



Vom Luftdruck zur Spannung

Ein an Schülervorstellungen orientiertes Unterrichtskonzept zu einfachen Stromkreisen

JAN-PHILIPP BURDE – THOMAS WILHELM

Vor dem Hintergrund der oftmals großen Verständnisschwierigkeiten für den Zusammenhang von Stromstärke, Spannung und Widerstand in einfachen Stromkreisen wurde ein Unterrichtskonzept auf Basis von Schülervorstellungen für die Sekundarstufe I entwickelt. Anknüpfend an alltägliche Erfahrungen der Lernenden mit Luftdruckphänomenen wird die Spannung noch vor dem Strombegriff als „elektrischer Druckunterschied“ eingeführt und mit Hilfe einer Farbkodierung in Schaltungen visuell gekennzeichnet.

1 Motivation

Wie sähe unser Alltag ohne Elektrizität aus? Eine Antwort auf diese Frage macht deutlich, dass Elektrizität unseren Alltag in einem Maße prägt, wie kaum eine andere Entdeckung. Es ist daher wenig verwunderlich, dass eine Auseinandersetzung mit elektrischen Stromkreisen in allen Lehrplänen der Sekundarstufe I fest vorgesehen ist. Viele Studien kommen jedoch zu dem Ergebnis, dass es Lernenden trotz intensiver unterrichtlicher Bemühungen ihrer Lehrkräfte nicht gelingt, ein grundlegendes Verständnis der Größen Spannung, Stromstärke und Widerstand sowie ihrer wechselseitigen Beziehung in einfachen Stromkreisen zu entwickeln (WILHELM & HOPF, 2018). Eine besondere Herausforderung für die Lernenden stellt dabei die elektrische Spannung dar, die oftmals nicht als eigenständige physikalische Größe, sondern lediglich als Eigenschaft des elektrischen Stroms betrachtet wird, was sich oftmals sogar in der

Verwendung des Begriffs „Stromspannung“ widerspiegelt (RHÖNECK, 1986; BURDE, 2018). Dies ist insofern problematisch, als dass ein angemessenes Verständnis elektrischer Stromkreise ohne ein eigenständiges Spannungskonzept nur schwer denkbar ist.

Die Ursachen für diese Verständnisschwierigkeiten sind vielfältig und reichen von einer verfrühten Mathematisierung über eine ungeschickte Fokussierung auf den Strombegriff bis hin zur Unanschaulichkeit zentraler Größen wie der elektrischen Spannung:

1) Eine verfrüht Mathematisierung in der Form $U = R \cdot I$, ohne zuvor ein angemessenes qualitatives Verständnis der zugrundeliegenden Größen und ihrer wechselseitigen Beziehung sichergestellt zu haben, ist insofern problematisch, als dass sie Lehrenden und Lernenden ein Verständnis für die hinter der Gleichung stehende Physik vortäuscht, das so oftmals nicht

gegeben ist (SCHECKER & DUIT, 2018). Gehen Termumformungen und die Berechnung von Zahlenwerten zulasten einer konzeptionellen Auseinandersetzung mit der Physik, ist anzunehmen, dass die Lernenden kein angemessenes physikalisches Verständnis entwickeln. Eine ausgiebige mathematische Auseinandersetzung mit $U = R \cdot I$ dürfte Lernende zudem in ihrer Vorstellung bestärken, dass die Spannung eine Eigenschaft des Stroms sei, da hier Spannung und Stromstärke definitionsgemäß immer nur gemeinsam auftreten und ein proportionales Verhältnis aufweisen (MUCKENFUß & WALZ, 1997).

2) Aus historischen, nicht jedoch aus didaktischen Gründen liegt der Fokus des Physikunterrichts oftmals auf einer Auseinandersetzung mit dem Strom- statt dem Potenzial- oder Spannungsbegriff (GLEIXNER, 1998). Dieser wird i.d.R. nicht nur vor dem Spannungsbegriff eingeführt, sondern nimmt auch einen größeren Raum im Unterricht ein. Ein solches Vorgehen ist insofern problematisch, als dass es zur Entstehung des bereits von RHÖNECK (1986, 13) beklagten „übermächtigen Strombegriffes“ beiträgt. Demnach tendieren Lernende dazu, Stromkreise allein aus Sicht des elektrischen Stroms zu analysieren, der von der Batterie ausgehend den Stromkreis sequenziell durchläuft. Didaktiker haben deshalb schon in den 1980er Jahren gefordert, zunächst die Spannung als Potenzialdifferenz einzuführen und im weiteren Unterrichtsverlauf den zentralen Zusammenhang zwischen Spannung und Stromstärke zu betonen (COHEN, EYLON & GANIEL, 1983).

