

# Die Elektrizitätslehre mit dem Elektronengasmodell

J.-Ph. Burde u. Th. Wilhelm

## 1. Die Spannung als schwierige physikalische Größe

Die elektrische Spannung stellt nicht nur eine wichtige physikalische Größe in unserem Alltag dar, sondern ist auch Voraussetzung für ein grundlegendes Verständnis elektrischer Stromkreise. Unglücklicherweise ist die elektrische Spannung aber eine vergleichsweise komplexe physikalische Größe, da sie die Differenz zweier Potenzialwerte darstellt und sich immer auf zwei Punkte in einem Stromkreis bezieht. Aufgrund ihres Differenzcharakters ist sie somit schwieriger zu verstehen als das elektrische Potenzial, das einem Punkt bzw. einem Leiterabschnitt zugeordnet werden kann. Paradoxerweise wird von den Schülern aber insbesondere im Anfangsunterricht häufig erwartet, ein Verständnis für die Spannung zu entwickeln, ohne die dahinterstehende Größe selbst, nämlich das Potenzial, zu kennen, geschweige denn zu verstehen [1, S.477]. Es ist daher wenig verwunderlich, dass viele Schülerinnen und Schüler trotz intensiver unterrichtlicher Bemühungen auch nach der Sekundarstufe I kein eigenständiges Spannungskonzept besitzen. Stattdessen ist ihre Vorstellung von elektrischen Stromkreisen maßgeblich vom elektrischen Strombegriff geprägt, während die Spannung von ihnen lediglich als Eigenschaft oder Bestandteil des Stroms wahrgenommen wird [2]. Aus didaktischer Sicht ist dieser Zustand insbesondere deshalb problematisch, weil die elektrische Spannung nicht eine Eigenschaft sondern die Ursache des elektrischen Stroms ist.

## 2. Das Elektronengasmodell als Potenzialansatz

In der bisherigen physikdidaktischen Forschung hat sich gezeigt, dass insbesondere solche Unterrichtskonzepte vergleichsweise lernförderlich sind, die auf dem elektrischen Potenzial aufbauen und dieses mit Hilfe eines Modells anschaulich visualisieren (wie beispielsweise der geschlossene Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule [3, S.35] oder das Stäbchenmodell [4, S.70; 5, S.182ff]). Das hier vorgeschlagene Unterrichtskonzept auf Grundlage des Elektronengasmodells versucht an die Erfolge der bisherigen Potenzialansätze anzuknüpfen, indem das elektrische Potenzial mit dem Luftdruck bzw. dem „elektrischen Druck“ verglichen und noch vor der Stromstärke eingeführt wird. Aufgrund der Bedeutung einer bildhaft-anschauungsorientierten Vorstellung des Potenzials für den Lernerfolg wird der in den Leitern herrschende „elektrische Druck“ mit Hilfe eines intuitiven und an alltägliche Konventionen angelehnten Farbschemas direkt im Schaltplan dargestellt. Ziel ist es dann, in Analogie zu

Luftdruckunterschieden und Luftströmungen die elektrische Spannung als „elektrischen Druckunterschied“ und Antrieb des elektrischen Stroms einzuführen. Dabei wird im gesamten Unterrichtskonzept besonderer Wert darauf gelegt, dass die Schüler vor jeglicher Quantisierung zunächst ein qualitativ fundiertes Verständnis der für die Elektrizitätslehre grundlegenden Konzepte „Spannung“, „Stromstärke“ und „Widerstand“ entwickeln.

### 3. Das Unterrichtskonzept

#### 3.1 Elektrostatik und Atomvorstellung

Sofern die Schüler aus ihrem bisherigen Unterricht keine Kenntnisse zur Elektrostatik mitbringen, werden zunächst die elektrostatische Kraftwirkung und ihre Abstandsabhängigkeit an einfachen Beispielen thematisiert. Mit Blick auf die für das Unterrichtskonzept zentrale Idee des Elektronengases sowie eine spätere mikroskopische Modellvorstellung des elektrischen Widerstands wird anschließend der atomare Aufbau von Metallen am Beispiel von Kupfer mit Hilfe von Atomrümpfen und Elektronen besprochen (siehe Abb. 1).

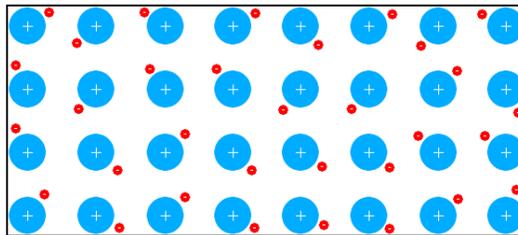


Abb. 1: Modellvorstellung des atomaren Aufbaus von Kupfer mit Atomrümpfen (blau) und Elektronen (rot)

#### 3.2 Luftströmungen durch Druckunterschiede

Als nächstes wird an die intuitive Luftdruckvorstellung der Schüler im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ angeknüpft, um an bekannten Alltagsobjekten wie aufgeblasenen Fahrradreifen oder Fußbällen zu klären, dass Luft immer von Bereichen höheren Drucks zu Bereichen niedrigeren Drucks strömt. Ergebnis sollte die Erkenntnis sein, dass Luftströmungen immer eine Folge von Druckunterschieden sind und dass zwischen den beiden Größen Druck und Druckunterschied konzeptionell unterschieden werden muss. 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. 2). Die Hemmung bzw. Behinderung der Luftströmung durch den Stoff wird dann als Widerstand bezeichnet.

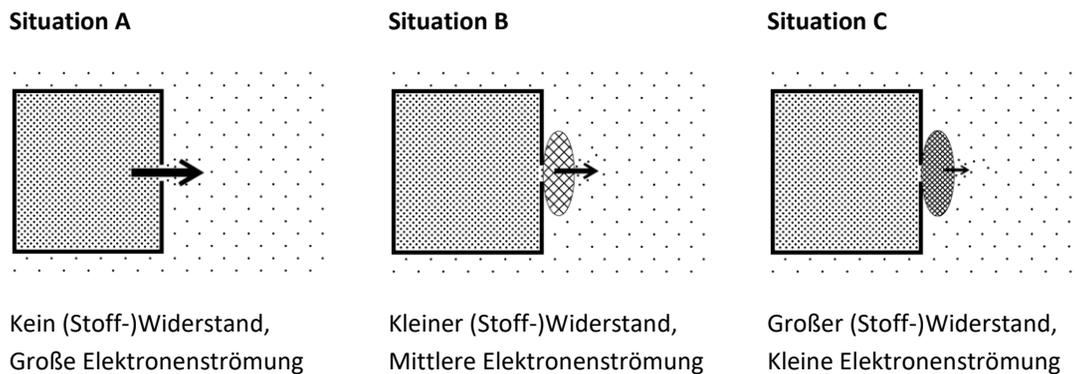


Abb. 2: Intensität der Luftströmung in Abhängigkeit vom Druckunterschied und dem (Stoff-)Widerstand

