

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „MNU-Journal“ wurden mit expliziter Genehmigung des Verlages Klaus Seeberger auf die Webseite www.thomas-wilhelm.net gestellt.
Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Zeitschriftenartikels ist:

WILHELM, T.; WEATHERBY, T.; BURDE, J.-P.

Eine Simulation zum elektrischen Potenzial bei einfachen Stromkreisen

MNU-Journal 75, Heft 6, 2021, S. 483 - 487



Eine Simulation zum elektrischen Potenzial bei einfachen Stromkreisen

THOMAS WILHELM – THOMAS WEATHERBY – JAN-PHILIPP BURDE

Verschiedene Unterrichtskonzeptionen gehen bei der Behandlung einfacher Stromkreise in der Sek. I vom elektrischen Potenzial aus, um die Spannung als eigenständige Größe unabhängig von der Stromstärke einzuführen. In dem Beitrag wird eine kostenfreie webbasierte Simulation vorgestellt, die dafür geeignet ist. Damit die Simulation mit den unterschiedlichsten Unterrichtskonzeptionen eingesetzt werden kann, werden mit einer Farbdarstellung und einer Höhendarstellung zwei verschiedene Repräsentationen angeboten.

1 Notwendigkeit des Potenzials

Die Einführung in das Unterrichtsthema „einfache elektrische Stromkreise“ in der Sekundarstufe I kann man, wie jedes andere Thema auch, sehr unterschiedlich mit verschiedenen Sachstrukturen unterrichten (WILHELM, SCHECKER & HOPF, 2021). Gerade zu elektrischen Stromkreisen wurden bereits besonders viele Unterrichtskonzeptionen entwickelt und erprobt (BURDE & WILHELM, 2021b), die z.B. unterschiedliche Analogien nutzen (BURDE & WILHELM, 2017). Bis Anfang des 20. Jahrhunderts fand die Einführung in die Elektrizitätslehre meist über die Elektrostatik und das elektrische Potential statt. Ohne dass man dafür didaktische Gründe kennt, hat sich der Fokus dann zunehmend zu einer vertieften Auseinandersetzung mit dem Strombegriff verschoben, der heute in der Regel den Unterricht dominiert (GLEIXNER, 1998). Dies führt jedoch zu einem „übermächtigen Strombegriff“ bei den Lernenden (RHÖNECK, 1986). Außerdem entwickeln sie kein unabhängiges Spannungskonzept, sondern sehen die Spannung nur als eine Eigenschaft des elektrischen Stroms (RHÖNECK, 1981). Liegt der Schwerpunkt des Unterrichts auf einer mathematischen Auseinandersetzung mit der Formel $U = R \cdot I$, ist zu befürchten, dass Lernende in ihrer Fehlvorstellung bestärkt werden, die Spannung sei eine Eigenschaft des Stroms, da beide Größen immer nur gemeinsam auftreten (MUCKENFUSS & WALZ, 1997). Die Spannung bezieht sich in Gleichstromkreisen als Potenzialdifferenz stets auf zwei Punkte

in einem Stromkreis. Ohne eine Einführung des elektrischen Potenzials, das einem Leiterstück zugeordnet werden kann, ist es damit wenig überraschend, dass Lernende kein angemessenes Verständnis der elektrischen Spannung als Differenzgröße entwickeln. Viele physikdidaktische Unterrichtskonzeptionen behandeln deshalb das Potenzial bereits in der Sekundarstufe I und führen die Spannung als Potenzialdifferenz ein (BURDE & WILHELM, 2021b).

Es gab bereits verschiedene Vorschläge, wie man das Potenzial veranschaulichen kann, wobei die meisten mit erheblichem Aufwand verbunden sind. Zu nennen sind hier z.B. Steigrohre über einem ebenen geschlossenen Wasserkreislauf (SCHWEDES, DUDECK & SEIBEL, 1995), Stäbchen an jedem Bauteil (GLEIXNER, 1998, KOLLER, 2008) oder eine 3D-gedruckte Anordnung (Bodensiek et al., 2019). Unschön an all diesen manuellen Aufbauten ist jedoch, dass man nicht schnell ausprobieren kann, was sich ändert, wenn man z.B. einen Widerstand verändert, herausnimmt oder zusätzlich einbaut. Um viele verschiedene Schaltungen unkompliziert und schnell untersuchen zu können, ist eine Simulation sinnvoll, bei der man sofort sieht, was eine Änderung im Stromkreis bewirkt. Zudem sind hier weitere Darstellungen möglich. Die Simulation, die hier vorgestellt wird, kann das Potenzial als Farbe oder als Höhe darstellen und zudem die Stromstärke als Pfeil. Wird z.B. wie in Abbildung 1 das Potenzial farblich eingezeichnet, ist sofort zu erkennen, dass an zwei Widerständen keine Spannung anliegt.

