

### Das Elektronengasmodell aus Sicht der Lehrkräfte

**Jan-Philipp Burde\*, Thomas Wilhelm\***

\* Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str. 1, 60438 Frankfurt  
[burde@physik.uni-frankfurt.de](mailto:burde@physik.uni-frankfurt.de), [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

#### **Kurzfassung**

Im Rahmen einer Design-Based-Research-Studie (DBR) unterrichteten 14 Lehrkräfte aus dem Frankfurter Raum ihre Klassen nach einem Unterrichtskonzept auf Basis des Elektronengasmodells. Die Grundidee dieses Unterrichtskonzepts für die Sekundarstufe I, das aufbauend auf Erkenntnissen aus Teaching Experiments entwickelt wurde, besteht darin, das elektrische Potenzial mit dem Luftdruck bzw. einem „elektrischen Druck“ im Leiter zu vergleichen und die elektrische Spannung so als „elektrischen Druckunterschied“ einzuführen.

In der Studie wurde ein für DBR-Projekte typischer multiperspektivischer Ansatz („Triangulation“) verfolgt, der neben einer quantitativen auch eine qualitative Evaluation des Unterrichtskonzepts vorsieht. Hierzu wurden im vorliegenden Fall die schulpraktischen Erfahrungen der Lehrkräfte mit dem neuen Unterrichtskonzept erhoben. Dabei zeigte sich, dass die Lehrkräfte dem Unterrichtskonzept grundsätzlich eine hohe Lernförderlichkeit bescheinigen, jedoch insbesondere in Bezug auf die Erklärung von Reihenschaltungen mit Hilfe von Übergangszuständen noch Verbesserungsbedarf sehen. Insgesamt 12 der 14 Lehrkräfte geben an, auch in Zukunft auf Grundlage des Elektronengasmodells unterrichten zu wollen.

#### **1. Motivation**

Viele Schülerinnen und Schüler besitzen auch am Ende der Sekundarstufe I kein eigenständiges Spannungskonzept. Stattdessen wird die Spannung von ihnen häufig als Eigenschaft oder Bestandteil des elektrischen Stroms wahrgenommen [1, 2]. Die Gründe für diese Lernschwierigkeiten sind vielfältig und reichen von einer verfrühten Mathematisierung der Zusammenhänge über tief verankerte Schülervorstellungen bis hin zur prinzipiellen Unanschaulichkeit der Elektrizitätslehre und ihrer zentralen Größen. Insbesondere die elektrische Spannung erscheint vielen Lernenden u.a. deshalb besonders abstrakt, weil sie im Gegensatz zum elektrischen Potenzial, das einem Leiterabschnitt lokal zugeordnet werden kann, eine Differenzgröße darstellt. Paradoxerweise wird von den Lernenden jedoch meistens erwartet, ein Verständnis für die elektrische Spannung zu entwickeln, ohne dass das elektrische Potenzial im Unterricht behandelt wurde, obwohl die elektrische Spannung eine Potentialdifferenz darstellt. Darüber hinaus wird auch vermutet, dass die Sachstruktur des traditionellen Unterrichts nicht zur Förderung eines angemessenen Spannungskonzepts beiträgt, weil sich schwerpunktmäßig mit dem elektrischen Strom auseinandergesetzt wird, der in der Regel auch vor der elektrischen Spannung eingeführt wird. In der Folge wird bei der Analyse von Stromkreisen der Strom- und nicht der Spannungsbegriff zum Primärkonzept der Lernenden, obwohl die elektrische Spannung an Widerständen erst den elektrischen Strom verursacht [3]. Ohne ein Ver-

ständnis für die Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen Spannung und Stromstärke ist ein angemessenes Verständnis für elektrische Stromkreise nicht zu erwarten. Ein weiterer Grund für die häufigen Lernschwierigkeiten der Lernenden in Zusammenhang mit der elektrischen Spannung besteht möglicherweise auch darin, dass es bisher an einer anschaulichen und dennoch erklärungs mächtigen Modellvorstellung mangelt.

#### **2. Grundidee des Elektronengasmodells**

Das Elektronengasmodell stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, eine anschauliche und intuitive Erklärung der elektrischen Spannung und des elektrischen Potenzials zu liefern, indem dieses mit dem Luftdruck bzw. „elektrischen Druck“ verglichen wird [4]. Die Idee hinter dem „elektrischen Druck“ besteht darin, dass sich in Metallen freie Elektronen in Teilchenform befinden und dort aufgrund ihrer gegenseitigen Coulomb-Abstoßung einen von der Elektronendichte abhängigen „elektrischen Druck“ verursachen (für eine fachliche Auseinandersetzung sei auf [5] verwiesen). In Analogie zu Luftdruckunterschieden, die die Ursache für Luftströmungen sind, wird die elektrische Spannung so als „elektrischer Druckunterschied“ und somit Antrieb des elektrischen Stroms eingeführt. Die Überlegung hinter dieser didaktischen Elementarisierung des Spannungsbegriffs besteht darin, gezielt an die Vorerfahrungen der Lernenden z.B. mit Luftmatratzen und Fahrradreifen anzuknüpfen, bei denen Luftdruckunterschiede eine Luftströmung bewirken. Wichtig ist, dass hier kein fachlich korrektes Druck-

