

Modelle des einfachen Stromkreises in der Sekundarstufe I in Baden-Württemberg

Katharina Leibfarth, Benedikt Gottschlich, Jan-Philipp Burde

Eberhard Karls Universität Tübingen, AG Didaktik der Physik, Auf der Morgenstelle 14, 72076 Tübingen
katharina.leibfarth@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

Die einfachen Stromkreise stellen entgegen ihrer Bezeichnung ein schwieriges und unanschauliches Thema des Physikunterrichts dar. Die zugrundeliegenden physikalischen Größen in Stromkreisen sowie deren Zusammenhänge entziehen sich der direkten Wahrnehmung, sodass es naheliegt, diese mit Modellen bzw. Analogien zu veranschaulichen. Bislang ist jedoch kaum erhoben worden, welche Modelle im Anfangselektrizitätsunterricht der Sekundarstufe I überhaupt eingesetzt werden. Daher wurde anhand von Unterrichtstagebüchern, in denen Physiklehrkräfte ihren Unterricht dokumentierten, der Modelleinsatz von 17 Lehrkräften aus Baden-Württemberg analysiert. Dabei wurde untersucht, wie viele und welche Stromkreismodelle Lehrkräfte nutzen und für welche physikalischen Inhalte diese eingesetzt werden. Die Ergebnisse zeigen ein sehr heterogenes Bild des Modelleinsatzes: Zwar gaben alle Lehrkräfte an, in ihrem Unterricht Modelle des elektrischen Stromkreises zu nutzen; während manche Lehrkräfte jedoch lediglich ein Modell einsetzen, nutzen andere bis zu fünf Modelle in ihrem Unterricht. Weiterhin zeigt sich, dass das Modell eines Verkehrs- oder Menschenstroms, welches 71 % der Lehrkräfte einsetzen, das am häufigsten verwendete Modell darstellt, gefolgt vom ebenen geschlossenen Wasserkreislauf, der von knapp zwei Dritteln der teilnehmenden Lehrpersonen genutzt wird. Das Fahrradketten- oder das Elektronengasmodell werden hingegen kaum eingesetzt. Zur Art und Weise, wie Modelle im Unterricht zur einfachen Elektrizitätslehre Einsatz finden, lässt sich ein uneinheitliches Bild beobachten. Dies ist ein Befund, der auch auf gängige Schulbücher zutrifft.

1. Hintergrund und Motivation

Die Elektrizitätslehre stellt ein komplexes Thema des Physikunterrichts dar. Insbesondere zeigt sich, dass viele Schülerinnen und Schüler auch nach dem Unterricht noch große konzeptionelle Verständnisschwierigkeiten haben (Burde, 2018; von Rhöneck, 1986). Dabei sind diese Schwierigkeiten nicht auf Schülerinnen und Schüler in Deutschland beschränkt (Shipstone et al., 1988). Ein Grund für diese Verständnisschwierigkeiten wird in der Unanschaulichkeit der den elektrischen Stromkreisen zugrundeliegenden physikalischen Größen und Prozessen gesehen (Burde & Wilhelm, 2017). Um Schülerinnen und Schülern das Verständnis elektrischer Stromkreise vor diesem Hintergrund zu erleichtern, liegt es nahe, diese mit Modellen bzw. Analogien zu veranschaulichen (Burde & Wilhelm, 2017).

Nach Mikelskis-Seifert (2006, S. 128) kann ein Modell als Objekt bzw. Konstrukt beschrieben werden, das Analogien zu Größen, Eigenschaften und Beziehungen eines anderen Objekts aufweist. Das Modell als „Ausgangs- bzw. Modellbereich“ wird über eine Analogie mit dem „primären Lernbereich“ oder „Zielbereich“, beispielsweise dem elektrischen Stromkreis, verbunden. Die Analogie stellt somit eine partielle Isomorphie zwischen beiden Bereichen dar, wie in Abbildung 1 dargestellt. Neben analogen Größen und Beziehungen in Modell- und Zielbereich beinhaltet dies Größen und Beziehungen beider

Bereiche, die keine isomorphe Struktur aufweisen und somit Grenzen des Modells darstellen (Mikelskis-Seifert, 2006).

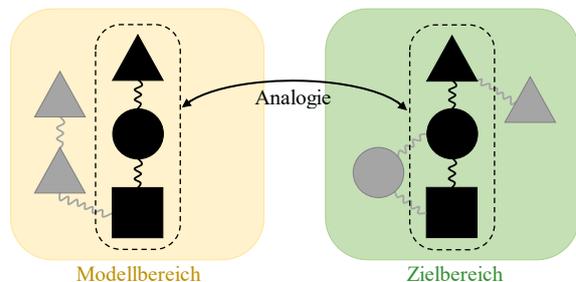


Abb. 1: Analogie zwischen Objekten und Beziehungen des Modell- und des Zielbereichs (in Anlehnung an Burde, 2018, S. 56)

1.1. Analogien der elektrischen Spannung

Ein Ausgangspunkt für die Betrachtung und Vermittlung der einfachen Stromkreise bildet das elektrische Potential. Im Gegensatz zur komplexeren, daraus resultierenden Differenzgröße der elektrischen Spannung bezieht sich das Potential auf einen Punkt im Raum, was eine Stärke des Potentialansatzes darstellt (Herrmann & Schmälzle, 1984; Gleixner, 1998; Burde, 2018).