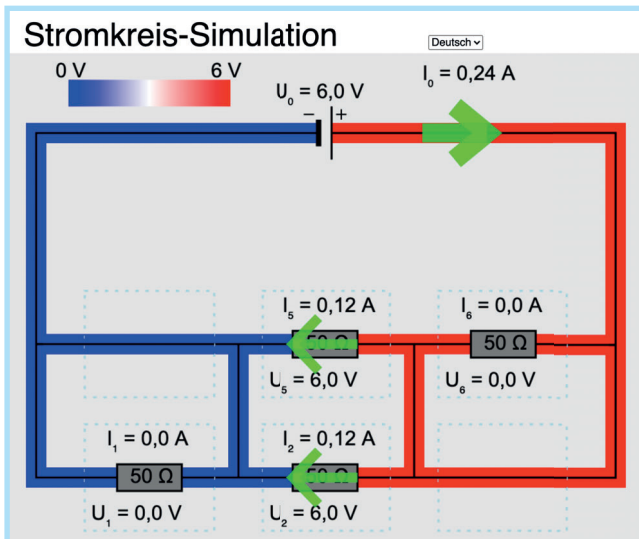


Abb. 1. Durch die Farbmarkierung des Potentials wird ersichtlich, an welchen Widerständen keine Spannung anliegt.

2 Grundeinstellungen der Simulation

Die Stromkreis-Simulation (WEATHERBY et al., 2020; WEATHERBY et al., 2021), die man unter http://www.thomas-weatherby.com/simulation_de.html findet, ist eine HTML5-JavaScript-Simulation, die in praktisch jedem Browser auf jedem Betriebssystem läuft.

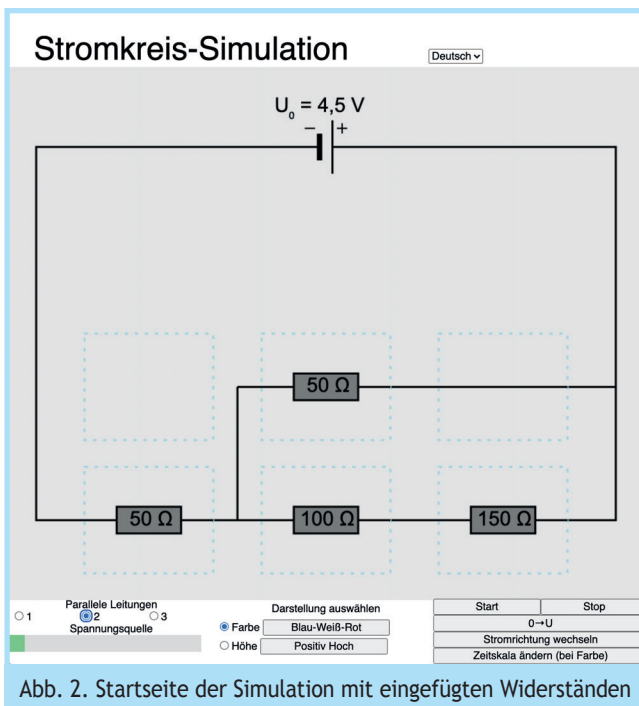


Abb. 2. Startseite der Simulation mit eingefügten Widerständen

Zunächst baut sich der Nutzer per Mausklick auf der Startseite die Schaltung so auf, wie er sie haben möchte, wobei noch keine Potentiale und Stromstärken angezeigt werden. Hierbei wird eingestellt, ob ein, zwei oder drei Zweige parallel geschaltet sein sollen. Bei ein oder zwei parallelen Leitungen erschei-

nen pro Zweig drei kurzgeschlossene Steckplätze (blau gestrichelt umrandet), die man durch Anklicken öffnen kann oder mit einem Widerstand à 50 Ω, 100 Ω oder 150 Ω bestücken kann (Abb. 2).