### 3.3 Batterie, elektrisches Potenzial und Spannung

In dieser Einheit wird die Vorstellung vom Luftdruck auf den in Leitern herrschenden elektrischen Druck übertragen. Die Grundidee 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 in der Modellvorstellung den ihnen zur Verfügung stehenden Raum im gesamten Leiter gleichmäßig ausfüllen<sup>1</sup>. 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 [6] verwiesen). Hierzu wird angenommen, dass am Minuspol einer Batterie ein Elektronenüberschuss besteht und am Pluspol ein Elektronenmangel. Am Minuspol und dem mit ihm verbundenen Leiterstück herrscht also ein hoher elektrischer Überdruck, während am Pluspol und dem mit ihm verbundenen Leiterstück ein elektrischer Unterdruck herrscht. Während zum unmittelbaren Einstieg in die Diskussion von elektrischem Über- und Unterdruck auf die von den Luftdruckbeispielen bekannte Punktedichtedarstellung zurückgegriffen wird, ist es aus didaktischen Gründen geschickter, von nun an den elektrischen Druck in Stromkreisen mit der Farbdarstellung zu visualisieren (siehe Abb. 3). So lässt sich der elektrische Druck mit Hilfe von Farbstiften nicht nur deutlich unkomplizierter einzeichnen, sondern es entfällt auch eine für Schüler potenziell schwierige aber in der Punktedichtedarstellung später nötige Unterscheidung zwischen Stromstärke und Strömungsgeschwindigkeit der Elektronen vor und nach Widerständen. Auch Schüler haben in

<sup>1</sup> Im Rahmen der didaktischen Elementarisierung wird im Unterrichtskonzept nicht thematisiert, dass zusätzlich aufgebrachte Elektronen in Realität – anders als bei einem Gas – nur an der Oberfläche des Leiters sitzen.

einer Vorstudie in Form einer Akzeptanzbefragung zu unterschiedlichen Visualisierungsformen des elektrischen Potentials bei der eigenständigen Bearbeitung von Aufgaben die Farbdarstellung gegenüber der Punktedichtedarstellung präferiert [7].

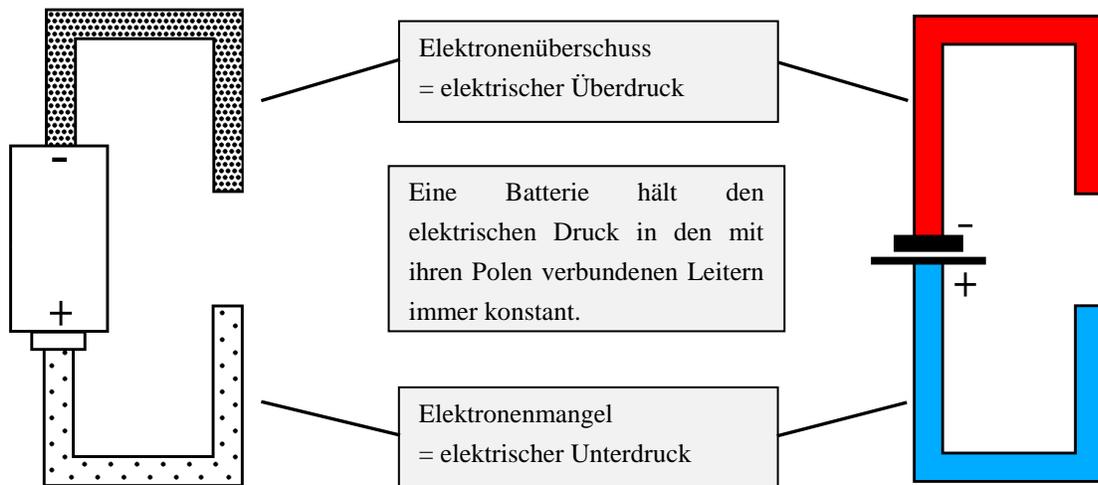


Abb. 3: Punktedichtedarstellung (links) und Farbdarstellung (rechts) des elektrischen Drucks

An verschiedenen offenen Schaltungen wird dann der Unterschied zwischen elektrischem Druck und elektrischem Druckunterschied eingeübt sowie typische Spannungswerte im Alltag (Batterie, Steckdose, Hochspannungsleitung) besprochen. Dabei wird auch immer wieder betont, dass der elektrische Druck in den Leitern ausschließlich von der Spannungsquelle bestimmt wird und nicht von der Länge oder Abmessung der Leiter abhängt. Da keine absoluten Werte für das elektrische Potenzial eingeführt werden, wird auf eine explizite Diskussion der Erdung eines Leiterabschnittes im Rahmen der Elementarisierung des Unterrichtskonzepts bewusst verzichtet.

### 3.4 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. 4). Die Höhe des elektrischen Drucks wird dabei mit Hilfe unterschiedlicher Farbintensitäten visualisiert. Hierbei gilt, dass der Druck bzw. das Potenzial umso höher ist, je intensiver das Rot ist, bzw. umso niedriger ist, desto intensiver das Blau ist.

## Zusammenhang: Spannung – Elektronenströmung



Abb. 4: Umso größer die Spannung (elektrischer Druckunterschied), desto größer die Stromstärke (Elektronenströmung)

Für jedes Elektron, das vom elektrischen Überdruck durch das Lämpchen zum elektrischen Unterdruck strömt, pumpt die Batterie ein anderes Elektronen vom Unterdruck in den Bereich des Überdrucks, weshalb der am Lämpchen anliegende Druckunterschied konstant bleibt und nicht abnimmt. Die Stromstärke selber wird als „Intensität der Elektronenströmung“ bezeichnet, da so einerseits eine Assoziation mit dem alltäglichen Kraftbegriff vermieden 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 (Abb. 5).