3) Auch wenn sich die Vorgänge in elektrischen Stromkreisen einer direkten Wahrnehmung entziehen, sind die Größen „Stromstärke“, z.B. in Analogie zu einem Wasserstrom, und „Widerstand“, z.B. als Behinderung, intuitiv noch leicht zugänglich. Als Differenz zweier Potenzialwerte stellt die elektrische Spannung jedoch eine vergleichsweise komplexe physikalische Größe dar. Paradoxe Weise wird von den Schüler/innen i.d.R. jedoch erwartet, ein Spannungskonzept zu entwickeln, ohne dass die ihm zugrundeliegende Größe selbst, nämlich das Potenzial, im Anfangsunterricht behandelt wird (HERRMANN & SCHMÄLZLE, 1984). Vor diesem Hintergrund ist es wenig überraschend, dass Lernende selbst in einfachen Stromkreisen oftmals große Schwierigkeiten damit haben zu erkennen, zwischen welchen Punkten überhaupt eine Spannung anliegt.

2 Didaktische Grundüberlegungen

Es ist heute unbestritten, dass Schüler/innen nicht als unbeschriebene Blätter („Tabula rasa“) in den Unterricht kommen, sondern aufgrund ihrer Alltagserfahrungen schon früh Annahmen darüber entwickeln, wie unsere Welt funktioniert. Im Unterricht kommt diesem Vorverständnis der Schüler/innen eine ambivalente Rolle zu. Einerseits können die Schülervorstellungen ein Lernhindernis darstellen, da diese sich in der didaktischen Forschung nicht nur als äußerst stabil erwiesen haben, sondern auch die Interpretation neuer Informationen maßgeblich beeinflussen. Andererseits kommt dem Vorwissen der Lernenden aus konstruktivistischer Perspektive eine zent-

rale Rolle zu, da neues Wissen grundsätzlich nur auf Basis von bereits Bekanntem konstruiert werden kann. Dem in diesem Beitrag vorgestellten Unterrichtskonzept liegt die Überzeugung zugrunde, dass einige Schülervorstellungen eine wertvolle Ressource für das Lernen darstellen, an die es in einem konstruktivistischen Sinne gilt anzuknüpfen. Die theoretische Fundierung dieser ausgesprochen positiven Perspektive auf die Vorstellungen der Schüler/innen geht auf diSESSA zurück, der annimmt, dass ein Teil des physikalischen Vorwissens der Lernenden in Form einer Vielzahl an hochgradig fragmentierten, intuitiven Erklärungsbausteinen vorliegt, die er als „phenomenological primitives“ oder kurz „p-prims“ bezeichnet (diSESSA, 2013). Diese stellen unbewusste, auf Basis alltäglicher Phänomene erworbene, themenübergreifende, minimal abstrahierte Erklärungen über physikalische Zusammenhänge dar, die das Denken der Schüler/innen in vielen Bereichen leiten (z.B. „los-gelassene Körper fallen nach unten“). Die Aufgabe des Physikunterrichts besteht nach diSESSA nun darin, diese im Gegensatz zu physikalischen Theorien unverbundenen Wissens-elemente in ein kohärentes physikalisches Konzept zu überführen. Dabei nimmt er an, dass die Hauptaufgabe von physikalischen Konzepten darin besteht, wesentliche Informationen in unserer Umwelt zu identifizieren und zu verarbeiten. Vereinfacht gesprochen können physikalische Konzepte entsprechend dieses für den Physikunterricht äußerst nutzbringenden Modells unterteilt werden in eine Identifikations- und eine Verarbeitungskomponente (diSESSA, SHERIN & LEVIN, 2016) (Abb. 1). Die im Unterricht oftmals anzutreffenden großen konzeptionellen Schwierigkeiten können demzufolge damit erklärt werden, dass die Schüler/innen zunächst lernen müssen, die für das jeweilige Konzept relevanten Informationen verlässlich zu „identifizieren“ und diese anschließend auf Basis ihrer p-prims sinnvoll kognitiv zu „verarbeiten“.

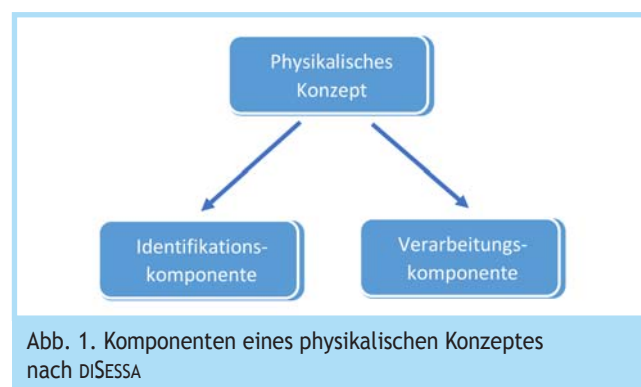


Abb. 1. Komponenten eines physikalischen Konzeptes nach diSESSA

Das im Folgenden beschriebene Unterrichtskonzept verfolgt das Ziel, entsprechend der Überlegungen von diSESSA den Lernenden ein konzeptionelles Verständnis für den Zusammenhang $I = \frac{U}{R}$ auf Grundlage eines eigenständigen Spannungskonzepts zu vermitteln (BURDE & WILHELM, 2020). Hierzu wird eine Anknüpfungsstrategie verfolgt, d.h. durch eine passende Sachstruktur und eine sorgfältige Auswahl an Kontexten findet eine nahtlose Begriffsentwicklung durch gezielte Aktivierung anknüpfungsfähigen Vorwissens statt. Eine zentrale Stellung nimmt dabei das auf Basis grundlegender Alltagserfahrungen entwickelte Ohm'sche p-prim „je größer die Anstrengung,

