

Modellvorstellungen zum Energietransport durch elektrischen Strom – Unterstützung durch Augmented Reality

A basic understanding of energy transport through electricity (Schecker et al. 2018) is not only a mandatory curriculum content within the scientific perspective (GDSU 2013). It also allows for a multi-perspective examination of energy as a possible perspective-linking subject area (Peschel 2016) in science lessons (ibid.). However, the topic of electricity already presents numerous learning and comprehension difficulties (Schecker et al. 2018). In addition, primary school teachers seem to avoid science and physics-related topics (Peschel 2007). Based on research and development work on the initiation of suitable concepts for energy transport through electricity in science lessons, the instruments of a qualitative study on existing concepts of primary school pupils regarding electricity are presented. Further models (adaptations of the “energy arrow” (Plappert 2020) are discussed, which could be visualized in real time on electrical circuits to support the initiation of the concept of energy transport by electric current, e.g. using digital technologies such as augmented reality (Dörner et al. 2019).

1 Transport von Energie durch elektrischen Strom als Teil des Energiekonzepts

Der Aufbau anschlussfähiger (Modell-)Vorstellungen und Konzepten ist ein wichtiges Lernziel im (naturwissenschaftlich-orientierten) Sachunterricht. Dabei kann sachunterrichtliches Lernen als „[...] Entwicklung und Veränderung von Vorstellungen, Konzepten, Überzeugungen zu Phänomenen, Sachen und Situationen“ (Adamina et al. 2018: 9) der Lebenswelt hin zu wissenschaftlichen Konzepten im Sinne der (doppelten Anschlussfähigkeit GDSU 2013) verstanden werden. Diese Entwicklung und Veränderung von Konzepten sollte entsprechend stimmig und konsekutiv über die Bildungsstufen hinweg erfolgen. Ein weiteres Argument für die frühzeitige, konsistente Anbahnung von Modellvorstellungen und Konzepten liefern Wilhelm und Hopf (2018): Sie betonen, dass (neu erworbenes) Wissen erst durch Eingliederung in vorhandene, vernetzte Wissensstrukturen zu einem Konzept werden kann, da es so eine (individuelle und nachhaltig-persönliche) Bedeutung erhält (ebd.). Dies legen auch Ergebnisse aus der Lernforschung nahe, die beschreiben, dass vorhandene Konzepte der Lernenden den Lernprozess beeinflussen (Demuth & Rieck 2011; Widodo & Duit 2004), wobei vorhandene anschlussfähige Konzepte der Lernenden das Lernen erleichtern, während nicht anschlussfähige Konzepte das Lernen hingegen erschweren können (Widodo & Duit 2004).

Der Fokus des Beitrags liegt auf den Modellvorstellungen von Schüler*innen sowie den Schwierigkeiten, diese zu erforschen. Dazu müssen vorhandene Modellvorstellungen (wie auch Konzepte) indirekt über Interpretation von Äußerungen oder nonverbalen Handlungen von Lernenden, (durch die Lehrenden) erschlossen werden, wofür ein spezifisches Testszenario entwickelt wurde.

Die individuelle und passgenaue Adressierung anschlussfähiger Konzepte der Lernenden muss in der didaktischen Rekonstruktion (Kattmann et al. 1997) durch Aushandlung zwischen Fachlichkeit und den Konzepten und Vorstellungen der Lernenden erfolgen. Diese didaktische Rekonstruktion sowie die daraus resultierende Unterrichtsplanung und -durchführung muss mehr Aufmerksamkeit erhalten – statt des Zurückgreifens auf One-Size-fits-All-Ansätze. Dies unterstützen bereits einige ältere, praxisnah angelegte Studien, die zeigen, dass Lehrkräfte bei der Planung bzw. Durchführung von (Sach-)Unterricht die individuellen vorhandenen Konzepte von Lernenden kaum oder nur in Ansätzen berücksichtigen (Koch-Priewe 1995; Schniotalle 2003). Auch aus aktuellen Diskursen zur (adaptiven) Interaktionsgestaltung (vgl. z. B. Beckerle, Link & Bernecker 2021) geht die Relevanz der Orientierung am Kind bei der Gestaltung und Durchführung von Unterricht hervor.