Einzelne Leiterstücke können durch Anklicken entfernt werden. Wählt man drei parallele Zweige, kann lediglich ein Widerstand vor und einer nach der Parallelschaltung eingefügt werden.

Damit sind fast alle Anordnungskombinationen möglich, die in der Sekundarstufe I auftreten können. Insbesondere können sowohl offene als auch geschlossene Stromkreise betrachtet werden. Wenn die Schaltung fertig ist, entscheidet man sich noch für die Farb- oder die Höhendarstellung und ihre speziellen Einstellungen und klickt auf „Start“. Dann bekommt man entweder die Information „Kurzschluss“ oder es werden die Potentiale und die Stromstärken angezeigt. Durch das Anklicken des Buttons „Stopp“ kommt man wieder zurück zur Oberfläche, auf der man die Schaltung erneut ändern kann.

3 Die Farbdarstellung des Potentials

Bei der Farbdarstellung werden die Leitungen farbig umrandet. Unabhängig von der gewählten Klemmspannung der Batterie wird das Potenzial an den Polen mit kräftigen Farben markiert. Für Zwischenwerte werden verschiedene blässere Blautöne, Weiß und verschiedenen blasse Rottöne verwendet (Abb. 3). An den Steckplätzen für die Widerstände wird zusätzlich die jeweilige Spannung angegeben. Hat man ein Leiterstück erzeugt, das keine Verbindung mit dem Stromkreis hat und somit über kein definiertes Potenzial verfügt, wird dieses Leiterstück orange eingefärbt.

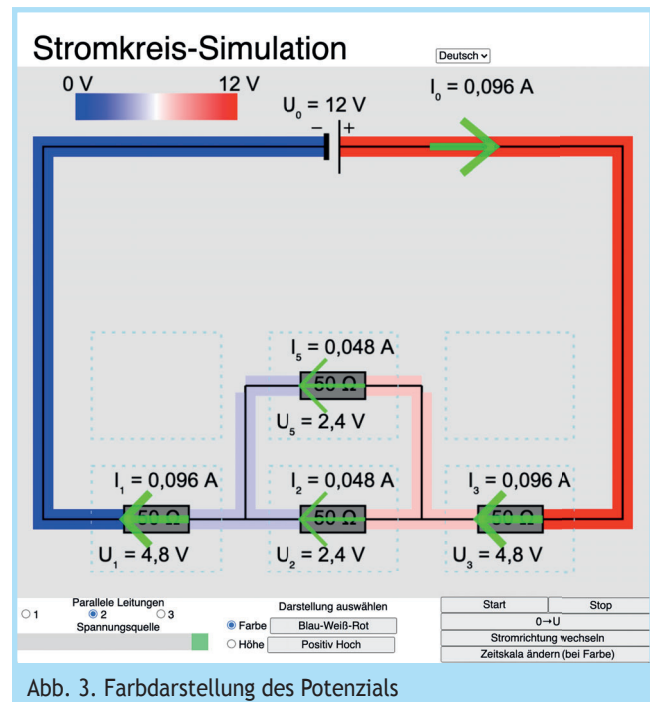


Abb. 3. Farbdarstellung des Potentials

Die Farbdarstellung hilft Lernenden, die Schaltung ausgehend von Potentialunterschieden zu analysieren und sich daran

anknüpfend die Stromstärken zu überlegen (BURDE, 2019). Dieses Vorgehen kann auch genutzt werden, wenn Schaltungen auf Papier gedruckt oder gezeichnet sind, um zunächst das elektrische Potenzial mit Farbstiften einzuzuzeichnen. Ergeben sich an einem Widerstand rechts und links gleiche Farben, wird deutlich, dass an dem Widerstand keine Spannung anliegt und durch ihn kein Strom fließt. Haben mehrere Widerstände alle rechts die gleiche Farbe und alle links die gleiche Farbe, liegt an ihnen die gleiche Spannung an. So kann im Unterricht der Begriff „Parallelschaltung“ eingeführt werden (BURDE & WILHELM, 2015).