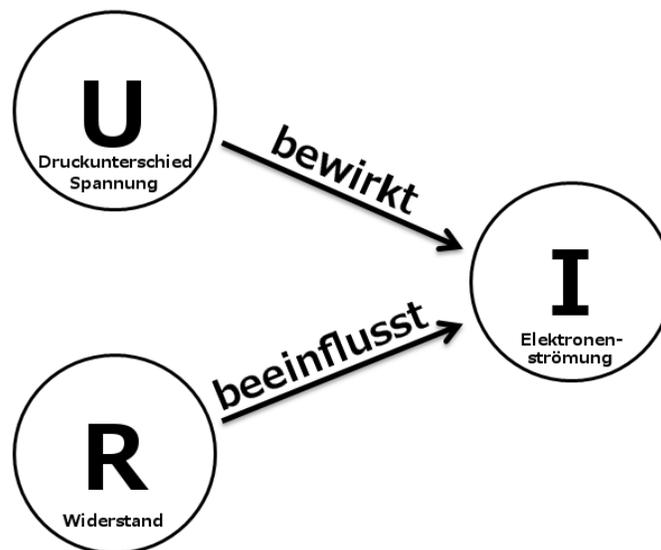


Abb. 5: Wirkungszusammenhang zwischen  $U$ ,  $R$  und  $I$

Während der elektrische Widerstand anfänglich rein qualitativ in Anlehnung an das in der Luftdruckeinheit erworbene Widerstandskonzept eingeführt wurde („So wie ein Stück Stoff eine Luftströmung behindert, behindert ein elektrischer Widerstand die Elektronenströmung“), wird diese intuitive Analogie anschließend um ein mikroskopisches Widerstandsmodell auf Basis der zu Beginn eingeführten Atomvorstellung ergänzt. Ziel hierbei ist es, den Schülern mit Hilfe einer ersten mikroskopischen Vorstellung u.a. von idealen Leitern, Isolatoren und Widerständen ein tieferes Verständnis elektrischer Leitungsvorgänge zu ermöglichen (siehe Abb. 6).

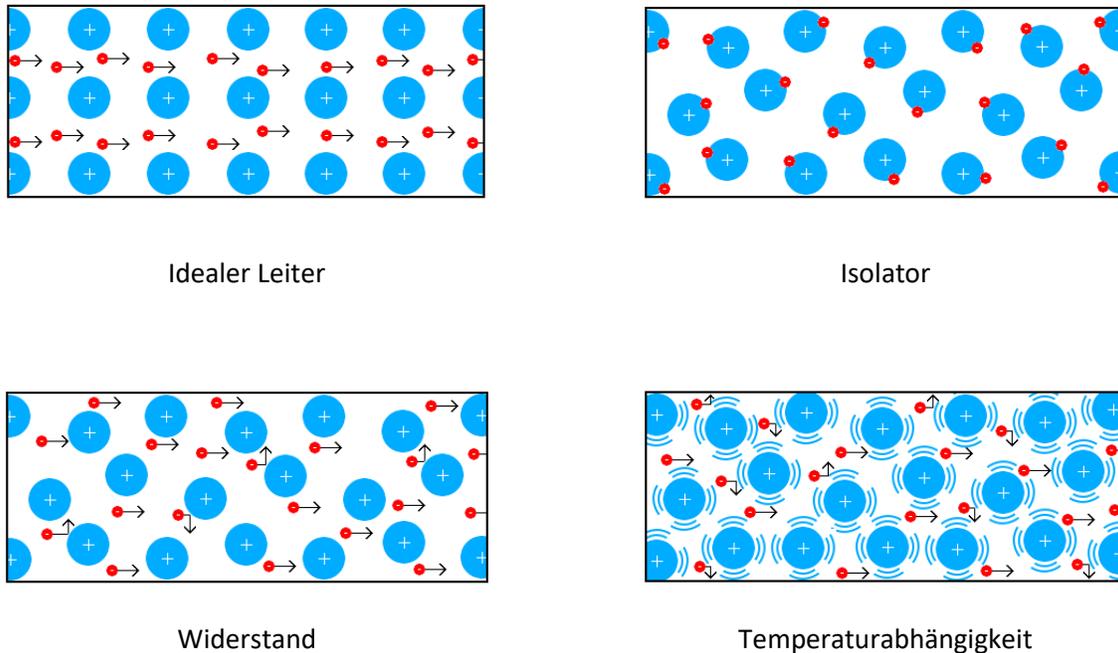


Abb. 6: Ein einfaches mikroskopisches Modell des elektrischen Widerstands

### 3.5 Die Parallelschaltung

Zum Einstieg in das Thema „Parallelschaltungen“ wird zunächst ein einfacherer Stromkreis bestehend aus einer Batterie und einem Lämpchen betrachtet (Schaltung 1). Anschließend wird ein zweites identisches Lämpchen parallel zum ersten geschaltet (Schaltung 2). Nun muss herausgearbeitet werden, dass eine (ideale) Batterie die elektrischen Drücke in den mit ihren Polen direkt verbundenen Leitern konstant hält – unabhängig von deren Länge oder der Anzahl der parallelgeschalteten Lämpchen. Wie in Abbildung 7 zu sehen, lässt sich nun mit Hilfe der Farbdarstellung leicht zeigen, dass an beiden Lämpchen der gleiche elektrische Druckunterschied wie zuvor anliegt. Da es sich um identische Lämpchen handelt, muss die Intensität der Elektronenströmung daher durch jede der beiden Lämpchen in Schaltung 2 genauso groß sein wie durch das Lämpchen in Schaltung 1. Insgesamt hat sich die Intensität der Elektronenströmung also im Vergleich zu Schaltung 1 in den direkt mit den Polen der Batterie verbundenen

Leiterstücken verdoppelt, weshalb die Batterie entsprechend mehr Elektronen pro Zeit vom Plus- zum Minuspol „pumpen“ muss und deshalb schneller „erschöpft“ ist.