Konzepte speziell zum Energiebegriff sind jedoch komplex (Wodzinski 2011). Der Transport von Energie (z. B. mittels elektrischen Stroms) kann dabei als Teilaspekt eines umfangreichen und anspruchsvollen Energiekonzepts angesehen werden (Duit 1987; 2014; Tobin et al. 2018), welches allerdings über übliche Thematisierungen im Sachunterricht wie „Der elektrische (Gleich-)Stromkreis“ hinausgeht. Es könnte sich entsprechend anbieten, den Transport von Energie *durch* elektrischen Strom als Basiskonzept der naturwissenschaftlichen Perspektive, (Thema Energie-/Energieerhaltung, vgl. PR202x der GDSU, i.V.) frühzeitig zu konzeptualisieren und grundlegend anzulegen. Statt vereinzelter Beschäftigung mit dem Stromkreis wird ein Energiekonzept (für grundlegende Forschungsarbeiten zu diesem Thema s. Haider 2010) angebahnt, das differenziert und ausgebaut werden kann. Aufgrund des Potenzials des Themas Energie könnte dies auch in eine vielperspektivische Auseinandersetzung im Sachunterricht münden und Energie als vernetzendes Thema aufgreifen (Peschel 2016).¹

Zum Energiekonzept von Grundschüler*innen scheint es nur wenige Untersuchungen/Befunde zu geben (Detken 2023, vgl. a. Haider 2010; Reimer 2020); ebenso gab und gibt es wenige (und nur wenige aktuelle) Befunde zu Konzepten von Grundschüler*innen zum

¹ Zu beachten ist hierbei, dass der Perspektivrahmen exemplarisch divergente Perspektivenvernetzende Themenbereiche benennt (GDSU 2013).

elektrischen Strom (Shepardson & Moje 1994, Schütte 2019). Allerdings können Grundschüler*innen Elektrizität durchaus mit Energie assoziieren (Detken 2023: 1), was eine konsequente Konzeptentwicklung bereits im Sachunterricht ermöglichen kann. Insgesamt gibt es wenige Befunde zum Energietransport durch elektrischen Strom, insbesondere in Bezug auf den Sachunterricht.

Die Generierung elektrischer Energie in Kohle-, Atom-, Wasser- oder Windkraftwerken – neuerdings auch durch Balkonkraftwerke – sowie die Nutzung der elektrischen Energie durch verschiedenste Geräte und Vorrichtungen sind in der Lebenswelt durch Beobachtungsmöglichkeiten bzw. mindestens anhand von Wirkungen wahrnehmbar (z. B. Windräder drehen sich, die Herdplatte zu Hause wird warm usw.). Der Transport der Energie mittels elektrischen Stroms zwischen dem Ort der Generierung (Energiewerk) und dem Ort des „Wandelns“² (Haushalte, Industrie etc.) kann jedoch aufgrund der geringen Beobachtbarkeit des elektrischen Stroms (ohne direkte Wirkungen der Energie) nicht wahrgenommen werden. Wilhelm & Hopf (2018: 116, Physik, Sekundarstufe) sowie Schütte (2019) beschreiben außerdem, dass viele Lernende begrifflich nicht trennen (können) zwischen Strom und Energie. Dies macht die Notwendigkeit der Unterstützung der Anbahnung anschlussfähiger Modellvorstellungen zum Energietransport durch elektrischen Strom umso deutlicher.

2 (Modell-)Vorstellungen zum elektrischen Strom und deren Erfassung

Arbeiten von Stork & Wiesner (1981), von Wodzinski (2011) und von Starauschek & Murrmann (2016) zeigen die Schwierigkeit der Adressierung von Inhalten zum Thema Elektrik im Unterricht der Primarstufe auf. Wilhelm & Hopf (2018) bieten außerdem eine umfassende Abhandlung über entsprechende Schwierigkeiten im Unterricht der Sekundarstufe. Der elektrische Strom ist direkt nicht beobachtbar, nur über seine Wirkungen (Biester 2002). Ein weiterer wichtiger Befund (Schütte 2019) war, dass Schüler*innen oftmals die Begriffe Stromstärke und Spannung verwechseln. Viele Schülerinnen und Schüler neigen dazu, beide Begriffe synonym zu verwenden oder falsch zuzuordnen (ebd.). Hinzu kommt, dass elektrische Schaltungen in Unterrichtssituationen meist ganz anders aussehen als elektrische Schaltungen in der Lebenswelt (vgl. auch Abb. 1): Die elektrische Schaltung im Unterricht besteht zu meist aus einer (Flach-)Batterie oder einer anderen Spannungsquelle (Gleichstrom,