In der Starteinstellung ist die übliche Farbzuordnung voreingestellt mit Rot am Pluspol und Blau am Minuspol. Verwendet man aber eine Unterrichtskonzeption, bei der das Potenzial über die Elektronendichte oder über den Elektronengasdruck eingeführt wird (BURDE & WILHELM, 2021a), kann man die Farbdarstellung mit dem Button „Blau-Weiß-Rot“ umdrehen, so dass man bei Minus das Rot für hohe Werte (= eine hohe Elektronendichte) hat und bei Plus das Blau für niedrige Werte (= eine niedrige Elektronendichte). Vermutlich kommen die klassischen Farben daher, dass man früher von positiven bewegten Ladungen ausging und am Pluspol mehr und am Minuspol weniger davon erwartet hatte, denn in unserem Alltag, vor allem bei der Temperatur, steht Rot für große und Blau für kleine Werte.

Solange keine Stelle eines realen Stromkreises geerdet ist, sind dort keine absoluten Werte des Potentials definiert. Fachlich ist bekannt, dass man jeden beliebigen Punkt einer Schaltung erden kann, ohne dass sich dadurch bei den Spannungen und Stromstärken etwas ändert. In der Sekundarstufe I ist aber eine Erdung nicht üblich. Da man in der Simulation ein Potenzial angeben will, muss man von einer Erdung ausgehen, auch wenn diese nicht thematisiert wird. Standardmäßig sagt die Farbskala links oben, dass am Minuspol das Potenzial 0 V liegt und am Pluspol der eingestellte Maximalwert U , was einer Erdung des Minuspols gleichkommt. Ändert man dies über den Button „0 → U “, dann wird die Mitte auf 0 V gesetzt: am Minuspol ist dann das Potenzial $-\frac{1}{2} U$ und am Pluspol das Potenzial $+\frac{1}{2} U$.

Auf diese Weise ist die Simulation in unterschiedlichen Unterrichtskonzeptionen einsetzbar. Je nach verwendeter Analogie steht die Farbe für den Wert des Wasserdruckes (ebener geschlossener Wasserkreislauf), den Wert des Luftdruckes oder Elektronendruckes (Frankfurter Elektronengasmodell, www.einfache-elehre.de), die Höhe (offener Wasserkreis, Stäbchenmodell), die Zugspannung (Fahrradkettenmodell) oder die Temperatur (Wärmeleitungsmodell).

Eine Besonderheit ist noch die Funktion des Buttons „Zeitskala ändern (bei Farbe)“. In Wirklichkeit haben Leitungen auch eine gewisse Kapazität und deshalb dauert es bei einer Reihenschaltung von Widerständen etwas, bis sich die entsprechenden Potentiale zwischen verschiedenen Widerständen eingestellt haben (z.B. drei gleiche Widerstände in Reihe oder zwei unterschiedliche Widerstände in Reihe). Wählt man über diesen Button die Zeitlupe, sieht man an den Farben, wie sich die Potentiale langsam einstellen. Damit und mit Hilfe der Modellvorstellung des elektrischen Drucks kann man bei einer Reihenschaltung die an den Widerständen anliegende Spannung nachvollziehbar machen (BURDE & WILHELM, 2015).

4 Die Höhendarstellung des Potentials

Startet man die Höhendarstellung, entsteht aus der Schaltskizze eine räumliche Darstellung der Schaltung. Damit man sich das gut vorstellen kann, wird die Schaltung langsam gedreht, so dass man am Ende von schräg oben über die Ecke darauf schaut. Das Potenzial wird durch halbtransparente grüne Wände dargestellt, die langsam aus der Fläche herauswachsen und damit die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Die Oberkante, in deren Höhe die entscheidende Information steckt, wird dunkelgrün hervorgehoben, und vor und nach jedem Widerstand werden senkrechte Linien bis zur Oberkante gestrichelt eingezeichnet (Abb. 4). Dies hilft, besser zu erkennen, wo das Potenzial konstant ist und wo es abnimmt.