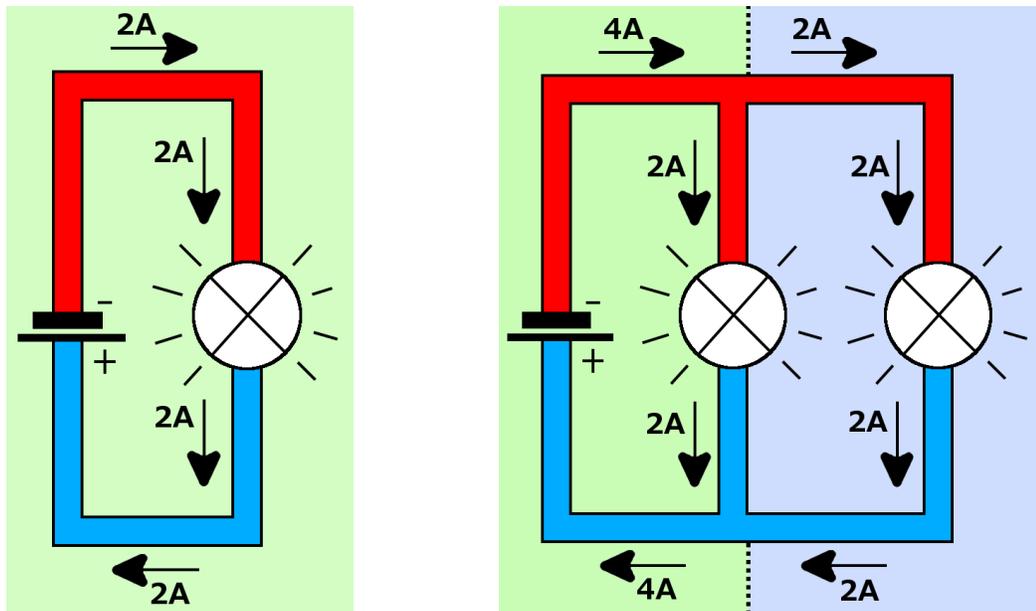


Abb. 7: Einfacher Stromkreis mit einem Lämpchen (Schaltung 1, links). Parallelschaltung eines weiteren identischen Lämpchens (Schaltung 2, rechts).

Parallelschaltungen eignen sich im Elektronengasmodell hervorragend zur weiteren Festigung und konzeptionellen Ausdifferenzierung der grundlegenden Größen „elektrischer Druck“, „elektrischer Druckunterschied“ und „Intensität der Elektronenströmung“. Insbesondere lernen Schüler Stromkreise immer nur ausgehend von elektrischen Druckunterschieden und nicht aus Sicht der Elektronenströmung zu analysieren. Darüber hinaus wird das Konzept der Batterie als Quelle konstanter Spannung statt konstanten Stroms weiter vertieft und eine einfache Regel zur Identifikation von Parallelschaltungen formuliert: „Zwei Lämpchen sind dann parallel geschaltet, wenn an ihren Seiten jeweils die gleichen Farben (= elektrischen Drücke) anliegen“.

### 3.6 Der Kondensator

Um ihnen das Verständnis von Reihenschaltungen zu erleichtern, werden die Schüler am Beispiel von Lade- und Entladevorgängen von Kondensatoren zunächst an eine dynamische Modellvorstellung herangeführt. Dabei sollen sie mit Hilfe von Anfangs-, Übergangs- und Endzuständen schrittweise nachzuvollziehen können, wie sich die elektrischen Drücke in den einzelnen Leiterabschnitten einstellen, bis der Endzustand erreicht ist. Im Anfangszustand herrscht dabei in allen Leiterabschnitten ein elektrischer Normaldruck (gelb), da noch keine Batterie angeschlossen wurde und sich daher in Abschnitten A, B, C und D der Abbildung 8 noch

normal-viele Elektronen befinden. Unmittelbar nach Anschluss der Batterie stellt sich in Abschnitt A ein elektrischer Überdruck und in Abschnitt C ein elektrischer Unterdruck ein, während in Abschnitten B und D weiterhin ein elektrischer Normaldruck herrscht, da zu diesem Zeitpunkt gedacht noch keine Elektronen durch die Lämpchen geströmt sind (Übergangszustand). In Folge des nun an den Lämpchen anliegenden elektrischen Druckunterschieds kommt es solange zu einer Elektronenströmung durch die Lämpchen, bis sich die elektrischen Drücke jeweils angeglichen haben und nicht mehr verändern (Endzustand).

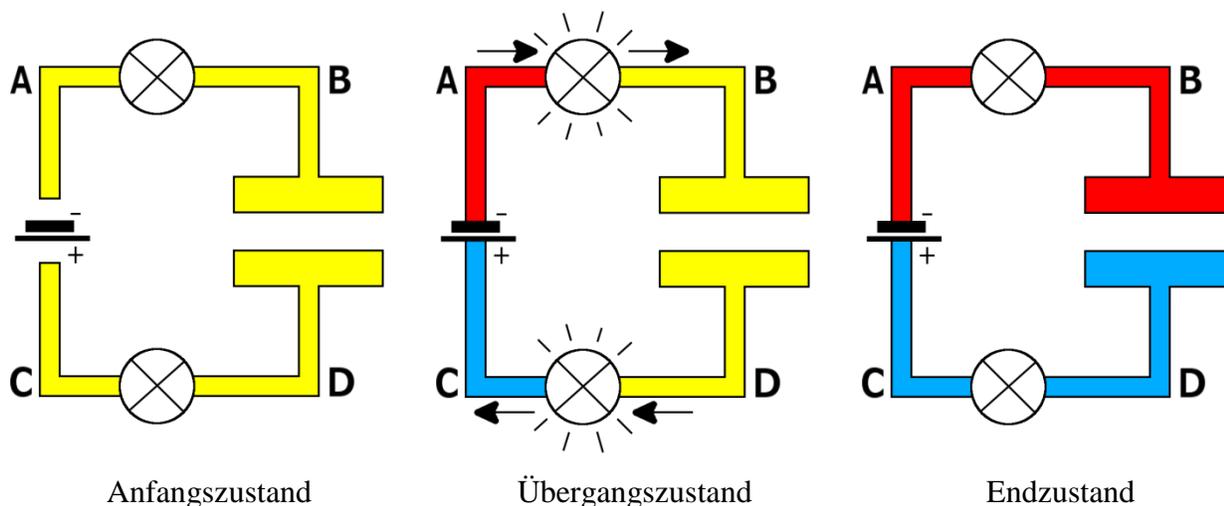


Abb. 8: Hinführung zur dynamischen Modellvorstellung am Beispiel des Ladevorgangs eines Kondensators

Experimentell können die unterschiedlichen Zustände an einem Kondensator mit einer Kapazität von  $20.000 \mu\text{F}$  in Kombination mit zwei Lämpchen von  $6 \text{ V}$  und  $0,05 \text{ A}$  und einer  $12 \text{ V}$ -Gleichspannungsquelle demonstriert und diskutiert werden. Hierbei kann mit Hilfe von elektrischen Druckunterschieden analysiert werden, warum die Lämpchen während des Übergangszustands zunächst hell und dann immer schwächer leuchten. Anschließend sollte zur Entkräftung der Stromaussendevorstellung ebenfalls auf die Frage eingegangen werden, warum beim Ladevorgang auch das untere Lämpchen anfängt zu leuchten.