desto größer das Ergebnis“ und „je größer der Widerstand, desto kleiner das Ergebnis“ ein (DiSessa, 1993). Bezogen auf elektrische Stromkreise entspricht das „Ergebnis“ dabei der elektrischen Stromstärke und die „Anstrengung“ der elektrischen Spannung. Eine wesentliche Voraussetzung für ein konzeptionelles Verständnis des Zusammenhangs $I = \frac{U}{R}$ auf Basis des Ohm'schen p-Prims besteht darin, dass die Schüler/innen die Spannung als Voraussetzung des elektrischen Stroms in verschiedenen Schaltungen zuverlässig identifizieren können. Entsprechend der angenommenen Struktur physikalischer Konzepte besteht der erste Schritt deshalb darin, den Lernenden die Identifikation der an den Widerständen anliegenden elektrischen Spannung zu ermöglichen, indem Leiterabschnitte gleichen Potentials in offenen Schaltskizzen farblich gekennzeichnet werden. In einem zweiten Schritt wird dann in geschlossenen Stromkreisen die Verarbeitungskomponente adressiert, damit die Schüler/innen ein intuitives Verständnis für den Zusammenhang zwischen anliegender Spannung und der resultierenden Stromstärke unter Berücksichtigung des Widerstands entsprechend $I = \frac{U}{R}$ entwickeln.

Um dies zu ermöglichen, wird gezielt an das intuitive Druckverständnis der Lernenden angeknüpft und mit dem Ohm'schen p-Prim verknüpft, indem die elektrische Spannung in Analogie zu Luftdruckunterschieden als „elektrischer Druckunterschied“ eingeführt wird. Anknüpfend an alltägliche Erfahrungen z.B. mit Fahrradreifen oder Luftmatratzen wird dementsprechend erklärt, dass der an einem Lämpchen anliegende „elektrische Druckunterschied“ genauso zu einem elektrischen Strom führt wie Luftdruckunterschiede eine Luftströmung bewirken. Indem nicht die Stromstärke, sondern die elektrische Spannung den Ausgangspunkt jeglicher Auseinsetzung mit Stromkreisen bildet, wird nicht nur von Anfang an deren zentrale Bedeutung für den elektrischen Strom verdeutlicht, sondern auch der Entstehung des „übermächtigen Strombegriffs“ proaktiv entgegen gewirkt. Durch die konsequente Vermeidung didaktisch problematischer Begriffe wie „Verbraucher“ oder „Stromquelle“ bei gleichzeitiger Interpretation des Formelzeichens U als „Unterschied des elektrischen Drucks“ bzw. I als „Intensität der Elektronenströmung“ wird zudem auch sprachlich die Förderung angemessener Vorstellungen unterstützt (BURDE, 2018).

3 Das Unterrichtskonzept

Exemplarisch sollen an Ausschnitten des Unterrichtskonzepts (Kasten 1) im Folgenden dessen Grundideen beschrieben und die jeweils zugrundeliegenden theoretischen Überlegungen aufgezeigt werden.

Zusätzlich werden praxisbezogene didaktische Hinweise zur Umsetzung im Physikunterricht gegeben. Für eine umfassendere Beschreibung des Konzepts sei an dieser Stelle auf BURDE (2018) verwiesen. Je nach Vorkenntnissen der Schüler/innen und intendierter Schwerpunktsetzung durch die Lehrkraft im weiteren Unterricht kann zu Beginn der Unterrichtsreihe eine Einführung in die Elektrostatik oder eine Thematisierung des elektrischen Stromkreises als System zur Energieübertragung stehen. Den eigentlichen Einstieg stellt dann eine Auseinander-

Übersicht über die Einheiten des Unterrichtskonzepts

- 1) Energieübertragung mit Hilfe von Stromkreisen
- 2) Luftströmungen in Folge von Druckunterschieden
- 3) Der elektrische Druck
- 4) Der elektrische Druckunterschied
- 5) Der elektrische Stromkreis
- 6) Der elektrische Widerstand
- 7) Die Parallelschaltung
- 8) Die Reihenschaltung
- 9) Das Ohm'sche Gesetz
- 10) Übungen zur Wiederholung und Vertiefung

Kasten 1. Tabellarische Übersicht über die Einheiten des online verfügbaren Unterrichtskonzepts (Umgebung)

setzung mit der Frage dar, was die Ursache für Luftströmungen ist.