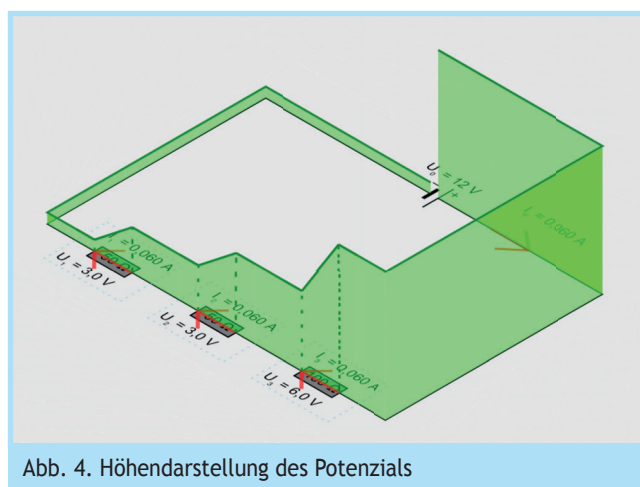


Abb. 4. Höhendarstellung des Potentials

Hat man im Unterricht das Höhenmodell von GROB et al. (1988) verwendet, bei dem Teilchen (oder Schüler/innen) über ein Förderband auf ein höheres Niveau befördert werden, von wo aus sie wieder herunterrutschen können, wird man vor allem die Oberkante als die Fläche betonen, auf der die Bewegung stattfindet. Unterrichtet man nach dem Münchner Stäbchenmodell (GLEIXNER, 1998, KOLLER, 2008) wird man besonders die senkrechten gestrichelten Linien hervorheben. Verwendet man dagegen ein Mauermodell (BIERWIRTH, 2014), findet man dieses in den grünen Wänden wieder.

5 Die Darstellung der Stromstärke

Der elektrische Strom wird durch Pfeile dargestellt, deren Dicke für die Stromstärke steht. Damit sie sich gut vom Potenzial unterscheiden, werden sie bei der Farbdarstellung grün und bei der Höhendarstellung rot eingezeichnet (Abb. 4 und Abb. 5). Zusätzlich wird jeweils die Stromstärke neben den Pfeil geschrieben, wobei jeweils auf zwei signifikante Stellen gerundet wird.

In der Starteinstellung ist die technische Stromrichtung eingezeichnet, also die Richtung des Stromdichtevektors, was der Bewegungsrichtung von positiven Ladungsträgern entspricht. Diese Richtung wurde auch lange ausschließlich im Physikunterricht betrachtet. In manchen heutigen Schulbüchern (z.B.

Spektrum Physik und Duden Physik) wird dagegen die physikalische Stromrichtung eingezeichnet, also die Bewegungsrichtung der Elektronen im Metall. Deshalb kann man in der Simulation umschalten, welche Stromrichtung angezeigt werden soll.

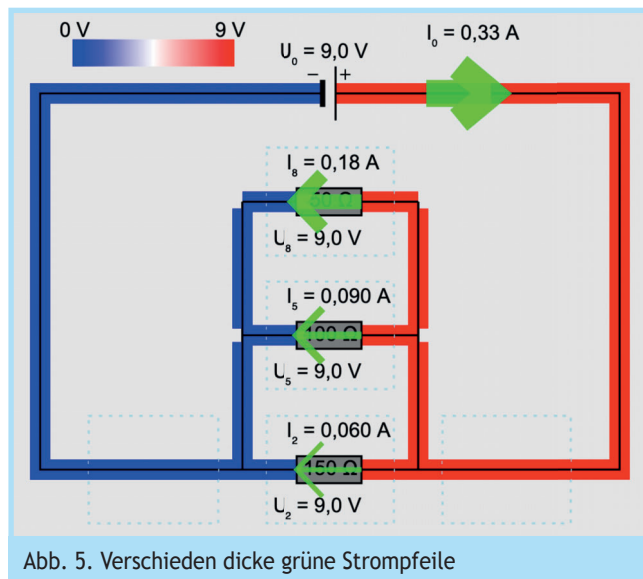


Abb. 5. Verschieden dicke grüne Strompfeile

Bei der Höhendarstellung möchte man vermutlich immer die intuitive Darstellung, dass der Strom bergab fließt. Deshalb muss man hier beim Wechseln der Stromrichtung über den Button „Positiv/ Negativ hoch“ auch ändern, ob am Plus- oder am Minuspol die größere Höhe eingezeichnet wird. So kann der Strom in den Widerständen immer abwärts fließen. Alternativ kann man bei entsprechender Auswahl auch von Ladungsträgern sprechen, die wie Heliumballone am Potenzial aufsteigen.