Ausgehend von diesen Überlegungen besteht eine Möglichkeit, die schulischen Modelle zu klassifizieren in der Betrachtung der verwendeten analogen

Größe zum Potenzial bzw. zur elektrischen Spannung. So kann die Spannung beispielsweise als Wasser- bzw. Blutdruckdifferenz konzeptionalisiert werden, wie dies im ebenen geschlossenen Wasserkreislauf (Schwedes & Dudeck, 1993) bzw. Blutkreislaufmodell der Fall ist, oder auch als Luftdruckdifferenz wie im Elektronengasmodell (Burde, 2018). Eine andere Möglichkeit besteht in der Konzeptionalisierung der elektrischen Spannung als Höhendifferenz, wie man sie beispielsweise im offenen Wasserkreislaufmodell oder auch im Skilift-, Rutschen- und Stäbchenmodell sowie weiteren Höhenmodellen findet (Gleixner, 1998; Koller et al., 2008; Bodensiek et al., 2019; Burde & Gottschlich, 2022; Müller & Mandler, 2022). Eine dritte Möglichkeit der Konzeptionalisierung der Spannung als Potentialdifferenz ist im Fahrradkettenmodell über den Unterschied der Straffheit der Kette realisiert (Kahnt, 2022). Demgegenüber wählt das Rucksack-, Hütchen- oder auch Bienenmodell einen anderen Ansatz, die Spannung zu konzeptionalisieren: Die Vorstellung von Personen bzw. Bienen als Ladungsträgern, welche z. B. in ihren Rucksäcken Energieportionen transportieren, entspricht der Definition $U = \Delta E/q$ (Wilhelm, 2015). Im Modell des Menschenstroms kann die Kraft, mit welcher beispielsweise Schülerinnen und Schüler durch die Tür ins Klassenzimmer drücken, mit der elektrischen Spannung als Antrieb verknüpft werden (Gentner & Gentner, 1983).

1.2. Exemplarische Modellgrenzen

Während Modelle einerseits als Anschauungshilfen zum Verständnis beitragen können, weisen die Modelle und deren Analogien zum primären Lernbereich des elektrischen Stromkreises auch Grenzen auf. Ein Beispiel wird in der Darstellung des Energietransports im Rucksackmodell ersichtlich: Die Vorstellung von Personen als Ladungsträgern, die Energieportionen als Rucksackfüllungen von der Batterie bekommen und am Lämpchen abgeben, ist fachlich kritikwürdig (vgl. Härtel, 2012; Wodzinski, 2013; Wilhelm, 2015; Burde & Wilhelm, 2017). Ein weiteres Beispiel einer Modellgrenze ist die Unterbrechung des Stromkreises im Modell des Wasserkreislaufs mit Höhendifferenz. Wird der Kreislauf unterbrochen, ist davon auszugehen, dass das Wasser zunächst weiterhin nach unten fließt und der Wasserstrom erst zeitverzögert zum Erliegen kommt (Burde & Wilhelm, 2017).

Darüber hinaus ist eine physikalisch korrekte Analogie zwischen Ausgangs- und Zielbereich noch keine hinreichende Bedingung für einen hilfreichen Modelleinsatz: Während beispielsweise der ebene geschlossene Wasserkreislauf aufgrund seiner umfassenden Analogie zum elektrischen Stromkreis rein fachlich gesehen sehr weittragend ist, haben Lernende häufig Schwierigkeiten mit den Größen und Zusammenhängen innerhalb des Modells (Burde & Wilhelm, 2016; Schwedes & Schilling, 1983). Dies ist insofern problematisch, als dass ein fundiertes Verständnis des Ausgangsbereichs (hier des ebenen

geschlossenen Wasserkreislaufs) Voraussetzung für dessen lernwirksamen Einsatz ist (Schwedes & Dudeck, 1993). Das Problem beim ebenen, geschlossenen Wasserkreislauf besteht insbesondere darin, dass Lernende, sogar Hochschulabsolventinnen und -absolventen, häufig kein physikalisch korrektes Verständnis der Vorgänge in geschlossenen Wasserkreisläufen haben, z. B. mit Blick auf den Wasserdruck in ebenen geschlossenen Rohrsystemen (Schwedes, Dudeck & Seibel, 1995; Gentner & Gentner, 1983). Dabei weisen die Vorstellungen der Lernenden zum ebenen geschlossenen Wasserkreislauf viele Parallelen zu den Lernenden-Vorstellungen des elektrischen Stromkreises auf (Schwedes & Schilling, 1983). Liegt im Modellbereich jedoch kein ausreichendes Verständnis bei Lernenden vor, ist fraglich, inwiefern ein solches Modell das konzeptionelle Verständnis im Zielbereich fördern kann.