3.1 Luftströmungen in Folge von Druckunterschieden

Entsprechend der im Unterrichtskonzept verfolgten Anknüpfungsstrategie wird am Anfang der Unterrichtsreihe gezielt an das intuitive Luftdruckverständnis der Lernenden angeknüpft. Den Ideen von DiSessa folgend ist hiermit das alltägliche Verständnis gemeint, dass „komprimierte Luft unter Druck steht, gegen die Wände drückt und das Bestreben hat, sich auszudehnen“, wie es die Lernenden im Alltag z.B. beim Umgang mit Fahrradreifen, Luftpumpen oder Fußbällen entwickeln. Explizit nicht vorausgesetzt wird also ein skalarer Druckbegriff mit seiner oftmals schwierigen Abgrenzung zum Kraftbegriff. Um sicherzustellen, dass alle Schüler/innen über entsprechende Primärerfahrungen mit Luftdruck verfügen, sollten im Unterricht einige Schülerexperimente z.B. mit Einmalspritzen als „Mini-Luftpumpen“ durchgeführt werden. Solche Einmalspritzen ohne Nadel (idealerweise mit einer Gummidichtung) können in Apotheken für ca. 20 Cent pro Stück erworben werden. Anhand dieser Schülerexperimente wird dann erarbeitet, dass Luft immer von Bereichen höheren Drucks zu Bereichen niedrigeren Drucks strömt und festgehalten, dass (Luft-)Strömungen immer eine Folge von Druckunterschieden sind (Abb. 2). Wichtig für die spätere Einführung der Spannung als „elektrischer Druckunterschied“ ist an dieser Stelle sicherzustellen, dass die Schüler/innen sprachlich und konzeptionell zwischen Druck und Druckunterschieden unterscheiden.

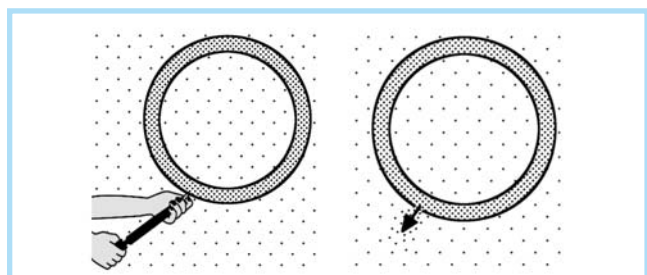


Abb. 2. Im Fahrradreifen ist ein Bereich höheren Luftdrucks; beim Öffnen des Ventils strömt Luft vom Bereich höheren Drucks zum Bereich niedrigeren Drucks.

In einem nächsten Schritt wird eine qualitative Widerstandsvorstellung vorbereitet, indem die Lernenden Luft durch ein Stück Stoff, wie z.B. einem Schal oder Ärmel, blasen. Dabei können sie die Erfahrung machen, dass die Hemmung bzw. Behinderung der Luftströmung umso größer ist, desto dicker der Stoff gefaltet wird – das Stück Stoff also als „Widerstand“ fungiert. Zur Vorbereitung des Zusammenhangs bei elektrischen Stromkreisen wird der an Luftdruckbeispielen erarbeitete qualitative Zusammenhang – wie in Abbildung 3 dargestellt – bereits mit den Buchstaben U , R und I festgehalten. Den Lernenden wird mitgeteilt, dass das U für „Unterschied des (Luft-)Drucks“, das I für „Intensität der (Luft-)Strömung“ und das R schlicht für „Resistance“ steht. Der Terminologie von diSESSA folgend besteht das Ziel hierbei darin, bei den Schüler/innen die „Verarbeitungs-komponente“ eines konzeptionellen Verständnisses für den Zusammenhang $I = \frac{U}{R}$ in elektrischen Stromkreisen aufzubauen.