konzept mit der in der Sekundarstufe I teils schwierigen Differenzierung zwischen skalarem Druckbegriff und vektoriellem Kraftbegriff vorausgesetzt oder eingeführt wird. Vielmehr reicht für das hier angestrebte Verständnis ein intuitives Luftdruckkonzept im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“, um zu verstehen, dass eine Strömung von Bereichen hohen zu Bereichen niedrigeren Drucks strömt. Das Ziel des auf dem Elektronengasmodell aufbauenden Unterrichtskonzepts besteht darin, den Schülerinnen und Schülern ein fundiertes qualitatives Verständnis der Wirkungszusammenhänge in Stromkreisen inkl. eines hierzu nötigen eigenständigen Spannungsbegriffs bereits im Anfangsunterricht zu ermöglichen.

### 3. Die DBR-Studie

Nach einer theoriegeleiteten Entwicklung der grundlegenden Ideen und einer ersten Erprobung dieser Ideen im kleinen Rahmen mit Hilfe von Akzeptanzbefragungen bzw. Teaching Experiments [6] wurde ein entsprechendes Unterrichtskonzept inkl. passender Unterrichtsmaterialien wie z.B. Overheadfolien, Übungsaufgaben und Zusammenfassungen für den praktischen Einsatz im realen Physikunterricht entwickelt [7]. Dieses Unterrichtskonzept auf Basis des Elektronengasmodells wurde anschließend im Schuljahr 2015/16 im Frankfurter Raum empirisch evaluiert. Hierzu unterrichteten 14 Lehrkräfte insgesamt 19 Gymnasialschulklassen nach dem neuen Konzept (Treatmentgruppe), während weitere 17 Gymnasialschulklassen von 11 Lehrkräften traditionell unterrichtet wurden (Kontrollgruppe). Es zeigte sich, dass die Schülerinnen und Schüler der Treatment- gegenüber der Kontrollgruppe einen höchst signifikant höheren Lernzuwachs erzielten. Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen entspricht einer Effektstärke von  $d = .94$ , was einen großen Effekt darstellt [8].

Im Sinne des Forschungsansatzes von Design-Based-Research (DBR) ist es jedoch nicht nur von Interesse zu untersuchen, ob die Schülerinnen und Schüler aufgrund des neuen Unterrichtskonzeptes einen höheren Lernerfolg erzielen, sondern auch, wie das neue Unterrichtskonzept von den Lehrkräften auf Basis ihrer Praxiserfahrungen beurteilt wird. Der Grund hierfür ist, dass das neue Unterrichtskonzept nur dann in der Schulpraxis ankommen kann, wenn es von den Lehrkräften akzeptiert wird. Ein wesentliches Ziel von DBR als Forschungsansatz besteht nämlich darin, Forschung zum „Zwecke der Innovation“ [9, S.53] zu betreiben. Hierrunter wird nicht die alleinige Existenz neuer Unterrichtsmaterialien oder didaktischer Erkenntnisse verstanden, sondern dass diese auch ihren Weg in die Unterrichtspraxis finden und dort von den Betroffenen als signifikante Verbesserung wahrgenommen werden. Design-Based-Research hat also bereits bei der For-

schungskonzeption die spätere Implementation der Forschungserkenntnisse in der Praxis im Blick, um einen Beitrag zur Überwindung der oft beklagten Kluft zwischen Forschung und Praxis zu leisten. Auch in Hinblick auf eine DBR-typische Überarbeitung des Unterrichtskonzepts zu einem späteren Zeitpunkt im Rahmen eines Re-Designs ist es wichtig, die Praxiserfahrungen der Lehrkräfte mit dem Unterrichtskonzept zu kennen, um die so gewonnenen Erkenntnisse in die Weiterentwicklung des Unterrichtskonzepts einfließen lassen zu können.