2. Fragestellung

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche Modelle des elektrischen Stromkreises in der unterrichtlichen Praxis eingesetzt werden. Konkret soll den folgenden Fragestellungen nachgegangen werden:

- I) Welche Stromkreismodelle nutzen Lehrkräfte im Unterricht?
- II) Für welche physikalischen Inhalte setzen Lehrkräfte die Modelle ein?
- III) Welche Modelle finden sich in Schulbüchern?

3. Methodik

3.1. Lehrkräfte

Die Untersuchung des traditionellen Unterrichts basiert auf der Analyse von Unterrichtstagebüchern. Im Rahmen des EPo-EKo-Projekts (Dopatka et al., 2018) dokumentierten 17 Lehrkräfte in Baden-Württemberg ihren traditionellen Anfangsunterricht der einfachen Elektrizitätslehre. Untersucht wurde der Unterricht, der vor allem im Schuljahr 2021/22, aber auch den angrenzenden Schulhalbjahren stattfand, anhand eines bereitgestellten Unterrichtstagebuchs. Der Fokus lag dabei auf den Schlüsselinhalt der einzelnen Stunden sowie den eingesetzten Modellen.

Die von den Lehrkräften angegebenen Modelle wurden einer Kategorisierung unterzogen, welche die nachfolgenden Modelle umfasst:

1. Fahrradkettenmodell
2. Stäbchen-/ Höhenmodell
3. offenes Wasserkreislaufmodell mit Höhenunterschied
4. ebenes geschlossenes Wasserkreislaufmodell
5. Elektronengasmodell
6. Rucksackmodell
7. Skilift-/ Rutschenmodell
8. Verkehrs-/ Menschenstrom

9. Blutkreislaufmodell

10. Luftstrom

Neben den Modellen geben die Unterrichtstagebücher Aufschluss über die physikalischen Konzepte, die die zentralen Inhalte der einzelnen Physikstunden darstellten.

3.2. Schulbücher

Für die Antwort auf die Frage, welche Stromkreismodelle in Schulbüchern eingesetzt werden, wurden die Kapitel zur Elektrizitätslehre der aktuellen Ausgaben der in Baden-Württemberg zugelassenen (Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung, 2022) analogen Schulbücher Dorn Bader Physik 7/8 Baden-Württemberg (Beckert et al., 2017), Fokus Physik 7/8 Baden-Württemberg (Burzin et al., 2016), Impulse Physik 7/8 Baden-Württemberg (Bredthauer et al., 2017), Spektrum Physik 7/8 Baden-Württemberg (Appel et al., 2017) und Universum Physik 7/8 Gymnasium Baden-Württemberg (Brand et al., 2016) untersucht.

4. Ergebnisse

4.1. Lehrkräfte

Die Unterrichtseinheiten zu einfachen Stromkreisen umfassten durchschnittlich 24.1 Schulstunden ($SD = 7.1$). Die Schülerinnen und Schüler der untersuchten 8. (und einer 9.) Klassen, die von durchschnittlich 23.8 Schülerinnen und Schülern ($SD = 3.2$) besucht wurden, wurden zum ersten Mal zur Elektrizitätslehre unterrichtet.

Alle unterrichtenden Lehrkräfte setzten in ihrem Unterricht mindestens ein Stromkreismodell ein. Die Anzahl der verwendeten Modelle variiert zwischen einem und fünf, wobei im Durchschnitt 2.7 ($SD = 1.0$) verschiedene Modelle zum Einsatz

kamen. Beim Einsatz mehrerer Modelle in der gesamten Unterrichtseinheit ist keine Kombinationsstruktur lehrkräfteübergreifend erkennbar.

In Hinblick auf die Inhalte des elektrischen Stroms und der elektrischen Spannung, welche von allen untersuchten Lehrkräften unterrichtet werden, zeigt sich, dass 77.8 % der Lehrpersonen zuerst den elektrischen Strom und anschließend die elektrische Spannung einführen. 16.7 % wählen die umgekehrte Reihenfolge, während eine Person beide Größen gemeinsam einführt. Außerdem thematisiert über die Hälfte der Lehrkräfte (55.6 %) das elektrische Potential, was im Kontrast zu früheren Arbeiten (Herrmann & Schmälzle, 1984; Schubatzky, 2020) einen nennenswerten Anteil darstellt.