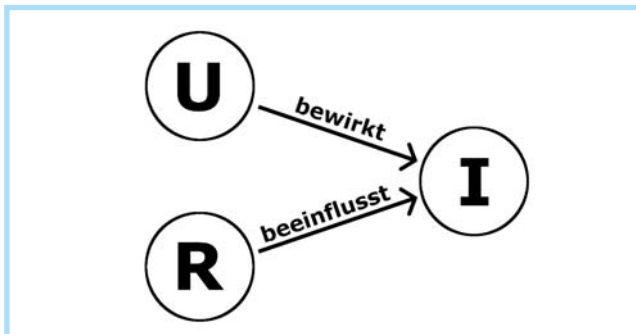


Abb. 3. Zusammenhang der Größen U , R und I bei Luftströmungen

3.2 Spannung als elektrischer Druckunterschied

Nachdem die Lernenden ihre Erfahrungen mit Luftdruck vertiefen konnten, besteht das Ziel nun darin, ihr intuitives Luftdruckkonzept auf elektrische Stromkreise zu übertragen. Die Idee dahinter ist, den Schüler/innen ein intuitives Verständnis des Potenzial- und Spannungskonzepts zu ermöglichen, indem das elektrische Potenzial in Analogie zum Luftdruck als „elektrischer Druck“ eingeführt wird. Hierzu wird argumentiert, dass Elektronen in metallischen Leitern wie Kupfer ein Elektronengas bilden und sich dort genauso frei bewegen können wie „Luftteilchen“ in einem Schlauch. Anknüpfend an die zuvor diskutierten Luftdruckbeispiele lernen die Schüler/innen, dass es abhängig von der Dichte der Elektronen im Leiter zu einem „elektrischen Druck“ kommt. Ist ein Leiter nicht mit einem Batteriepol verbunden, enthält er „normal viele“ Elektronen, was mit einem „elektrischen Normaldruck“ einhergeht. Wird eine Batterie nun an einen offenen Stromkreis angeschlossen, pumpt diese Elektronen vom Leiterstück, das mit dem Pluspol verbunden ist, zum Leiterstück, das mit dem Minuspol verbunden ist (Abb. 4). Somit kommt es im ersteren zu einem „elektrischen Unterdruck“ und im zweiten zu einem „elektrischen Überdruck“.

Wie in Abbildung 4 rechts dargestellt, wird der „elektrische Druck“ in Schaltkreisen im Folgenden u.a. aus unterrichtspraktischen Erwägungen direkt farblich kodiert. Im Gegensatz zur Farbwahl vieler Hersteller von Netzteilen wird ähnlich wie bei

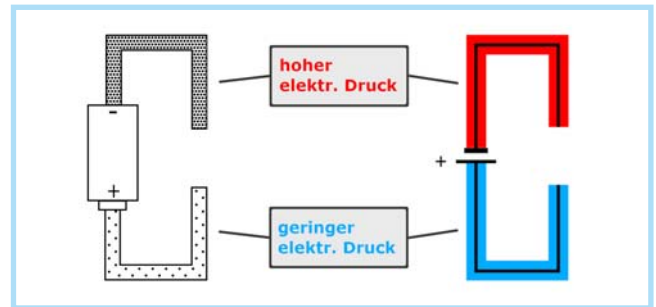


Abb. 4. Punktedichtedarstellung (links) und Farbdarstellung (rechts) des elektrischen Drucks

Thermometern ein hoher Druck am Minuspol jedoch rot und ein geringer Druck am Pluspol blau dargestellt. Indem die Schüler/innen den „elektrischen Druck“ noch vor der Einführung des Strombegriffs in diversen offenen Schaltungen einzeichnen, wird gezielt die von diSESSA beschriebene „Identifikationskomponente“ eines konzeptionellen Verständnisses von $I = \frac{U}{R}$ adressiert, d.h. die Schüler/innen lernen, die elektrische Spannung zuverlässig in verschiedensten Schaltungen zu identifizieren. Der Vorteil der Behandlung offener Stromkreise besteht in der Abwesenheit eines elektrischen Stroms, womit die Aufmerksamkeit der Schüler/innen auf „elektrische Druckunterschiede“ gelenkt, die Entwicklung eines unabhängigen Spannungskonzepts gefördert und somit schon frühzeitig der Entstehung eines „übermächtigen Strombegriffs“ entgegengewirkt wird. Dementsprechend wird vor der Einführung des elektrischen Stroms auch schon diskutiert, wie der „elektrische Druckunterschied“ mit Hilfe von Voltmetern gemessen werden kann. Diese werden wie in Abbildung 5 abgebildet dreidimensional dargestellt, wobei die angeschlossenen „Sensorkabel“ bewusst nicht eingefärbt werden, um die Übersichtlichkeit des ursprünglichen Stromkreises zu bewahren. In realen Schaltungen im Unterricht empfiehlt es sich zudem, farbige Kabel entsprechend der hier vorgeschlagenen Farbkodierung zu verwenden, um die kognitive Belastung der Lernenden beim Erkennen der elektrischen Spannung auf ein Minimum zu reduzieren.

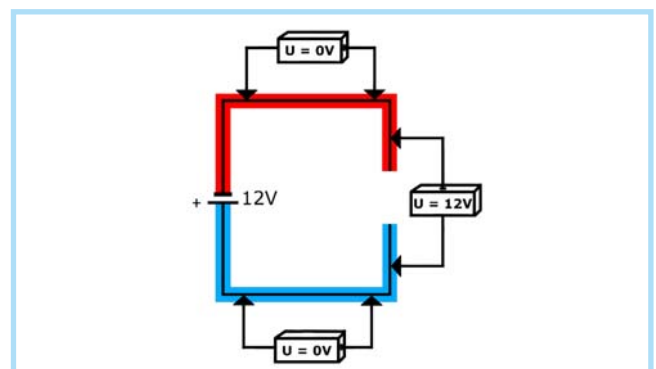


Abb. 5. Darstellung des Anschlusses von Voltmetern in einem offenen Stromkreis

3.3 Der elektrische Stromkreis

Nachdem Spannungen bisher nur in offenen Stromkreisen betrachtet wurden, besteht das Ziel nun darin, dass die Schüler/innen die an Widerständen anliegende Spannung in