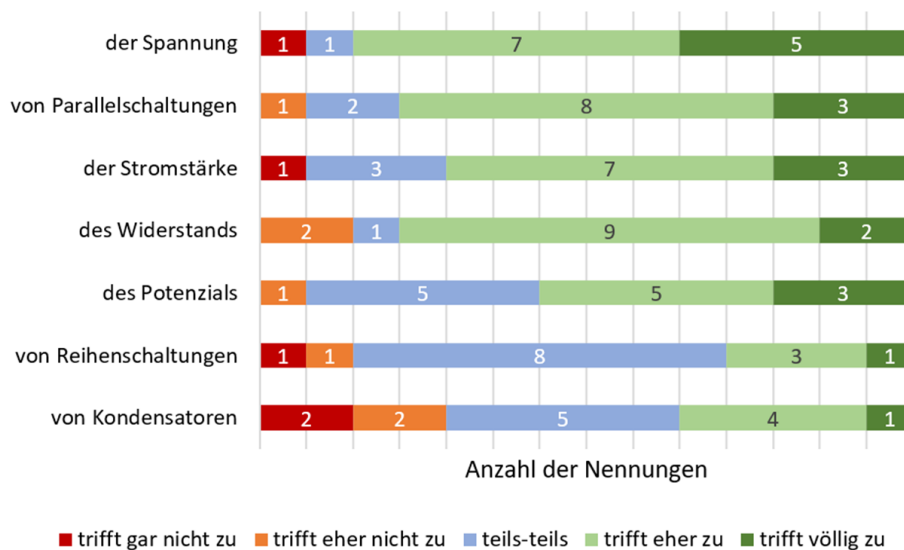
### 4. Qualitative Erhebung

Um ein Bild davon zu bekommen, wie die Lehrerinnen und Lehrer das Unterrichtskonzept bewerten, d.h. wo sie beispielsweise die Stärken des Unterrichtskonzepts und wo tendenziell Verbesserungsbedarf sehen, wurde ein Online-Fragebogen erstellt und per E-Mail an die Lehrkräfte verteilt. Der Fragebogen hatte einen Umfang von etwa 30 Minuten, gliederte sich in verschiedene thematische Abschnitte und nutzte zwei verschiedene Frageformate. Mit Hilfe von vorformulierten Aussagen und einer Antwortskala vom Likert-Typ wurde einerseits versucht, von den Lehrkräften eine Gesamteinschätzung zum Unterrichtskonzept zu bekommen. Das geschlossene Frageformat wurde gewählt, um bei diesen Fragen eine Vergleichbarkeit der Antworten zu gewährleisten. Die andererseits nahezu ausschließlich offenen Fragen zu unterschiedlichen Aspekten des Unterrichtskonzepts sollten den Lehrkräften hingegen ermöglichen, eine differenzierte Beschreibung ihrer jeweiligen Sichtweisen und Erfahrungen zu geben. Während die geschlossenen Fragen zur Gesamteinschätzung des Unterrichtskonzepts im Online-Fragebogen zwingend zu beantworten waren, hatten viele offene Fragen einen optionalen Charakter, weil davon ausgegangen wurde, dass nicht jede Lehrkraft zu jeder Frage etwas beizutragen hat. Insgesamt beteiligten sich 14 Lehrkräfte der Treatmentgruppe an dem Fragebogen.

### 5. Ergebnisse

Für 12 dieser 14 Lehrkräfte waren Neugier und Interesse an neuen Unterrichtsansätzen das Hauptmotiv, an der Studie teilzunehmen. Weitere zwei Lehrkräfte gaben an, mit ihrem bisherigen Vorgehen im Unterricht unzufrieden gewesen zu sein. Während ihrer bisherigen Lehrtätigkeit hatten zwölf Lehrkräfte bereits das Modell des geschlossenen, ebenen Wasserkreislaufs [10], fünf das Modell des offenen Wasserkreislaufs mit Höhenunterschied [11] und drei bereits das Autobahn-Modell im Unterricht genutzt. Einzelne Lehrkräfte berichteten darüber hinaus, u.a. bereits das Stäbchenmodell [12], das Fahrradkettenmodell bzw. den starren Elektronenring [13] sowie das Rucksackmodell [14] eingesetzt zu haben.

## Das Unterrichtskonzept führt zu einem guten konzeptionellen Verständnis...



**Abb. 1:** Bewertung der Lernförderlichkeit des Unterrichtskonzepts in Hinblick auf grundlegende Konzepte in der Elektrizitätslehre durch die Lehrkräfte

### 5.1. Bewertung der Lernförderlichkeit

Die Bewertung der Lernförderlichkeit diverser grundlegender Konzepte stellte den ersten Teil der geschlossenen Fragen dar, die von den Lehrkräften mit Hilfe einer Likert-Skala mit den Kategorien „trifft gar nicht zu“, „trifft eher nicht zu“, „teils-teils“, „trifft eher zu“ und „trifft völlig zu“ beantwortet werden sollten. Das Ziel bestand darin, von den Lehrkräften eine Gesamteinschätzung darüber zu erhalten, inwiefern das Unterrichtskonzept zu einem guten konzeptionellen Verständnis von verschiedenen grundlegenden Konzepten in der Elektrizitätslehre führt. Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, gibt es kaum Konzepte, bei denen das Unterrichtskonzept aus Sicht von mehr als einer Lehrkraft gar nicht oder eher nicht zu einem guten Verständnis bei den Lernenden führt. Eine Mehrheit bescheinigt dem Unterrichtskonzept, zu einem guten konzeptionellen Verständnis der elektrischen Spannung, der Stromstärke, des Widerstands, des Potentials und von Parallelschaltungen zu führen. Etwas unschlüssig sind sich die Lehrkräfte hingegen bzgl. der Frage, ob das Unterrichtskonzept zu einem guten konzeptionellen Verständnis von Kondensatoren und Reihenschaltungen führt.