4.1.1. Modelleinsatz nach Lehrkräften

In Bezug auf die Fragestellung, welche Stromkreismodelle Lehrkräfte im Unterricht nutzen (I), zeigt Abbildung 2 die prozentualen Anteile der Lehrkräfte, die das jeweilige Stromkreismodell im Unterricht in mindestens einer Unterrichtsstunde einsetzten. Die Analogie zu einem Verkehrs- oder Menschenstrom stellt mit 70.6 % das von den meisten Lehrpersonen genutzte Modell dar. Weiter nutzen mit 62.7 % annähernd zwei Drittel der Lehrkräfte das ebene geschlossene Wasserkreislaufmodell, über die Hälfte (54.9 %) verwendet in ihrem Unterricht das offene Wasserkreislaufmodell mit Höhendifferenz. Das Rucksackmodell wird von circa einem Viertel der Lehrkräfte (23.5 %) genutzt, während 17.6 % das Stäbchenmodell bzw. ein sonstiges Höhenmodell nennen. Zudem verwenden 11.8 % der Lehrkräfte das Luftstrom-, Elektronengasmodell, Blutkreislauf- und Elektronengasmodell, was jeweils zwei Personen entspricht. Das Skilift- und Fahrradkettenmodell wird von je einer Person (5.9 %) verwendet.

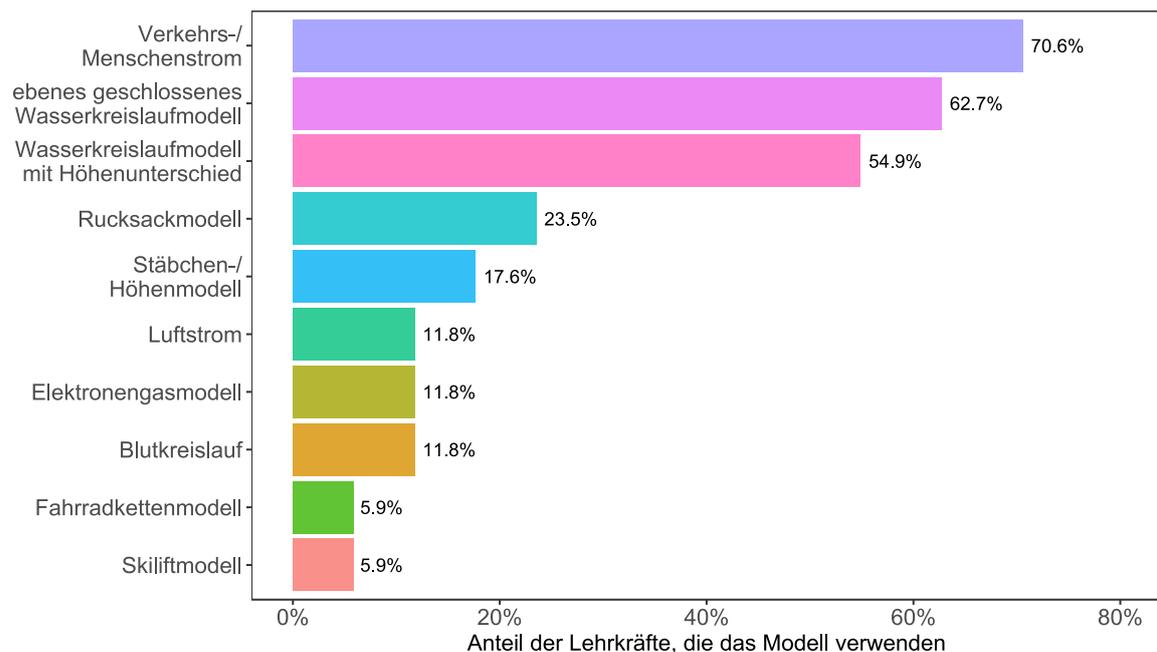


Abb. 2: Prozentuale Anteile der Lehrkräfte, die die verschiedenen Stromkreismodelle einsetzten (Mehrfachnennung möglich)

