße und Ursache des elektrischen Stroms wahrgenommen und nicht als Eigenschaft desselben.

Zusammenfassend lässt sich damit sagen, dass sich die grundlegenden Ansätze, Konzepte und Ideen hinter dem Elektronengasmodell als vielversprechend erwiesen haben und den Schülern in verhältnismäßig kurzer Zeit ein fundiertes Verständnis des Spannungsbegriffs vermittelt werden konnte. Vor dem Hintergrund, dass viele Schüler bei traditionellen Ansätzen auch nach der Sek I kein angemessenes Spannungskonzept besitzen, sondern vielmehr glauben, die Spannung sei die Stärke bzw. Kraft des Stromes [6], ist dies ein sehr positives und ermutigendes Ergebnis.

Als nächstes werden wir das Konzept in der Unterrichtspraxis evaluieren und suchen hierzu noch Kolleginnen und Kollegen, die mitmachen. Ein vollständiges Paket von Unterrichtsmaterialien inkl. Arbeitsblättern, Merkblättern, Overheadfolien und einem dazu passenden Lehrerleitfaden sowie weiteren Anregungen werden selbstverständlich von uns kostenfrei bereitgestellt. Wer sich vorstellen kann, die Elektrizitätslehre einmal mit Hilfe des Elektronengasmodells zu unterrichten, ist herzlich eingeladen, mit uns in Kontakt zu treten. Für die Zukunft ist ferner geplant, das Unterrichtskonzept inkl. aller Unterrichtsmaterialien auch online zur Verfügung zu stellen.

Literatur

- [1] Rhöneck, C. v. (1986): Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand, *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik*, 34 (1986) 13, S. 108–112.
- [2] Herrmann, F.; Schmälzle, P. (1984): Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. In: *MNU* 37 (1984) 8, S. 476–482.
- [3] Schwedes, H.; Dudeck, W.-G.; Seibel, C. (1995): Elektrizitätslehre mit Wassermodellen, *Praxis der Naturwissenschaften – Physik*, 44 (1995) 2, S. 28–36.
- [4] Gleixner, C. (1998): Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial, Dissertation LMU München.
- [5] Burde, J.-P.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2014): Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I. In: *PhyDid-B – Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Frankfurt 2014*, www.phydid.de
- [6] Rhöneck, C. v.; Völker, B. (1984): Vorstellungen vom Stromkreis und ihr Einfluss auf den Lernprozess. *Der Physikunterricht* 18 (1984) 2, S. 4–16.