Da das Unterrichtskonzept vor dem Hintergrund entwickelt wurde, den Lernenden ein gutes konzeptionelles Verständnis der elektrischen Spannung zu vermitteln, weil dies in der Regel im traditionellen Physikunterricht nicht gelingt, ist es sehr erfreulich, dass die Lehrkräfte dem Unterrichtskonzept bzgl. der elektrischen Spannung die höchste Lernförder-

lichkeit bescheinigen. Der Umstand, dass das Unterrichtskonzept nach Ansicht einer großen Mehrheit der Lehrkräfte ebenfalls zu einem guten konzeptionellen Verständnis von Parallelschaltungen, der Stromstärke, des Widerstands und des elektrischen Potentials führt, deutet darauf hin, dass diese vergleichsweise hohe Lernförderlichkeit der elektrischen Spannung nicht auf Kosten des übrigen Konzeptverständnisses zu gehen scheint. Die von den Lehrkräften etwas geringer bewertete Lernförderlichkeit in Bezug auf Kondensatoren ist wenig überraschend, da Lade- und Entladevorgänge von Kondensatoren lediglich zur Hinführung zu Reihenschaltungen dienen. Auf die Gründe für die vergleichsweise geringe Lernförderlichkeit von Reihenschaltungen wird in Abschnitt 5.5 mit Hilfe offener Fragen noch einmal genauer eingegangen.

### 5.2. Bewertung didaktischer Aspekte

In dem zweiten Abschnitt mit geschlossenen Fragen wurden die Lehrkräfte gebeten, eine didaktische Einschätzung zu diversen Aspekten des Unterrichtskonzepts vorzunehmen. Wie in Abbildung 2 zu sehen, sind die Lehrkräfte allgemein der Auffassung, dass das Unterrichtskonzept die abgefragten didaktischen Kriterien im Großen und Ganzen erfüllt. Während keine Lehrkraft die Auffassung vertrat, dass eines der didaktischen Kriterien von dem Unterrichtskonzept überhaupt nicht erfüllt würde, war immer die gleiche Lehrkraft der Meinung, dass das Unterrichtskonzept die didaktischen Aspekte „eher nicht“ erfülle.

## Das Unterrichtskonzept...

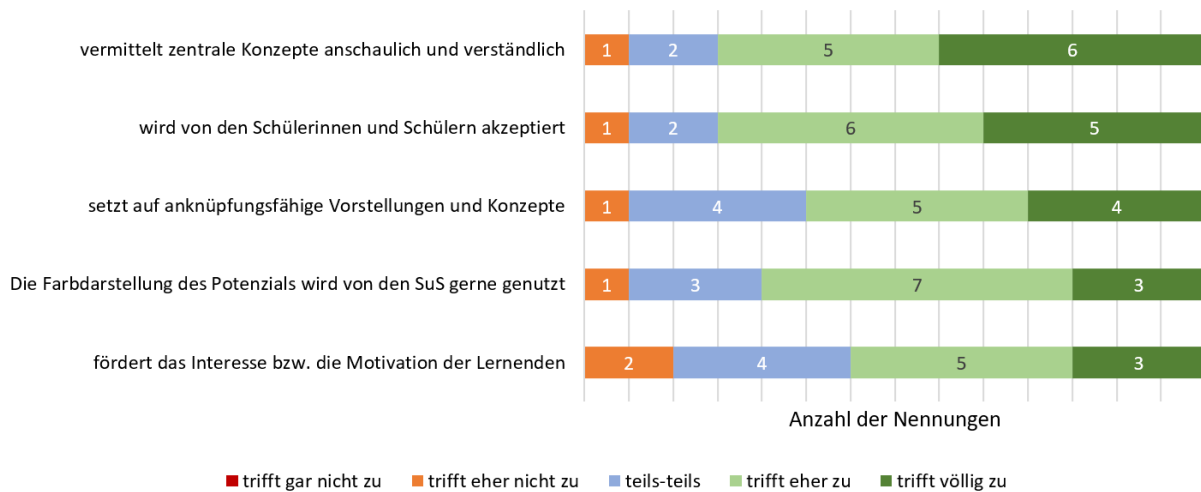


Abb. 2: Bewertung unterschiedlicher didaktischer Aspekte des Unterrichtskonzepts durch die Lehrkräfte