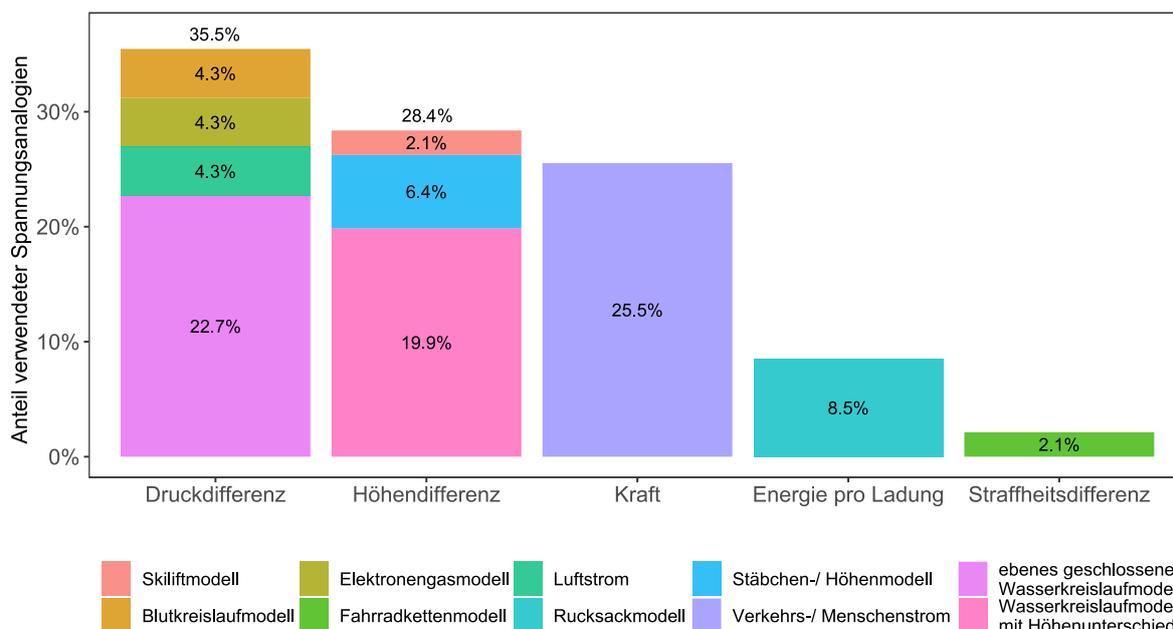


Abb. 3: Prozentuale Anteile der von den Lehrkräften eingesetzten Stromkreismodelle, kategorisiert nach verwendeter Analogie zur elektrischen Spannung

verwendet. Vier der Lehrpersonen, aus deren Unterrichtstagebüchern nicht eindeutig hervorging, welches Wasserkreislaufmodell sie verwendeten, wurden gemäß dem Verhältnis, in welchem die beiden Wasserkreislaufmodelle in den weiteren Daten vorkamen, auf den ebenen geschlossenen und den Wasserkreislauf mit Höhenunterschied aufgeteilt.

4.1.2. Modelleinsatz nach Spannungsanalogie

Im Folgenden werden die betrachteten Modelle danach klassifiziert, welche Spannungsanalogie ihnen zugrunde liegt. Dabei werden das Skiliftmodell, das Stäbchenmodell und das Wasserkreislaufmodell mit Höhenunterschied über die Darstellung der Spannung als Höhendifferenz zusammengefasst, während das Elektronengas- und Luftdruckmodell, der ebene geschlossene Wasserkreislauf sowie die Analogie zum Blutkreislauf und zum Luftstrom die Spannung als Druckdifferenz konzeptionalisieren. Abbildung 3 zeigt die Anteile der den verschiedenen Stromkreismodellen zugrundeliegenden Analogien. Die am häufigsten auftretende Spannungsanalogie ist mit 35.5% die Druckdifferenz, gefolgt von der Spannung als Höhendifferenz mit 28.4%.

4.1.3. Modelleinsatz nach physikalischen Inhalten

Neben der Frage, welche Modelle die Lehrkräfte in ihrem Unterricht verwenden, ist auch von Interesse, für welche physikalischen Inhalte diese eingesetzt werden (II). Bei den am häufigsten verwendeten Modellen, den beiden Wasserkreislaufmodellen sowie dem Verkehrs- bzw. Menschenstrom, sind in Hinblick auf die Grundgrößen Stromstärke und Spannung Unterschiede erkennbar.

Das Modell des Verkehrs- bzw. Menschenstroms wird von den Lehrkräften vor allem eingesetzt, um den elektrischen Strom zu veranschaulichen, wie in

Abbildung 4 dargestellt. Hingegen wird dieses Modell nicht zur Thematisierung der elektrischen Spannung oder des Potentials genutzt.

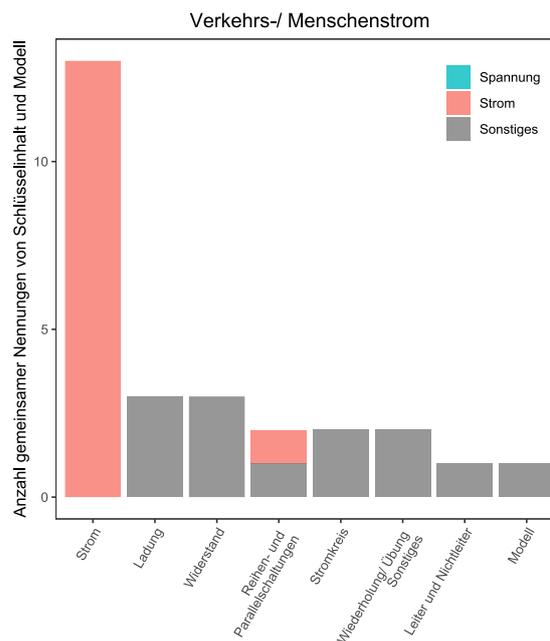


Abb. 4: Anzahl gemeinsamer Nennungen der Schlüsselinhalte der Unterrichtsstunde mit dem Verkehrs-/ Menschenstrommodell mit farblicher Hervorhebung von Strom und Spannung

Der ebene geschlossene Wasserkreislauf wird am häufigsten dafür genutzt, um den Modellcharakter zu erläutern, d. h. das Modell als solches mit Vorteilen und Grenzen zu thematisieren. In Hinblick auf die Inhalte Strom und Potential(-differenz) findet das Modell tendenziell ähnlich häufig Anwendung: Das