6 Fazit

Insgesamt liegt damit eine flexible Simulation vor, die man bei unterschiedlichsten Unterrichtskonzeptionen einsetzen kann. Hauptziel dabei ist, das Potenzial zu visualisieren, das aus Sicht der Autoren die erste und primäre Größe beim Unterrichten von Stromkreisen sein soll, damit ausgehend von Potenzialunterschieden und Widerständen auf Stromstärken geschlossen und nicht ausschließlich aus Sicht des elektrischen Stroms argumentiert wird (BURDE & WILHELM, 2021a). Wir laden die Leser/innen ein, die Simulation zu erproben und gegebenenfalls Probleme und Wünsche zurückzumelden.

Literatur

BIERWIRTH, R. (2014). *Untersuchung von Lernproblemen zum elektrischen Potential*, Master-Arbeit, Technische Universität Braunschweig.

BODENSIEK, O., SONNTAG, D. A., GLAWE, I. & MÜLLER, R. (2019). 3D-printable height models for dc circuits, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1286.

BURDE, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*, Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 259, Berlin: Logos, <http://doi.org/10.30819/4726> (1.5.2021).

BURDE, J.-P. & WILHELM, T. (2015). Mit elektrischem Druck die Spannung verstehen lernen, *Plus Lucis* 1/2015, https://www.pluslucis.org/ZeitschriftenArchiv/2015-1_PL.pdf (1.5.2021), 28–33.

BURDE, J.-P. & WILHELM, T. (2017). Modelle in der Elektrizitätslehre. Ein didaktischer Vergleich verbreiteter Stromkreismodelle, *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 28(157), 8–13.

BURDE, J.-P.; WILHELM, T. (2021a). Vom Luftdruck zur Spannung. Ein an Schülervorstellungen orientiertes Unterrichtskonzept zu einfachen Stromkreisen, *MNU-Journal*, 74(1), 34–40.

BURDE, J.-P. & WILHELM, T. (2021b). Unterrichtskonzeptionen zu einfachen Stromkreisen In: WILHELM, T.; SCHECKER, H.; HOPF, M. (Hg.): *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht*, Berlin, Heidelberg: Springer-Spektrum.

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

GROB, K.; RHÖNECK, C. v.; VÖLKER, B. & WETTERN, K. (1988). Die Gravitationsanalogie zur Einführung des Spannungsbegriffs, *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 36(31), Köln: Aulis Verlag Deubner & Co KG, 14–19.

KOLLER, D. (2008). *Entwurf und Erprobung eines Unterrichtskonzepts zur Einführung in die Elektrizitätslehre*. Zulassungsarbeit. LMU München.

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

RHÖNECK, C. v. (1981). Schüleräußerungen zum Begriff der elektrischen Spannung beim Erklären der Meßwerte am Schalter. *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik/Chemie*, 29(6), 10–15.

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

SCHWEDES, H., DUDECK, W.-G. & SEIBEL, C. (1995). Elektrizitätslehre mit Wassermodellen. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 44(2), 28–36.

WEATHERBY, T., WILHELM, T., BURDE, J.-P., KAPP, S., THESS, M., BEIL, F. & KUHN, J. (2020). iVoltage – Einsatz einer Simulation im E-Lehre-Praktikum, *PhyDid-B – Didaktik der Physik – DPG-Frühjahrstagung*, 369–373.

WEATHERBY, T., WILHELM, T., BURDE, J.-P., BEIL, F. KAPP, S., THESS, M. & KUHN, J. (2021). Repräsentationsbasierte Simulation zu einfachen Gleichstromkreisen. In HABIG, S. (Hg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung 2020, Band 41.

WILHELM, T., SCHECKER, H. & HOPF, M. (Hg.) (2021). *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht*, Berlin, Heidelberg: Springer-Spektrum.

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.

THOMAS WEATHERBY, weatherby@physik.uni-frankfurt.de, hat dem Bachelorstudium Physik an der University of Oxford ein Masterstudium in angewandter Physik an der TU München absolviert. Er promoviert nun in Frankfurt am Institut für Didaktik der Physik.

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. ■