### 5.3. Bewertung grundlegender Ideen

Alle Lehrkräfte waren der grundsätzlichen Auffassung, dass es sich im Unterricht als fruchtbar erwiesen hat, die elementare Elektrizitätslehre mit Hilfe des elektrischen Potenzials zu erklären. Auf die offene Frage, ob die Schülerinnen und Schüler ein für das Unterrichtskonzept ausreichendes intuitives Luftdruckverständnis im Sinne von „komprimierte Luft steht unter Druck, drückt gegen die Wände und hat das Bestreben sich auszudehnen“ besitzen, gaben neun Lehrkräfte an, dies sei definitiv der Fall, wohingegen vier Lehrkräfte der Meinung waren, die Schülerinnen und Schüler hätten zu Beginn der Unterrichtsreihe kaum über ein solches Luftdruckkonzept verfügt, dies habe sich aber mit Hilfe des Unterrichtskonzepts schnell aufbauen lassen („Die Schüler tun sich sehr schwer mit dem Modell eines Druckes. Durch die Einführung dieses Konzeptes mit Hilfe der Spritzen, ließ sich dieses Konzept jedoch für die Schülerinnen und Schüler recht anschaulich einführen“; „Verständnis ist vorhanden bzw. kann mit dem Konzept sehr schnell hergestellt werden, auch ohne, dass Druck als phys. Größe vorher bekannt ist“). Eine Lehrkraft gab jedoch an, die Lernenden würden nicht über ein ausreichendes intuitives Luftdruckverständnis für das Unterrichtskonzept verfügen.

### 5.4. Stärken und Schwächen des Konzepts

Hinsichtlich der Stärken des Unterrichtskonzepts bestand zwischen den Lehrkräften vergleichsweise große Einigkeit. Der größte Vorteil des Konzepts wurde darin gesehen, dass die Luftdruckanalogie in Kombination mit der vorgeschlagenen Farbkodierung zu einem besseren konzeptionellen Verständnis der Grundgrößen elektrischer Stromkreise führt („eine Vorstellung von Spannung, Stromstärke und Widerstand fällt einem fast in den Schoß“; „die

Schülerinnen und Schüler 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“). Darüber hinaus wurde positiv hervorgehoben, dass insbesondere der Unterschied zwischen Spannung und Stromstärke im Konzept klar herausgearbeitet wird und die Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Spannung und Strom deutlich wird. Neben der Tatsache, dass das Unterrichtskonzept gutes und reichliches Übungsmaterial enthält („Die SuS waren sehr begeistert von dem liebevoll gestalteten Info-Material und fanden das Übungsheft prima“; „Hervorragend zusammengestelltes Material, tolle inhaltliche Durchdringung des Themas, gute Strukturierung“), wurde von den Lehrkräften vor allem gelobt, dass die Schülerinnen und Schüler durch das Unterrichtskonzept auch eine mikroskopische Modellvorstellung der Vorgänge in elektrischen Stromkreisen bekommen.

Während hinsichtlich der Vorteile des Unterrichtskonzepts weitgehende Einigkeit bei den Lehrkräften bestand, zeigte sich bzgl. der Schwächen des Unterrichtskonzeptes kein klares Bild. Sieht man von Punkten ab, die nur von einzelnen Lehrkräften kritisiert wurden, bestand die Hauptkritik darin, dass die gewählte Farbkodierung (rot für den elektrischen Überdruck am Minuspol bzw. blau für den elektrischen Unterdruck am Pluspol) der in der Physik gängigen Konvention widerspricht, wonach der Pluspol rot und der Minuspol blau dargestellt werden. Kritisiert wurde ferner, dass die Erklärungen zu den Reihenschaltungen mit Hilfe der Übergangszustände zu abstrakt bzw. theoretisch für den Anfangsunterricht seien und insgesamt zu wenige Vorschläge für den Einsatz von Experimenten gemacht würden. Auch wurde von einigen Lehrkräften angemerkt, dass das Unterrichtskonzept mit allen Mate-

rialien in der Umsetzung teils mehr Zeit in Anspruch genommen hätte als veranschlagt. Auch wenn die unkonventionelle Farbwahl von den Lehrkräften kritisiert wurde, gab eine große Mehrheit von 11 Lehrkräften an, dass die Schülerinnen und Schüler selber mit der im Unterrichtskonzept genutzten Farbkodierung keine Probleme gehabt hätten und diese auch nicht zu Verständnisschwierigkeiten geführt habe. Vielmehr scheint es so zu sein, dass sich manche Lehrkräfte mit der unkonventionellen Farbkodierung schwergetan haben, wie die beiden folgenden Zitate aus dem Fragebogen illustrieren: „die Schülerinnen und Schüler haben die Farbwahl so verinnerlicht, dass sie diese in der Lernkontrolle überwiegend korrekt angewendet haben, obwohl mir in der Aufgabenstellung ein Fehler (Farbvertauschung) unterlaufen ist“; „Die SuS kamen damit ganz gut zurecht. Ich musste mich konzentrieren um es nicht falsch zu machen“. Weitere drei Lehrkräfte gaben an, dass es in ihrem Unterricht in Folge der Farbkodierung zu Verständnisschwierigkeiten bei den Schülerinnen und Schülern gekommen sei.