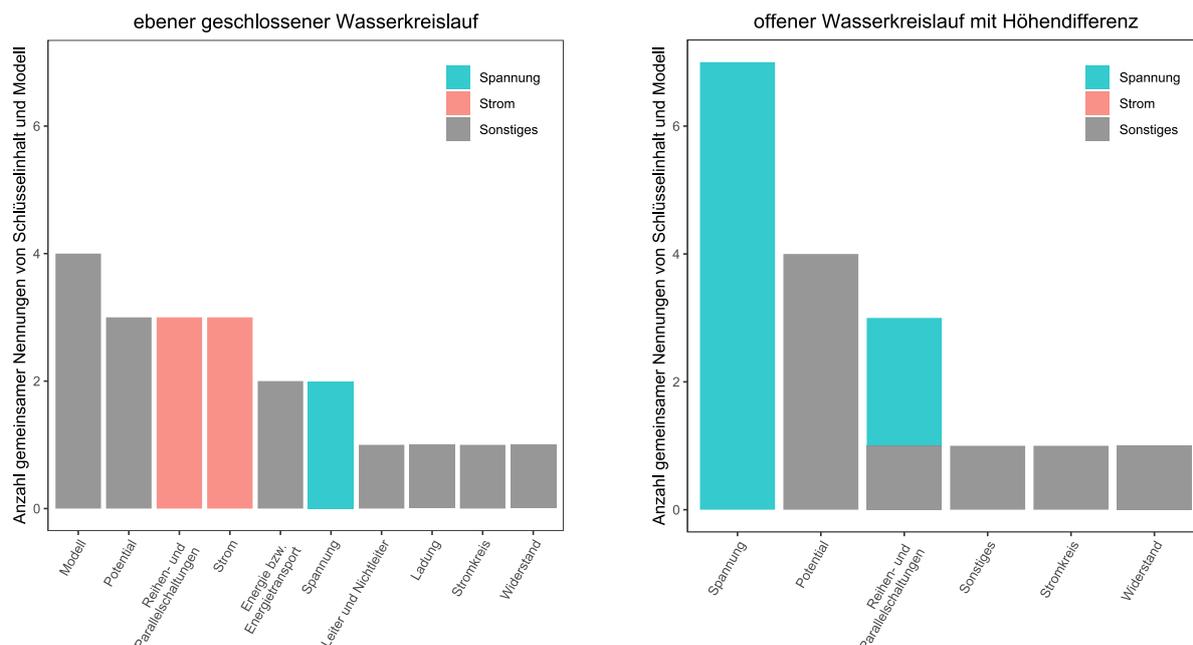


Abb. 5: Anzahl gemeinsamer Nennungen der Schlüsselinhalt der Unterrichtsstunden mit dem ebenen geschlossenen Wasserkreislauf bzw. dem offenen Wasserkreislauf mit Höhendifferenz mit farblicher Hervorhebung von Strom und Spannung

Modell wird dreimal in Kombination mit dem elektrischen Strom sowie dreimal für Parallel- und Reihenschaltungen eingesetzt. Bei den Schaltungen wurde jeweils der Bezug zur Stromstärke deutlich. Gleichzeitig wird von drei bzw. zwei Lehrpersonen das Modell gemeinsam mit dem Potential bzw. der Spannung genannt (vgl. Abbildung 5).

Das Wasserkreislaufmodell mit Höhendifferenz wird von den Lehrkräften nicht zur Vermittlung der Stromstärke genutzt, sondern um den Schülerinnen und Schülern das Konzept der elektrischen Spannung (7 Nennungen) bzw. des elektrischen Potentials (6 Nennungen) näher zu bringen. Dies gilt auch für Reihen- und Parallelschaltungen, sofern diese mit Hilfe des Wasserkreislaufmodells mit Höhendifferenz unterrichtet wurden (vgl. Abbildung 5).

Insgesamt zeigt der Vergleich beider Wasserkreisläufe in Bezug auf die Größen Stromstärke und Spannung die Tendenz, dass der Wasserkreislauf mit Höhenunterschied eher für die Spannung und der ebene geschlossene Wasserkreislauf sowohl für die Spannung als auch den Strom genutzt wird, wobei auf die geringe Anzahl der Nennungen insgesamt hingewiesen sei.

4.2. Schulbücher

Eine Übersicht der Stromkreismodelle, die sich in den Schulbüchern wiederfinden, ist in Tabelle 1 dargestellt. Die analysierten Schulbücher unterscheiden sich sowohl bei der Anzahl als auch der Auswahl der Stromkreismodelle stark. Beispielsweise nutzt Fokus ausschließlich das Fahrradkettenmodell und setzt dieses für verschiedene physikalische Inhalte ein, während in den anderen Schulbüchern jeweils mehrere

Modelle zum Einsatz kommen. Das heterogene Bild des Modelleinsatzes wird in der Anzahl der genutzten Modelle und der Art und Weise des Modelleinsatzes in den unterschiedlichen Werken fortgeführt.