verschiedenen Schaltungen zuverlässig identifizieren können und ein konzeptionelles Verständnis dafür entwickeln, wie die Stromstärke von Spannung und Widerstand abhängt. Der Terminologie von diSESSA folgend geht es also darum, nach der „Identifikationskomponente“ bei den Schüler/innen nun eine „Verarbeitungskomponente“ entsprechend $I = \frac{U}{R}$ auf Basis des Ohm'schen p-primis und ihren Luftdruckerfahrungen für elektrische Stromkreise aufzubauen. Anknüpfend an ihre alltäglichen Erfahrungen z.B. mit Fahrradreifen oder Luftmatratzen wird deshalb erklärt, dass der an einem Lämpchen anliegende „elektrische Druckunterschied“ genauso zu einem elektrischen Strom führt wie Luftdruckunterschiede an einem Stück Stoff eine Luftströmung bewirken. Bezugnehmend auf das in der Luftdruckeinheit eingeführte qualitative Widerstandskonzept wird argumentiert, dass ein elektrischer Widerstand, wie z.B. eine Glühlampe, die „Elektronenströmung“ auf ähnliche Weise behindert wie ein Stück Stoff den Luftstrom. Der qualitative Wirkungszusammenhang zwischen U , R und I wird anschließend analog zur Luftdruckeinheit in Form eines Diagramms festgehalten, wobei das U nun für „Unterschied des elektrischen Drucks“, das I für „Intensität der Elektronenströmung“ und das R für „Resistance“ steht (vgl. Abb. 3 und Abb. 7).

Anschließend wird den Lernenden zudem ein besseres Verständnis für die Leitungsvorgänge auf Basis des Drude-Modells vermittelt und auf die Messung der Stromstärke mit Hilfe von Amperemetern eingegangen. Um den Lernenden die konzeptionelle Trennung von Spannung und Stromstärke zu erleichtern, empfiehlt es sich ferner, die beiden Größen nicht mit dem gleichen Gerät zu messen, sondern für Stromstärkemessungen auf analoge Amperemeter und für Spannungsmessungen auf digitale Voltmeter in Kombination mit schwarzen „Messkabeln“ zurückzugreifen. Abschließend wird der Widerstandswert R als mathematisches Maß dafür eingeführt, welcher elektrische Druckunterschied an einem Widerstandselement notwendig ist, damit es zu einer Intensität der Elektronenströmung von 1 A kommt.

3.4 Parallelschaltungen

Nachdem die Identifikations- und Verarbeitungskomponente für ein konzeptionelles Verständnis des Zusammenhangs $I = \frac{U}{R}$ etabliert wurden, sollen Lernende ihr so erworbenes konzeptionelles Verständnis nun auf Parallelschaltungen anwenden. Das Hauptziel besteht dabei darin, die elektrische Spannung nachhaltig als Primärkonzept zur Analyse von elektrischen Schaltungen

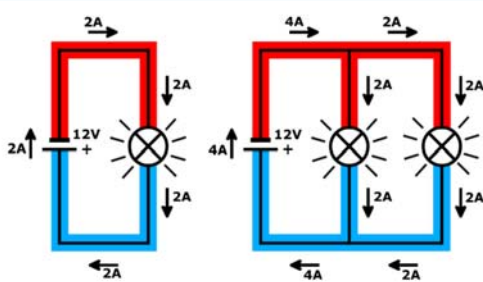


Abb. 6. Potentiale und Stromstärken bei einem bzw. zwei parallel geschalteten Lämpchen

gen bei den Lernenden zu verankern. Insbesondere sollen die Schüler/innen verinnerlichen, elektrische Stromkreise nicht aus Sicht des elektrischen Stroms zu analysieren, sondern entsprechend des Ohm'schen p-primis ausgehend von „elektrischen Druckunterschieden“.