### 5.5. Erklärung von Reihenschaltungen

Um den Schülerinnen und Schülern die Entwicklung einer dynamischen Modellvorstellung mit Übergangszuständen zur Analyse von Reihenschaltungen zu erleichtern, wurden im Unterrichtskonzept zunächst Lade- und Entladevorgänge von Kondensatoren betrachtet [7], obwohl Kondensatoren in der Mittelstufe normalerweise nicht Unterrichtsgegenstand sind. Bei der Frage, ob dieses Vorgehen sinnvoll sei oder nicht, zeigten sich die Lehrkräfte gespalten. Auf der einen Seite waren vier Lehrkräfte der Ansicht, dass dieses Vorgehen prinzipiell sinnvoll sei, aber dass Kondensatoren aus Zeitgründen aus dem Unterrichtskonzept gestrichen werden sollten. Weitere zwei Lehrkräfte waren der Meinung, die Behandlung des Themas Kondensatoren sei schlicht unnötig. Auf der anderen Seite vertraten vier Lehrkräfte die Ansicht, die Analyse von Lade- und Entladevorgängen bei Kondensatoren sei wichtig für das Verständnis von Übergangszuständen bzw. Reihenschaltungen.

Eindeutig fiel hingegen das Urteil der Lehrkräfte bzgl. der Frage aus, ob die Schülerinnen und Schüler Reihenschaltungen auch alleine mit Hilfe von Übergangszuständen und ohne die Fahrradkettenanalogie analysieren könnten. Die Mehrheit von acht Lehrkräften war hier der Meinung, eine solche Analyse rein mit Hilfe von Übergangszuständen würde den meisten Schülerinnen und Schülern sehr schwer fallen, während weitere zwei Lehrkräfte angaben, nur leistungsstärkere Schülerinnen und Schüler kämen auch alleine mit den Übergangszuständen zurecht. Somit scheinen sich die Lehrkräfte darin einig, dass Reihenschaltungen im Anfangsunterricht von den meisten Schülerinnen und Schülern nicht alleine mit Übergangszuständen, d.h. ohne die Zuhilfenahme anderer Erklärungen bzw. Modelle, analysiert werden können.

Bei der Frage, ob die parallele Verwendung der Fahrradkettenanalogie zur Erklärung von Reihenschaltungen neben der Betrachtung der Übergangszustände sinnvoll sei oder nicht, zeigten sich die Lehrkräfte gespalten. Die eine Hälfte der Lehrkräfte gab an, dass die Fahrradkettenanalogie hier eine klare Hilfe für die Schülerinnen und Schüler gewesen sei – insbesondere in Bezug auf die Addition von Widerständen und die Konstanz der Stromstärke bei Reihenschaltungen. Die andere Hälfte teilte sich auf drei Lehrkräfte auf, die der Meinung waren, die Fahrradkettenanalogie sei für ein Verständnis von Reihenschaltungen nicht notwendig und würde von den Schülerinnen und Schülern sogar abgelehnt bzw. nicht verstanden, während weitere zwei Lehrkräfte die Auffassung vertraten, dass im Unterrichtskonzept neben dem Elektronengasmodell keine weiteren Modelle verwendet werden sollten.

### 5.6. Zukünftiger Unterricht

Alles in allem scheinen die Lehrkräfte mit dem Unterrichtskonzept sehr zufrieden zu sein, da 12 der 14 Lehrkräfte angaben, die Elektrizitätslehre auch in Zukunft auf Grundlage des hier vorgeschlagenen Elektronengasmodells unterrichten zu wollen („[...] weil ich es für sehr anschaulich und gut durchdacht halte. Zudem bietet es schwächeren Schülern die Möglichkeit einen Zugang zu diesem doch sehr anspruchsvollen Themenbereich zu erlangen“). Eine weitere Lehrkraft war sich noch nicht ganz sicher und eine Lehrkraft lehnte es ab, ihren Elektrizitätslehreunterricht in Zukunft auf dem Elektronengasmodell aufzubauen („Falls ich sehr intelligente Schüler haben werde, könnte ich mir vorstellen, ihnen das als Differenzierung reinzugeben, aber als Unterrichtsmodell nicht mehr“). Auf die Frage, was sie am Unterrichtskonzept ändern würden, sofern sie in Zukunft wieder danach unterrichten, wurde von den Lehrkräften am häufigsten geantwortet, dass sie das Konzept durch das Streichen von Texten und Aufgaben zeitlich straffen würden.

Entsprechend der großen persönlichen Zustimmung zu dem Unterrichtskonzept gaben 11 der 14 Lehrkräfte an, das Unterrichtskonzept auch an Kolleginnen und Kollegen weiterempfehlen zu wollen oder dies bereits getan zu haben („Ja, weil ich die Erfahrungen damit als sehr positiv empfinde und weil ich glaube, dass ein besseres konzeptionelles Verständnis vermittelt wird als bei einem konventionellen Unterrichtsgang.“; „Das Konzept ist durchdacht und gefällt mir wesentlich besser als das WassermodeLL“; „Ich habe den Eindruck, dass die SuS dieses abstrakt erscheinende Thema besser verstehen“). Bei zwei weiteren Lehrkräften war das Unterrichtskonzept den Kolleginnen bzw. Kollegen schon bekannt, z.B. weil diese auch an der Studie teilgenommen haben, und eine Lehrkraft plant nicht, das Unterrichtskonzept weiterzuempfehlen („Ich präferiere trotz meiner jetzigen Erfahrung mit dem Elektronengasmodell das Wasserkreislaufmodell. [...] Mein persönlicher Eindruck ist, dass ich mit dem