### 3.7 Die Reihenschaltung

Während man sich in der einfachen Elektrizitätslehre in der Regel lediglich für den stationären Gleichgewichtszustand interessiert, also den Zustand, in dem sich Stromstärke und Spannung zeitlich nicht mehr ändern, werden Reihenschaltungen im Elektronengasmodell mit Hilfe der bei den Kondensatoren bereits eingeführten dynamischen Modellvorstellung analysiert. Die Grundidee ist dabei, dass sich die elektrischen Drücke und Elektronenströmungen in

Reihenschaltungen zwar äußerst schnell einstellen, der stationäre Gleichgewichtszustand (hier Endzustand genannt) jedoch nur schrittweise über sogenannte Übergangszustände erreicht wird.

Bei einer Reihenschaltung von zwei unterschiedlichen Lämpchen (siehe Abb. 9) herrscht im Anfangszustand, d.h. so lange der Stromkreis noch nicht mit der Batterie verbunden ist, in allen Abschnitten des Stromkreises ein elektrischer Normaldruck (gelb). Sobald der Stromkreis dann mit den Polen der Batterie verbunden wird, stellen sich zunächst ein elektrischer Überdruck (rot) im Leiterstück bis zum oberen Lämpchen und ein elektrischer Unterdruck (blau) im Leiterstück bis zum unteren Lämpchen ein. Im mittleren Leiterabschnitt zwischen den beiden Lämpchen herrscht noch ein elektrischer Normaldruck (gelb), weil gedacht noch keine Elektronen durch die Lämpchen geströmt sind (Übergangszustand). 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 rausströmen. In Folge sinkt der elektrische Druck im mittleren Leiterabschnitt so lange (gelb  $\rightarrow$  hellblau), bis der elektrische Druckunterschied über dem oberen Lämpchen so groß ist, dass die Intensität der Elektronenströmung durch beide Lämpchen exakt gleich groß ist. Der Grund für die gleich großen Elektronenströmungen liegt also darin, dass der elektrische Druck im mittleren Leiterabschnitt unter den Normaldruck absinkt und somit am oberen Lämpchen mit dem größeren Widerstand ein größerer Druckunterschied als am unteren Lämpchen mit dem kleineren Widerstand anliegt. Da sich jetzt sowohl die elektrischen Drücke als auch die Elektronenströmungen nicht mehr ändern, ist der Endzustand erreicht.

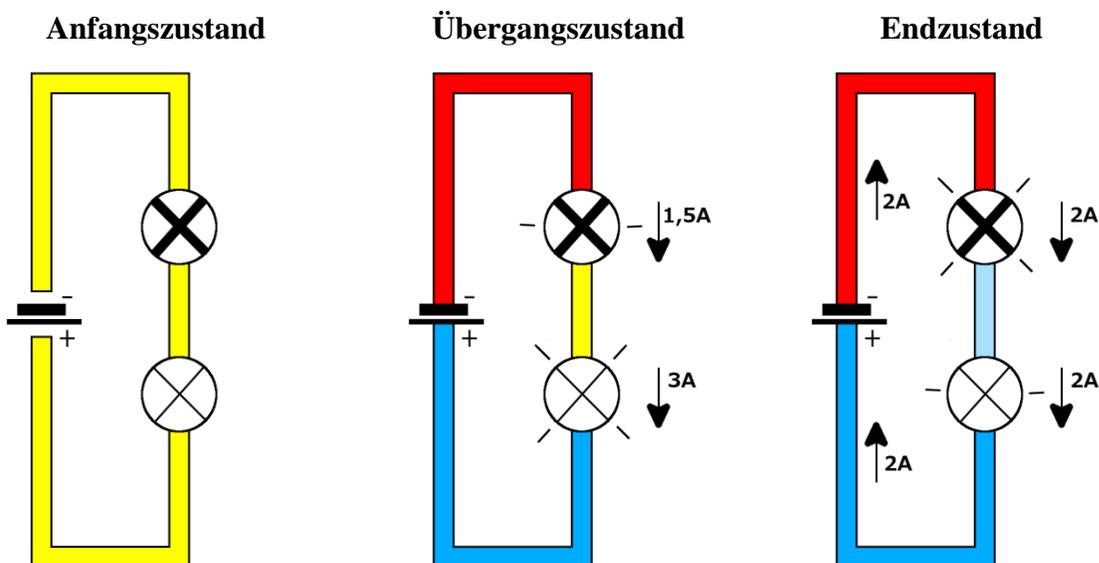


Abb. 9: Schrittweise Analyse einer Reihenschaltung mit Hilfe von Anfangs-, Übergangs- und Endzustand. Das dickere Kreuz steht hier für ein Lämpchen mit doppelt so großem Widerstand.

Mit Hilfe dieser Argumentation ist leicht nachzuvollziehen, warum sich in Reihenschaltungen an größeren Widerständen auch größere Druckunterschiede (= Spannungen) einstellen müssen. Allgemein kann die abnehmende Intensität der Elektronenströmung bei einer zunehmenden Anzahl von Widerständen im Elektronengasmodell damit erklärt werden, dass sich der von der Batterie erzeugte elektrische Druckunterschied bei Reihenschaltungen auf immer mehr Widerstände aufteilen muss.

### 3.8 Messung und Berechnung von Stromstärke, Spannung und Widerstand

Nachdem die Schüler nun ein fundiertes konzeptionelles Verständnis der grundlegenden Größen Spannung, Stromstärke und Widerstand besitzen, wird im nächsten Schritt die Anschlussbedingung von Volt- und Amperemetern erarbeitet, um auch quantitative Messungen vornehmen zu können. Auch wenn ab diesem Kapitel die sonst in der Physik übliche Schaltbilddarstellung mit einzelnen Leiterbahnen verwendet wird, erscheint eine dreidimensionale Darstellung von Messgeräten in Schaltplänen sinnvoll, um sie visuell klar vom restlichen Stromkreis abzugrenzen (siehe Abb. 10).