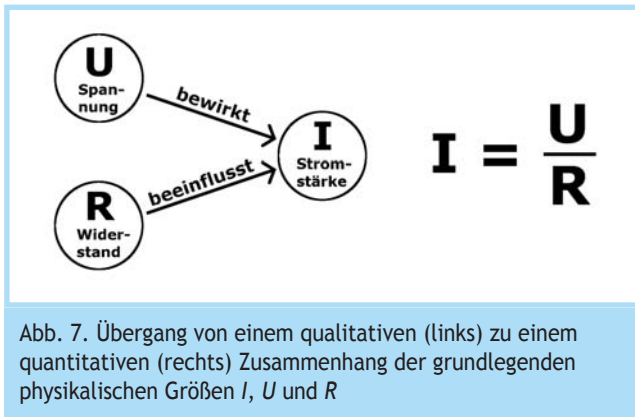
Hierzu wird eine einfache Schaltung mit einem Lämpchen betrachtet, zu dem ein weiteres Lämpchen parallelgeschaltet wird und den Lernenden mitgeteilt, dass eine (ideale) Batterie als Spannungsquelle (und nicht „Stromquelle“!) den elektrischen Druckunterschied konstant hält. Wie in Abbildung 6 dargestellt, „identifizieren“ die Lernenden anschließend die an den Lämpchen anliegenden „elektrischen Druckunterschiede“ mit Hilfe der Farbkodierung. Da es sich um identische Lämpchen handelt, können die Lernenden nun mittels der „Verarbeitungskomponente“ auf Basis des Ohm'schen p-primis erkennen, dass die „Intensität der Elektronenströmung“ durch beide Lämpchen gleich groß sein muss. Die Batterie muss also einen zusätzlichen Strom für das hinzugefügte Lämpchen bereitstellen.

Um den „übermächtigen Strombegriff“ nicht unnötig zu fördern, sollten Lehrkräfte vermeiden davon zu sprechen, dass sich der Strom an den Verzweigungspunkten aufteilt. Auch wenn dies physikalisch innerhalb einer Schaltung natürlich nicht falsch ist, wird damit suggeriert, dass die Batterie eine Quelle eines konstanten Stroms sei, der den Stromkreis sequenziell durchlaufe und sich an Verzweigungen entscheiden müsse, wie er sich aufteilt. Spätestens wenn sich die Anzahl der parallelgeschalteten Lämpchen ändert, führt eine Analyse aus Sicht des Stroms zu falschen Schlussfolgerungen. Stattdessen sollte in Schaltungen grundsätzlich zunächst die Spannung mit Hilfe der Farbkodierung „identifiziert“, anschließend die Stromstärken durch die Lämpchen bestimmt und dann argumentiert werden, dass sich die einzelnen Ströme zu einem Gesamtstrom im Hauptzweig zusammenaddieren, der von der Batterie bereitgestellt werden muss.

Für das sich im Unterrichtskonzept nun anschließende Thema „Reihenschaltungen“ sei an dieser Stelle auf BURDE (2018) bzw. die am Ende des Artikels verlinkten, online erhältlichen Unterrichtsmaterialien verwiesen, da hier nur die Grundideen des Konzepts exemplarisch dargestellt werden können.

3.5 Das Ohm'sche Gesetz

Nach der Behandlung von Reihenschaltungen wird zunächst auf die Besonderheit eingegangen, dass sogenannte Ohm'sche Widerstände im Gegensatz zu vielen anderen Widerständen über einen konstanten Widerstandswert R verfügen. Daran anschließend, also erst sehr spät im Unterrichtsgang, wird die den Lernenden bereits bekannte qualitative Beziehung zwischen U , R und I in die quantitative Form $I = \frac{U}{R}$ übertragen (Abb. 7), wobei Lehrkräfte weiterhin viel Wert auf eine qualitative Interpretation dieser Gleichung legen sollten. Um die Anschlussfähigkeit an den weiteren Unterricht zu gewährleisten, wird spätestens ab hier auch mit den in der Physik üblichen Begriffen, wie z.B. Stromstärke und Spannung gearbeitet. Den Abschluss des Unterrichtskonzepts bilden eine Reihe von Übungen zur Wiederholung und Vertiefung, um das konzeptionelle Verständnis der Lernenden von einfachen Stromkreisen weiter zu festigen.



4 Lernwirksamkeit und Unterrichtsmaterialien

In einer empirischen Evaluation mit 790 Schüler/innen von Frankfurter Gymnasien der 7. und 8. Jahrgangsstufe zeigte sich, dass der hier vorgestellte Ansatz zu einem signifikant besseren konzeptionellen Verständnis von einfachen Stromkreisen führt als der traditionelle Unterricht in der Frankfurter Vergleichsgruppe, der nur klassische Schulbücher zur Verfügung standen. Dank der Verwendung von zweistufigen Fragen konnte zudem gezeigt werden, dass das neue Konzept auch zu einer signifikanten Reduktion fachlich problematischer Vorstellungen wie der Stromverbrauchsvorstellung führt (BURDE, 2018). Wie Abbildung 8 exemplarisch zu entnehmen ist, konnten diese Vorstellungen der Schüler/innen anhand der gewählten Kombination aus Antwort und Begründung erhoben werden. Während die korrekte Lösung der Kombination a2b2 entspricht, würde die Kombination a2b3 hingegen auf die Stromverbrauchsvorstellung hindeuten.