*Wassermodell im Unterricht mehr Physik transportieren kann als mit dem Elektronengasmodell“).*

## 6. Ausblick

Entsprechend des Design-Based-Research-Ansatzes mit seinen Zyklen aus Design, Erprobung und Re-Design kann das Unterrichtskonzept trotz seiner bereits hohen Lernförderlichkeit nicht als ein abgeschlossenes Produkt betrachtet werden. Die Idee besteht vielmehr darin, das Unterrichtskonzept in einem weiteren Entwicklungszyklus auf Basis der in dieser Studie gesammelten Erfahrungen weiter zu optimieren und Lösungen für die noch bestehenden Schwächen und Unzulänglichkeiten zu finden. Dahinter steht die Überzeugung der DBR-Community, dass sich eine wirkliche Verbesserung der Schulpraxis nur auf evolutionärem Wege erreichen lässt und es Didaktiker braucht, die sich dem Ziel einer nachhaltigen didaktischen Innovation in ähnlichem Maße verschreiben wie die Ingenieure beim Automobil, das trotz seiner anfänglichen Unzuverlässigkeit und hohen Lautstärke durch stetige Verbesserungen zu einem großen Erfolg wurde [9, S.56; 15, S.321f). Auf Basis der schulpraktischen Erfahrungen mit dem Unterrichtskonzept sollen deshalb im Folgenden exemplarisch einige Aspekte angesprochen werden, die im Rahmen eines weiteren Entwicklungszyklus von besonderem Interesse sind.

In der Physikdidaktik ist heute unumstritten, dass eine geeignete Kontextorientierung ein wesentliches Merkmal guten Physikunterrichts darstellt, da die Einbettung von physikalischen Themen in Alltagskontexte es den Schülerinnen und Schülern erlaubt, die Physik als sinnvoll und für ihr Leben relevant wahrzunehmen [16]. Insbesondere haben zahlreiche Studien zeigen können, dass sich ein an für Mädchen interessanten Kontexten orientierter Physikunterricht positiv auf das Sachinteresse und das Selbstkonzept von Mädchen auswirkt [17, 18, 19]. Unklar hingegen ist, inwiefern eine stärkere Kontextorientierung im Unterricht auch einen positiven Einfluss auf die Lernwirksamkeit des Physikunterrichts hat. Im Rahmen der internationalen Design-Based-Research-Nachfolgestudie „EPO-EKO“ eines Konsortiums der vier Universitäten Wien, Graz, Darmstadt und Frankfurt sollen daher die Effekte des Elektronengasmodells einerseits und einer Kontextorientierung andererseits mit Hilfe eines 2x2-Designs genauer untersucht werden [20].

Auf Grundlage des Feedbacks der Lehrkräfte ist auch eine Überarbeitung diverser Aspekte des bisherigen Unterrichtskonzepts geplant, z.B. in Hinblick auf den Umgang mit Reihenschaltungen und der Farbkodierung. In der Physik wird der elektrische Pluspol üblicherweise rot und der elektrische Minuspol blau eingefärbt, während dies im Unterrichtskonzept entsprechend der gewählten Farbkodierung genau andersherum ist. Ein Anpassen der Farbkodierung aufgrund des Feedbacks der Lehrkräfte an die übliche Konvention wäre leicht umzu-

setzen, hätte aber einen entscheidenden Nachteil: Die Farbe Blau stünde dann für einen hohen elektrischen Druck, was der Alltagserfahrung widerspricht, dass hohe Werte, z.B. bei Druck oder Temperatur, in der Regel in Rot dargestellt werden. Vor dem Hintergrund, dass die Lernenden mit der bisherigen Farbkodierung kein Problem hatten, erscheint es daher hilfreicher, den Widerspruch im Unterrichtskonzept proaktiv aufzugreifen und im Rahmen einer Diskussion von technischer vs. physikalischer Stromrichtung zu thematisieren. Überträgt man nämlich die Erklärung, wie es in Folge von elektrischen Druckunterschieden zum Strom kommt, auf die technische Stromrichtung, kann die konventionelle Farbkodierung von Plus- und Minuspol so interpretiert werden, dass früher am Pluspol ein elektrischer Überdruck und am Minuspol ein elektrischer Unterdruck von positiven Ladungsteilchen angenommen wurde.