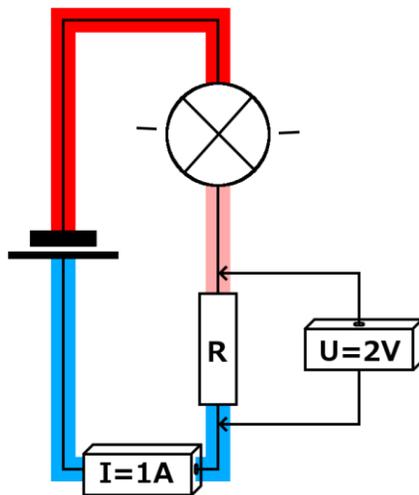
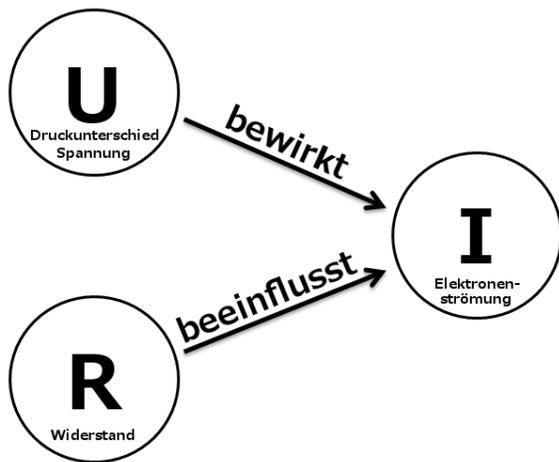


Abb. 10: Darstellung der Anschlussbedingungen von Volt- und Amperemetern in einem einfachen Stromkreis

Um ferner die Anschlussfähigkeit der vermittelten Konzepte zu gewährleisten, werden in diesem Teil des Unterrichtskonzepts vermehrt die physikalisch korrekten Fachtermini „Stromstärke“ und „Spannung“ statt „Elektronenströmung“ und „elektrischer Druckunterschied“ genutzt. Entsprechend der Widerstandsdefinition  $R := U / I$  kommt es dann auch zu einer Quantifizierung

des elektrischen Widerstands, wobei der Widerstandswert  $R$  interpretiert wird als Maß für den elektrischen Druckunterschied, der nötig ist, um eine Elektronenströmung von 1 A durch den Widerstand zu verursachen. Bei den meisten Widerständen steigt dieser Widerstandswert mit zunehmender Stromstärke an. Im Unterrichtskonzept wird der Sonderstatus des Ohm'schen Gesetzes, d.h. die Konstanz des Widerstandwertes bei manchen Materialien, deshalb gegen Ende explizit thematisiert. In einem letzten Schritt wird dann der den Schülern bereits bekannte qualitative Wirkungszusammenhang, wonach die Spannung die Elektronenströmung kausal bewirkt und der Widerstand diese lediglich beeinflusst, wieder aufgegriffen und in die quantifizierte Form  $I = U / R$  gebracht (siehe Abb. 11).

#### Qualitativer Wirkungszusammenhang



#### Quantitativer Wirkungszusammenhang

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

Abb. 11: Übergang vom qualitativen zum quantitativen Zusammenhang der Größen  $I$ ,  $U$  und  $R$

### 4. Erste empirische Ergebnisse zur Lernwirksamkeit

Im Rahmen einer noch nicht endgültig abgeschlossenen Vergleichsstudie wurde die Lernwirksamkeit des Unterrichtskonzepts in der Schulpraxis untersucht. Die hier auf Grundlage von 32 Gymnasialschulklassen bzw. mehr als 700 Schülern vorgestellten Ergebnisse haben also keinen abschließenden Charakter, geben aber einen ersten Blick auf die Lernwirksamkeit des Unterrichtskonzepts. Ziel der im Frankfurter Raum durchgeführten Studie war es, den Verständnisszuwachs von traditionell unterrichteten Klassen (Kontrollgruppe) mit dem Verständnisszuwachs von Klassen zu vergleichen, die nach dem Elektronengasmodell unterrichtet wurden (Treatmentgruppe). Die Kontrollgruppe wurde im Durchschnitt 21,7 Schulstunden lang unterrichtet und umfasste 14 Klassen bzw. 285 Schüler, während die Treatmentgruppe 20,9 Schulstunden lang unterrichtet wurde und 18 Klassen bzw. 418 Schüler umfasste. Im Unterricht aller teilnehmenden Klassen, der sowohl in Kontroll- als auch Treatmentgruppe hauptsächlich in

Jahrgangsstufe 8 stattfand, wurde das Thema „Elektrizitätslehre“ zum ersten Mal im Unterricht behandelt.

Zur Erhebung des Verständniszuwachses in den beiden Gruppen wurde ein in der physikdidaktischen Forschung etablierter zweistufiger Multiple-Choice-Test mit 22 Aufgaben (= Items) zu Stromstärke und Widerstand eingesetzt [8], der um vier Items zum Potenzial- und Spannungsbegriff erweitert wurde. Der Vorteil eines zweistufigen Multiple-Choice-Tests besteht darin, dass die Schüler nicht nur eine Antwort ankreuzen, sondern in einer zweiten Stufe diese dann auch begründen müssen. Auf diese Weise können nicht nur mögliche Fehlvorstellungen erhoben werden, sondern auch falsch-positive Antworten (d.h. richtige Antworten mit falscher Begründung bzw. Vorstellung) erkannt werden. Um den durch den Unterricht erzielten Lernfortschritt messen zu können, wurde das Schülerverständnis in Treatment- und Kontrollgruppe mit Hilfe des beschriebenen Tests einmal vor und einmal nach der Durchführung der Unterrichtsreihe „Elektrizitätslehre“ erhoben. Hierzu wurde der Summenscore über alle 26 Items gebildet, wobei ein Item nur dann als richtig gezählt wurde, wenn sowohl Antwort als auch Begründung korrekt waren. Der maximal erreichbare Summenscore im eingesetzten Multiple-Choice-Tests betrug demnach 26.

Vor Beginn des Elektrizitätslehreunterrichts konnten die Schüler der Kontrollgruppe 5,3 Items und die Schüler der Treatmentgruppe 6,6 Items richtig beantworten. Nach dem Unterricht konnten die Schüler der Kontrollgruppe 8,6 Items und die Schüler der Treatmentgruppe 12,6 Items korrekt beantworten. Vergleicht man den durch den Unterricht erzielten absoluten Lernzuwachs von 3,3 Items in der Kontrollgruppe und 6,0 Items in der Treatmentgruppe (siehe Abb. 12), zeigt sich, dass der Unterricht nach dem Elektronengasmodell zu einem signifikant höheren Verständniszuwachs bei den Schülern führte ( $p < .001$ ).