Ferner gaben die an der Studie teilnehmenden Lehrkräfte an, das hier vorgestellte Konzept als wesentliche Verbesserung ihres Unterrichts wahrgenommen zu haben und auch in Zukunft danach unterrichten zu wollen. Gelobt wurde vor allem die verständnisfördernde Wirkung der Luftdruckanalogie in Kombination mit der Farbkodierung („eine Vorstellung von Spannung, Stromstärke und Widerstand fällt einem fast in den Schoß“;

Der Widerstand R_1 im Stromkreis (Abb. rechts oben) ist klein. Er wird durch einen größeren Widerstand R_2 ersetzt (Abb. rechts unten).	
a) Was geschieht mit der Stromstärke im Stromkreis?	
1) Sie wird größer.	
2) Sie wird kleiner, aber nicht null.	
3) Sie bleibt gleich.	
4) Es fließt kein Strom mehr.	
b) Wie erklärst du deine Entscheidung?	
1) Die Batterie ist nicht stark genug, um überhaupt Strom durch den größeren Widerstand zu treiben.	
2) Die Batterie kann nicht einen so großen Strom wie vorher durch den größeren Widerstand treiben.	
3) Ein größerer Widerstand braucht mehr Strom als ein kleinerer Widerstand.	
4) Es ist dieselbe Batterie; daher bleibt auch die Stromstärke gleich.	

Abb. 8. Darstellung einer zweistufigen Frage aus dem ein-gesetzten Testinstrument zur Erhebung des konzeptionellen Verständnisses der Schüler/innen in der E-Lehre

„die Schüler/innen können sehr schnell und auf einfache Weise komplexe Stromkreise analysieren und korrekt bestimmen, welche Lampe leuchtet, wie sich die Spannungen verteilen und welche Lampen parallel geschaltet sind“), während die unkonventionelle Farbwahl eher kritisch gesehen wurde („Die Schüler/innen kamen damit ganz gut zurecht. Ich musste mich konzentrieren, um es nicht falsch zu machen“).

Ein systematisches Anknüpfen an „produktive“ Schülervorstellungen stellt demnach eine erfolgsversprechende Unterrichtsstrategie dar, um den Lernenden eine nahtlose Begriffsentwicklung auch in unanschaulichen Gebieten wie der Elektrizitätslehre zu ermöglichen.

Lehrkräfte können didaktisch ausgearbeitete Unterrichtsmaterialien im Schulbuchformat zum hier vorgestellten Konzept kostenfrei auf der Internetseite www.einfache-elehre.de herunterladen. Die dort bereitgestellten Materialien wurden im Rahmen der nachfolgenden Forschungsstudie EPo-EKo entwickelt, die die hier vorgestellten Ideen nutzt.

Literatur

BURDE, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. Berlin: Logos. Verfügbar unter: <https://zenodo.org/record/1320127> (14.06.2020).

BURDE, J.-P. & WILHELM, T. (angenommen). Teaching electric circuits with a focus on potential differences. *Physical Review Physics Education Research*.

COHEN, R., EYLON, B. & GANIEL, M. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51(5), 407–412.

DISSA, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2–3), 105–225.

DISSA, A. A. (2013). A bird's-eye view of the „pieces“ vs. „coherence“ controversy (from the „pieces“ side of the fence). In: S. VOSNIADOU (Hg.). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. 2. Auflage (S. 31–48). New York: Routledge.

DISSA, A. A., Sherin, B. L. & Levin M. (2016). Knowledge Analysis – An Introduction. In: A. A. DISSA, LEVIN M. & N. BROWN (Hg.), *Knowledge and interaction: A synthetic agenda for the learning sciences* (S. 30–71). New York: Routledge.

GLEIXNER, C. (1998). *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial*. Dissertation. LMU München.

HERRMANN, F. & SCHMÄLZLE, P. (1984). Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 37(8), 476–482.

MUCKENFUß, H. & WALZ, A. (1997). *Neue Wege im Elektrikunterricht*. Zweite bearbeitete Auflage. Köln: Aulis Deubner.

RHÖNECK, C. V. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*, 34(13), 10–14.

SCHECKER, H. & DUIT, R. (2018). Schülervorstellungen und Physiklernen. In: H. SCHECKER, T. WILHELM, M. HOPF & R. DUIT (Hg.). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 1–21). Berlin: Springer.

WILHELM, T. & HOPF, M. (2018). Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In: H. SCHECKER, T. WILHELM, M. HOPF & R. DUIT (Hg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 115–138). Berlin: Springer.

Jun.-Prof. Dr. JAN-PHILIPP BURDE, Jan-Philipp.Burde@uni-tuebingen.de, hat Physik und Englisch für das Lehramt an Gymnasien in Kassel studiert. Er promovierte in Frankfurt am Institut für Didaktik der Physik und ist Juniorprofessor für Didaktik der Physik an der Eberhard Karls Universität Tübingen.

Prof. Dr. THOMAS WILHELM, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik und ist Professor für Didaktik der Physik an der Goethe-Universität Frankfurt am Main sowie Geschäftsführender Direktor des Instituts für Didaktik der Physik. ■□