Viele Lehrkräfte vertraten die Ansicht, dass eine Analyse von Reihenschaltungen alleine mit Hilfe von Übergangszuständen die meisten Schülerinnen und Schüler im Anfangsunterricht überfordert. Es ist deshalb zu überlegen, ob nicht zunächst ausgehend von einfachen Spannungsmessungen an einer Reihenschaltung von unterschiedlichen Widerständen erarbeitet werden sollte, dass an größeren Widerständen auch eine größere Spannung abfällt. Darauf aufbauend könnte dann gemeinsam überlegt werden, wie dies innerhalb des Elektronengasmodells zu erklären ist. Im Rahmen einer Binnendifferenzierung könnte hier angestrebt werden, dass die meisten Lernenden diese Erklärung zwar nachvollziehen, jedoch nur leistungsstärkere Schülerinnen und Schüler die Argumentation mit Übergangszuständen auch auf unbekannte Schaltungen anwenden können sollen. Zudem ist zu überlegen, den Schülerinnen und Schülern ein Verständnis für die Übergangsprozesse durch den Einsatz von passenden Animationen zu erleichtern. Ein weiterer Kritikpunkt einiger Lehrkräfte bestand darin, dass das Unterrichtskonzept mit allen Materialien in der Umsetzung teils mehr Zeit in Anspruch genommen hätte als veranschlagt. Es wird deshalb angestrebt, das Unterrichtskonzept zu straffen, indem bestimmte Texte gekürzt und Aufgaben gestrichen werden. Sofern in einem überarbeiteten Unterrichtskonzept der Analyse von Reihenschaltungen mit Hilfe von Übergangszuständen eine geringere Bedeutung zukommt, könnte zur Erreichung dieses Ziels auch auf eine Thematisierung von Lade- und Entladevorgängen von Kondensatoren verzichtet werden.

## 7. Literatur

- [1] Rhöneck, C. v. (1986): Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis und zu den Begriffen Strom, Spannung und Widerstand. In: *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik 34* (13), S. 10–14.

- [2] Maichle, U. (1982): Schülervorstellungen zu Stromstärke und Spannung. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie* 30 (11), S. 383–387.
- [3] Cohen, R.; Eylon, B.; Ganiel, M. (1983): Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. In: *American Journal of Physics* 51 (5), S. 407–412.
- [4] Steinberg, M. S.; Wainwright, C. L. (1993): Using Models to Teach Electricity – The CASTLE Project. In: *The Physics Teacher* 31 (6), S. 353–357.
- [5] Burde, J.-P.; Wilhelm, T.; Wiesner, H. (2014): Das Elektronengasmodell in der Sekundarstufe I. Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Frankfurt 2014. In: *PhyDid-B*. Online verfügbar unter <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/505/652>
- [6] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2015): Akzeptanzbefragung zum Elektronengasmodell. Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Wuppertal 2015. In: *PhyDid B*. Online verfügbar unter <http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/602/734>
- [7] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2017): Die Elektrizitätslehre mit dem Elektronengasmodell. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*.
- [8] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2018): Empirische Befunde zur Lernförderlichkeit des Elektronengasmodells. In: C. Maurer (Hrsg.): *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht – normative und empirische Dimensionen*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Regensburg 2017, Band 38, 2018, S. 122 – 125.
- [9] Reinmann, G. (2005): Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research Ansatz. In: *Unterrichtswissenschaft* 33 (1), S. 52–69.
- [10] Burde, J.-P.; Wilhelm, T. (2018): Hilft die Wasserkreislaufanalogie? In: Wilhelm, T. (Hrsg.): *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen*, Aulis/Friedrich, Seelze, S.100-104.
- [11] Schwedes, H.; Dudeck, W.-G.; Seibel, C. (1995): Elektrizitätslehre mit Wassermodellen. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 44 (2), S. 28–36.
- [12] Gleixner, C. (1998): *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potenzial*. Dissertation. LMU München.
- [13] Härtel, H. (2012): Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 61 (5), S. 17–24.
- [14] Wilhelm, T. (2018): Elektronen als Energieträger? In: Wilhelm, T. (Hrsg.): *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht. Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen*, Aulis/Friedrich, Seelze, S.96-99.
- [15] Bereiter, C. (2002): Design Research for Sustained Innovation. In: *Cognitive Studies* 9 (3), S. 321–327.
- [16] Labudde, P. (2001): Chancen für den Physikunterricht in der heutigen Zeit. Zehn Thesen zur physikalischen Bildung. In: *PLUS LUCIS* (2), S. 2–6.
- [17] Häußler, P.; Hoffmann, L. (1995): Physikunterricht – an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert. In: *Unterrichtswissenschaft* 23 (2), S. 107–126.
- [18] Berger, R. (2002): Einfluss kontextorientierten Physikunterrichts auf Interesse und Leistung in der Sekundarstufe II. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* (8), S. 119–132.
- [19] Lubben, F.; Bennett, J.; Hogarth, S.; Robinson, A. (2005): A systematic review of the effects of context-based and Science-Technology-Society (STS) approaches in the teaching of secondary science on boys and girls, and on lower-ability pupils. Review. University of London, London. Institute of Education.
- [20] Wilhelm, T.; Burde, J.-P.; Spatz, V.; Haagen-Schützenhöfer, C.; Hopf, M. (2018): Elektronengasmodell und Kontextorientierung - ein nationales Projekt. In: C. Maurer (Hrsg.): *Qualitätsvoller Chemie- und Physikunterricht - normative und empirische Dimensionen*, Bd. 38. Jahrestagung in Regensburg 2017. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Münster: Lit-Verlag.