² In diesem Beitrag wird bewusst der Begriff des „Verbrauchers“ gemieden, um die Problematik dieses Begriffs im Hinblick auf den Nicht-Verbrauch des elektrischen Stroms (da Träger der Energie) und den Nicht-Verbrauch von Energie (da gewandelt) nicht weiter zu forcieren.

Niedrigspannung <25 V, Batterie) mit zwei sichtbaren/optisch voneinander unterscheidbaren Polen und zwei sichtbaren/optisch voneinander unterscheidbaren elektrischen Leitungen (vgl. auch Schütte 2019: 77) sowie einem Gerät, welches mit elektrischer Energie betrieben werden soll (meist eine Lampe).

In der Lebenswelt hingegen ist meist nur ein „Kabel“ erkennbar, denn beide elektrischen Leitungen sind in derselben Isolierung verbaut und es entsteht leicht der Eindruck, es gäbe nur eine elektrische Leitung – nämlich von der Steckdose zum Gerät (Stork & Wiesner 1981). Zudem sind Begriffe wie Spannung, Leistung oder Stromstärke i.d.R. nicht im Alltag differenziert und nicht mit Beobachtungen gekoppelt („Der Wasserkocher kocht das Wasser schneller, weil er eine höhere Leistung hat/wandeln kann“).

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an (teilweise aufeinander aufbauenden) (Modell-)Vorstellungen zum elektrischen Strom, wobei viele dieser Modellvorstellungen nicht anschlussfähig sind an wissenschaftliche Konzepte von Strom(stärke) und Spannung bzw. Energie. Dies wirft die Frage auf, inwiefern anschlussfähige Modelle durch geeignete (visuelle) Unterstützungen entwickelt werden können und Lernende gezielt und individuell bei der Entwicklung von Konzepten unterstützen können (s. Kap. 3). (Modell-)Vorstellungen zum elektrischen Strom werden daher zunächst vorgestellt, wobei die von den Autoren verwendeten, teils inhaltlich mit unterschiedlichen Fokussen konnotierten Begriffe übersetzt und adaptiert bzw. sinngemäß zusammengeführt wurden.

1) Unipolar-unidirektionale (Verbrauchs-)Modellvorstellung: Besonders im Anfangsunterricht ist bei Lernenden oft die Modellvorstellung des elektrischen Stroms als eine Art unidirektionaler „Fluss“ von der Spannungsquelle zum Gerät präsent (Heran-Dörr 2010; Shepardson & Moje 1994; Kärrqvist 1985, Stork & Wiesner 1981). Dabei wird von Lernenden angenommen, dass der Strom von der Spannungsquelle zum Gerät fließt, dort verbraucht wird und das zweite Kabel (Rückführung, Kreislauf) wird als überflüssig/nutzlos/funktionslos angesehen (ebd.). Diese Unterschiede zwischen dem elektrischen Strom und dem Energiestrom, welcher tatsächlich von der Spannungsquelle zum Gerät gerichtet ist, gilt es zu differenzieren und weiterzuentwickeln. Bereits hier zeigt sich also die Notwendigkeit zur Trennung zwischen dem Weg des Stroms und dem Weg der Energie.

Die unipolar-unidirektionale (Verbrauchs-)Modellvorstellung kann gewandelt werden, wenn Lernende erkennen, dass es zwingend zwei Kabel nötig sind, um z. B. eine Lampe zum Leuchten zu bringen (Wilhelm & Hopf 2018). Dann gehen Lernende aber tlw. davon aus, dass erst zwei Kabel „(stark) genug“ sind, um die Lampe leuchten zu lassen. Dabei kann auch

angenommen werden, dass auch zwei Kabel am selben Pol die Lampe leuchten lassen. Ebenso kann die Vorstellung des Verbrauchs von Strom am Gerät bestehen bleiben (ebd.). Laut Tarciso Borges & Gilbert (1999) wird diese unipolar-unidirektionale (Verbrauchs-)Modellvorstellung meist noch in der Primarstufe von den Lernenden verworfen bzw. modifiziert.