## Testergebnisse im Vergleich

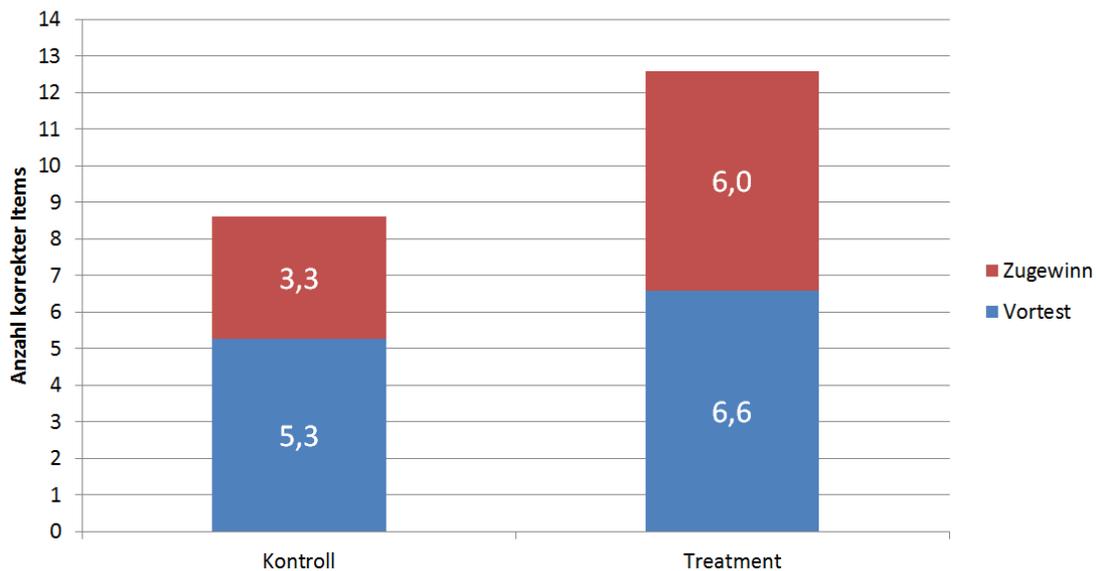


Abb. 12: Vor- und Nachtestergebnisse von Kontroll- und Treatmentgruppe im Vergleich

In Anbetracht des etwas höheren Vorwissens der Treatmentklassen erscheint es sinnvoll, den relativen Zugewinn der Schüler zu betrachten, der beschreibt, wie hoch der absolute Zugewinn bezogen auf den möglichen Zugewinn ausfällt. Wurden im Vortest beispielsweise 6 Items und im Nachtest 16 Items des 26 Items umfassenden Tests richtig gelöst, so würde der relative Zugewinn 50 % betragen, da im Nachtest 10 Items mehr korrekt beantwortet wurden, während eine Steigerung von maximal 20 korrekten Antworten möglich gewesen wäre. Während der mittlere relative Zugewinn der Schüler in der Kontrollgruppe lediglich 15,5 % beträgt, fällt er mit 30,1 % bei Schülern, die nach dem Elektronengasmodell unterrichtet worden sind, nahezu doppelt so hoch aus (signifikant  $p < .001$ ). Interessant ist ferner, im Detail zu schauen, wie stark die Schüler in Abhängigkeit ihrer Vortestergebnisse vom Unterricht profitieren. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, fällt der mittlere relative Zugewinn in der Treatmentgruppe mit über 33 % bei den Schülern besonders hoch aus, die sich im unteren und mittleren Drittel bzgl. des Vorwissens befanden.

## Relativer Zugewinn nach Terzilen im Vortest

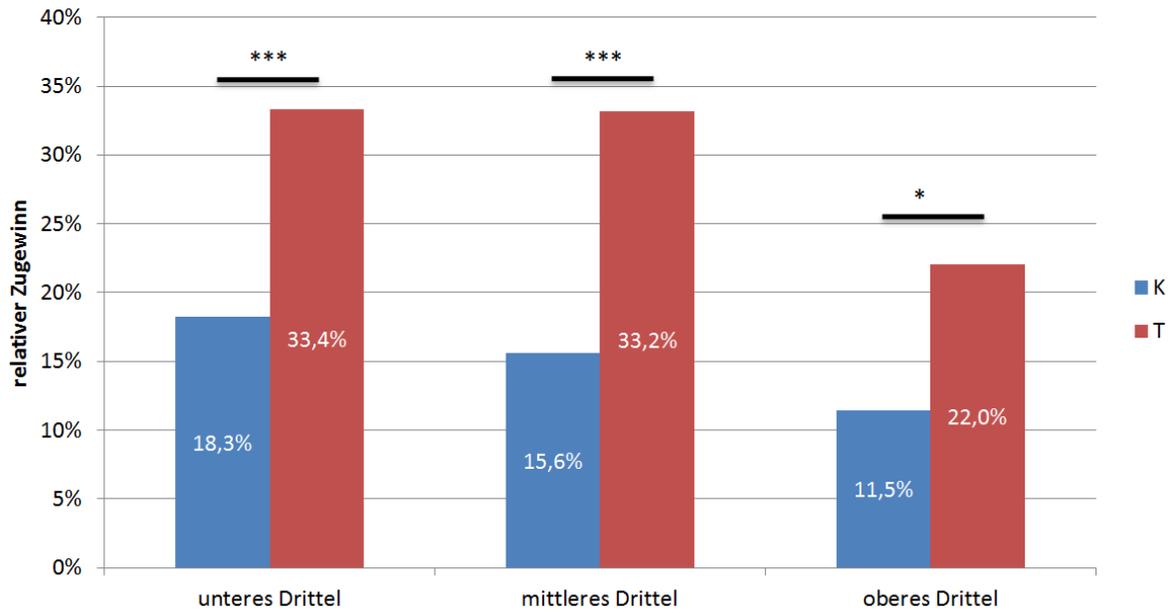


Abb. 13: Vergleich des relativen Zugewinns von Kontroll- und Treatmentgruppe nach Terzilen der Vortestergebnisse

Betrachtet man den relativen Zugewinn der einzelnen Klassen, so fällt dieser sowohl in der Kontroll- als auch in der Treatmentgruppe äußerst heterogen aus. Die Abbildung 14 zeigt den relativen Zugewinn jeder einzelnen Klasse der Kontrollgruppe (blau) und der Treatmentgruppe (rot). Während es in beiden Gruppen Klassen gibt, die nach dem Unterricht weniger Items korrekt beantworten konnten als vor dem Unterricht, beträgt der höchste relative Zugewinn in der Kontrollgruppe 44,1 % und in der Treatmentgruppe 60,1 %.

In der Regel wurden Kontroll- und Treatmentklassen von unterschiedlichen Lehrkräften unterrichtet, jedoch gab es drei Kontroll- bzw. Treatmentklassen, die jeweils von den gleichen Lehrkräften unterrichtet wurden. Wie an Hand der grünen Balken in Abbildung 14 zu sehen ist, lag der relative Zugewinn der Klassen, die nach dem Elektronengasmodell unterrichtet wurden, in allen drei Fällen deutlich über dem relativen Zugewinn der Klassen, in denen die gleichen Lehrkräfte nach ihren bisherigen Konzepten unterrichteten.