Ein Zusammenhang zwischen den von den Lehrkräften genutzten Schulbüchern und den im Unterricht verwendeten Modellen zeigte sich im Rahmen der Auswertung der Daten hingegen nicht.

5. Diskussion

Eine ähnliche Untersuchung mit Lehrkräften in Bayern, Hessen und Österreich zeigt ebenfalls Unterschiede im Modelleinsatz (Schubatzky, 2020). Dabei setzten 78 % der Lehrpersonen in ihrem Unterricht mindestens ein Stromkreismodell ein, wobei durchschnittlich 1.4 Modelle eingesetzt wurden. Während es auch Lehrkräfte gab, die in ihrem Unterricht kein einziges Modell nutzten, verwendeten manche Lehrkräfte bis zu vier unterschiedliche Modelle (Schubatzky, 2020). Dabei ist das Modell des ebenen geschlossenen Wasserkreislaufs, das ähnlich häufig wie bei den beschriebenen Lehrkräften Baden-Württembergs Einsatz findet, dominierend (Schubatzky et al., 2020).

In den vorliegenden Unterrichtstagebüchern stellt die Einführung des elektrischen Stroms vor der Spannung, die sich ebenfalls in allen betrachteten Schulbüchern wiederfindet, den vielfach präferierten Weg dar. Hingegen werden in der Untersuchung Schubatzkys (2020) die drei Möglichkeiten Strom vor Spannung, Spannung vor Strom und die gemeinsame Einführung beider Größen von den Lehrpersonen ähnlich häufig gewählt.

Tab.1: Stromkreismodelle in den Schulbüchern

		Schulbuch				
		Dorn Bader	Univer- sum	Fokus	Spektrum	Impulse
Stromkreismodell	Verkehrs-/ Menschenstrom	✓	✓			✓
	Ebener geschlossener Wasserkreislauf	✓*	✓		✓	✓**
	Wasserkreislauf mit Höhendifferenz		✓		✓	
	Höhenmodell		✓			
	Fahrradkettenmodell			✓	✓	✓
	Rutschenmodell	✓				

* zusätzlich ebener geschlossener Wasserkreislauf mit Doppelwassersäule

** zugrundeliegende Analogie uneindeutig, d.h. Mischung von Höhen- und Druckanalogie

Da der Stichprobenumfang von 17 Lehrpersonen relativ gering ist, stellt die Analyse lediglich einen deskriptiven Einblick in den Modelleinsatz der Lehrkräfte in Baden-Württemberg dar.

6. Ausblick

Insgesamt spiegelt der Einsatz von Modellen des elektrischen Stromkreises im Anfangslehreunterricht ein sehr heterogenes Bild in der Modellauswahl, deren Anzahl sowie deren Anwendung wider. Dieses uneinheitliche Bild wird durch den häufigen Einsatz des ebenen geschlossenen Wasserkreislaufs, der aus fachdidaktischer Sicht kritikwürdig ist, ergänzt. Demgegenüber haben sich in bisherigen physikdidaktischen Arbeiten Höhenmodelle, das Fahrradketten- und Elektronengasmodell bewährt. Gleichzeitig wurden die verschiedenen Stromkreismodelle bisher kaum empirisch miteinander verglichen (Hindrisken et al., 2023). Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, inwieweit diese Modelle gleichermaßen geeignet sind bzw. inwiefern sich diese Modelle darin unterscheiden, die Lernenden beim Aufbau eines physikalisch korrekten Konzeptverständnisses zu unterstützen. In einem nächsten Schritt sollen daher mit Hilfe von Lernendenbefragungen das Konzeptverständnis sowie Verständnisschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler zu den verschiedenen Modellen des elektrischen Stromkreises genauer untersucht werden.

7. Literatur

- Appel, Thomas, Bühler, Bernd, Kastner, R., May, L.-P., Mandler, J., Petersen, B., & Wolf, T. (2017). *Spektrum Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Schroedel Westermann.
- Becker, M., Burak, D., Drehmann, P., Gleixner, C., Nürnberger, M., Pippig, R., & Runge, B.-U. (2017). *Dorn.Bader Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Schroedel Westermann.
- Bodensiek, O., Sonntag, D. A., Glawe, I., & Müller, R. (2019). 3D-printable height models for dc circuits. *Journal of Physics: Conference Series*, 1286(1), 012010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1286/1/012010>
- Brand, R., Kasper, L., Kienle, R., Küblbeck, J., Rager, B., Ronellenfisch, S., Pardall, C.-J., & Wienbruch, U. (2016). *Universum Physik 7/8 Gymnasium Baden-Württemberg*. Cornelsen Verlag.
- Bredthauer, W., Bruns, K. G., Burmeister, O., Donat, M., Eberhard, D., Fechtig, O., Feldmann, C., Grote, M., Janzen, U., Jordan, W., Kleischmann, J., Kohl, R., Köhnck, H., Märkl, P., Riekert, M., Schell, N., Schlobinski-Voigt, U., Stötzer, S., Wächter, C., ... Zimmerschied, F. (2017). *Impulse Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Ernst Klett Verlag.
- Burde, J.-P. (2018). *Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/4726>
- Burde, J.-P., & Gottschlich, B. (2022). Höhenmodelle mit Stromanalogon—Lernhilfe oder Lernhindernis? *MNU-Journal*, 75(4), 332–338.
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2016). Moment mal ... (22): Hilft die Wasserkreislaufanalogie? *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 65(1), 46–49.
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2017). Modelle in der Elektrizitätslehre. Ein didaktischer Vergleich verbreiteter Stromkreismodelle. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 28(157), 8–13.
- Burzin, S., Kahnt, M., Moussa, A., Müller, W., Nawrath, D., & Rutscher, C. (2016). *Fokus Physik 7/8 Baden-Württemberg*. Cornelsen Verlag.