## Relativer Zugewinn (Klassen)

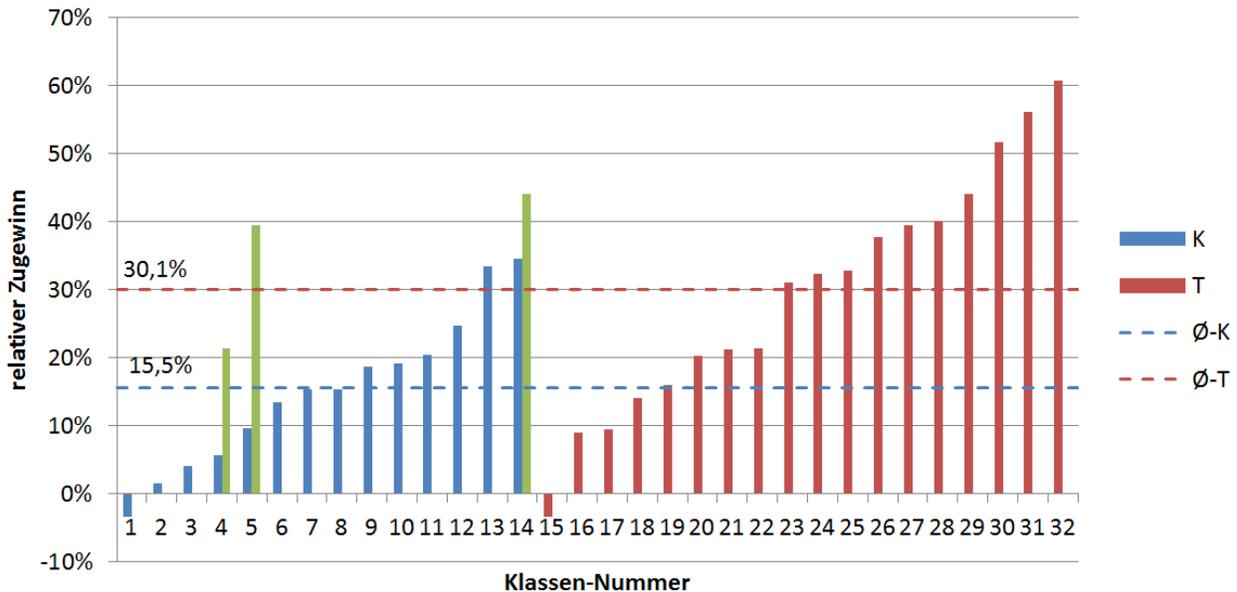


Abb. 14: Relativer Zugewinn der einzelnen Klassen der Kontrollgruppe (blau) bzw. Treatmentgruppe (rot).

Neben der quantitativen Erhebung des Lernfortschritts der Schülerinnen und Schüler fand auch eine qualitative Befragung der an der Studie teilnehmenden Lehrerinnen und Lehrer zu ihren in der Praxis gewonnen Erfahrungen mit dem Elektronengasmodell statt. Dabei wurde kritisiert, dass die Farbwahl für den „elektrischen Druck“ im Widerspruch zu der in der Physik üblichen Konvention steht, wonach z.B. an Spannungswürfeln Pluspole rot und Minuspole blau eingefärbt werden. Sofern dieser Unterschied aber – ähnlich zur Problematik mit physikalischer und technischer Stromrichtung – proaktiv im Unterricht thematisiert wird, stellte er für die meisten Schüler kein Problem dar. Einige Lehrer berichteten ferner davon, dass die Analyse von Reihenschaltungen mit Hilfe von Übergangszuständen verhältnismäßig hohe Anforderungen an das abstrakte Denken stelle und schwächere Schüler daher teils überfordere. Auch wenn die Unterrichtsreihe bei einigen Lehrern etwas länger als geplant dauerte, wurde das Konzept von den an der Studie beteiligten Lehrkräften als in sich schlüssig und fruchtbar beurteilt. Besonders gelobt wurden die vielen gut ausgearbeiteten Unterrichtsmaterialien und die hohe Lernförderlichkeit der Luftdruckanalogie in Kombination mit der Farbdarstellung, die von den Schülern akzeptiert und gern genutzt wurde. Konzeptionell erleichtere das Elektronengasmodell den Schülern insbesondere das Verständnis der elektrischen Spannung und Parallelschaltungen. Insgesamt zeigten sich die Lehrkräfte vom Unterrichtskonzept überzeugt, weshalb neun von zehn Lehrern auch in Zukunft nach dem Konzept unterrichten wollen. Wenn Sie an dem Elektronengasmodell interessiert sind, können Sie passende Unterrichtsmaterialien kostenfrei unter [www.einfache-elehre.de](http://www.einfache-elehre.de) runterladen.

## **Anschriften der Verfasser**

Jan-Philipp Burde, Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt am Main, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt am Main, [burde@physik.uni-frankfurt.de](mailto:burde@physik.uni-frankfurt.de), [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

## **Literaturverzeichnis**

- [1] HERRMANN, F. ; SCHMÄLZLE, P.: *Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I*. In: *MNU* 37 (1984), Nr. 8, S. 476–482
- [2] RHÖNECK, C. v.: *Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 34 (1986), Nr. 13, S. 10–14
- [3] SCHWEDES, H. ; DUDECK, W.-G. ; SEIBEL, C.: *Elektrizitätslehre mit Wassermodellen*. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 44 (1995), Nr. 2, S. 28–36
- [4] GLEIXNER, C.: *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial*. LMU München. Dissertation. 1998
- [5] WALTNER, C. ; SPÄTH ; S., Koller ; D. ; WIESNER, H.: Einführung von Stromstärke und Spannung – Ein Unterrichtskonzept und Ergebnisse einer Vergleichsstudie, Bd. 30. In: HÖTTECKE, D. (Hrsg.): *Entwicklung naturwissenschaftlichen Denkens zwischen Phänomenen und Systematik : Jahrestagung der GDGP in Dresden 2009*. Münster : Lit-Verlag, 2009, S. 182–184
- [6] BURDE, J.-P. ; WILHELM, T. ; WIESNER, H.: *Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I: Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Frankfurt 2014*. In: *PhyDid-B* (2014). URL [www.phydid.de](http://www.phydid.de)
- [7] BURDE, J.-P. ; WILHELM, T.: *Akzeptanzbefragung zum Elektronengasmodell : Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Wuppertal 2015*. In: *PhyDid B* (2015). URL [www.phydid.de](http://www.phydid.de)
- [8] URBAN-WOLDRON, H. ; HOPF, M.: *Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre*. In: *ZfDN* 18 (2012), S. S.201–227