- Dopatka, L., Spatz, V., Burde, J.-P., Wilhelm, T., Ivanjek, L., Hopf, M., Schubatzky, T. & Haagen-Schützenhöfer, C. (2018). Design-Based Research: Elektrizitätslehre mit Potenzial und Kontexten EPo-Eko. *PhyDidB - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydidb/article/view/852>
- Gentner, D., & Gentner, D. R. (1983). Flowing Waters or Teeming the Crowds: Mental Models of Electricity. In D. Gentner & A. L. Stevens (Hrsg.), *Mental models* (S. 99–129). Lawrence Erlbaum Associates Inc.
- Gleixner, C. (1998). *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potential: Untersuchungen zu Lernprozessen in der elementaren Elektrizitätslehre*. Ludwig-Maximilians-Universität.
- Härtel, H. (2012). Der alles andere als einfache elektrische Stromkreis. *Praxis der Naturwissenschaften Physik in der Schule*, 61(5), 17–24.
- Herrmann, F., & Schmälzle, P. (1984). Das elektrische Potential im Unterricht der Sekundarstufe I. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 37(8), 476–482.
- Hindrisken, A., Kahnt, M., & Berger, R. (2023). Lernwirksamkeit von Analogiemodellen zum elektrischen Potential. *PhyDidB – Didaktik der Physik – Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydidb/article/view/1340>
- Kahnt, M. (2022). Die Fahrradkette als durchgängige Vorstellungshilfe im Elektrizitätslehreunterricht der Sekundarstufe I. *plusLucis*, 2, 14–21.
- Koller, D., Waltner, C., & Wiesner, H. (2008). Zur Einführung von Stromstärke und Spannung. *Praxis der Naturwissenschaften-Physik in der Schule*, 57(6), 6–18.
- Mikelskis-Seifert, S. (2006). Modellmethode als epistemologisches und didaktisches Konzept. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physik-Didaktik: Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 120–138). Cornelsen Scriptor.
- Müller, R., & Mandler, J. (2022). Stromkreise besser verstehen mit Potenzial und Bikepark-Analogie. *plusLucis*, 2, 8–13.
- Schubatzky, T. (2020). *Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht: Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich: Bd. v. 299*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5159>
- Schubatzky, T., Haagen-Schützenhöfer, C., Burde, J.-P., Wilhelm, T., Ivanjek, L., Hopf, M., Dopatka, L., & Spatz, V. (2020). Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. In Sebastian Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 503–506).
- Schwedes, H., & Dudeck, W.-G. (1993). Lernen mit der Wasseranalogie: Eine Einführung in die elementare Elektrizitätslehre. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 4(16), 16–23.
- Schwedes, H., Dudeck, W.-G., & Seibel, C. (1995). Elektrizitätslehre mit Wassermodellen: Erfahrungen mit analogie-orientiertem Unterricht—Motto: „Im Wasser war’s einfacher, da sieht man das doch“. *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 44(2), 28–36.
- Schwedes, H., & Schilling, P. (1983). Schülervorstellungen zu Wasserstromkreisen. *physica didactica*, 10(3/4), 172–183.
- Shiptone, D. M., von Rhöneck, C., Jung, W., Kärrqvist, C., Dupin, J.-J., Johsua, S., & Licht, P. (1988). A study of students’ understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10(3), 303–316. <https://doi.org/10.1080/0950069880100306>
- von Rhöneck, C. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 34(13), 10–14.
- Wilhelm, T. (2015). Moment mal ... (18): Elektronen als Energieträger? *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, 64(6), 47–49.
- Wodzinski, R. (2013). Lernhilfe oder Lernhinderer?: Modelle von Leitungsvorgängen in Stromkreisen unter der Lupe. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 23(133), 12–16.
- Zentrum für Schulqualität und Lehrerbildung. (2022). *Liste der zugelassenen Schulbücher Allgemein bildendes Gymnasium: Zulassungen auf der Basis des Bildungsplans 2016*. https://www.schule-bw.de/service-und-tools/listen-der-zugelassenen-schulbuecher/schulbuchliste_gy_bp2016.pdf