2) Zwei-Ströme-Modellvorstellung: Sobald die Lernenden erkennen, dass es zwei verschiedene Pole gibt, die zwingend elektrisch leitend verbunden werden müssen, kann bei Lernenden eine Zwei-Ströme-Modellvorstellung etabliert werden (Heran-Dörr 2011; Shepardson & Moje 1994; Kärrqvist 1985, Wiesner 1995): Die Lernenden nehmen an, dass es einen Plus- und einen Minusstrom gibt, welche sich beide von der Spannungsquelle zum Gerät bewegen und dort beim Aufeinandertreffen das Leuchten ermöglichen. Nach Osborne und Freyberg (1985) wird auch diese Modellvorstellung in der Regel in der Primarstufe von den Lernenden verworfen bzw. modifiziert. Allerdings kann sie auch in einigen Fällen bis zum Beginn der Sekundarstufe bestehen bleiben (ebd.).

3) Kreislauf-Modellvorstellung: Eine sich ggf. anschließende Modellvorstellung beschreibt elektrische Schaltungen als geschlossenes Kreis-System von einem Pol der Spannungsquelle zum anderen, bei dem sich die Bewegungsrichtung des Stroms nach der Polung richtet (Kärrqvist 1985). Allerdings beinhaltet diese Modellvorstellung noch nicht, in welcher Weise sich der Strom „bewegt“, abgesehen von der Polungsrichtung (ebd.).

4) Sequenziell-unidirektionale (Verbrauchs-)Modellvorstellung: Eine Modifikation bzw. Erweiterung der beschriebenen Modellvorstellung ergänzt, in welcher Weise die Lernenden sich die „Bewegung“ des elektrischen Stroms vorstellen: Abläufe in elektrischen Schaltungen werden als sequenziell und in Richtung der Polung ablaufend angenommen (Shipstone 1984; Shepardson & Moje 1994), z. B. „Strom fließt von einem Pol los, bewegt sich dann durch das erste Kabel zur Lampe...“. Dabei kann auch noch ein mindestens teilweiser „Verbrauch“ des Stroms an Geräten angenommen werden, wonach weniger Stromstärke den anderen Pol der Spannungsquelle „erreichen“ würde (Kärrqvist 1985).



Abbildung 1: Aus der Literatur abgeleitete beispielhafte Kinderaussagen, welche auf verschiedene zugrundeliegende (Modell-)Vorstellungen zum elektrischen Strom schließen lassen.

5) Wissenschaftlich anschlussfähige Modellvorstellung: Zwischen den zuvor beschriebenen Modellvorstellungen und einer, die mit wissenschaftlichen Grundlagen konform ist, gibt es weitere Zwischenstufen, die hier der Übersichtlichkeit halber nicht weiter aufgeführt werden. Die o.g. Aufzählung ist also keineswegs vollständig, sondern veranschaulicht mehr die verschiedenen Entwicklungsstufen der Modellvorstellungen. Eine wissenschaftlich bzw. fachlich anschlussfähige Modellvorstellung zum elektrischen Strom – insbesondere mit Hinblick auf den Energietransport durch elektrischen Strom – beschreibt elektrische Ladung als Träger elektrischer Energie. Diese Energie wird in von Elektrizität „betrieben“ Geräten gewandelt/genutzt. Bezüglich des Energiekonzepts, speziell zum Energietransport durch elektrischen Strom, könnte auch die Untersuchung der folgenden Frage sehr interessant sein: „Wenn keine Ladung(-sträger) ‚entnommen/übertragen‘ wird(werden), woraus manifestiert sich die Energie, die ‚entnommen/übertragen‘ wird? Aus dem nichts/aus dem Spannungsabfall/...?“ (Spannungsabfall als Analogie zur Abnahme der potenziellen Energie im Kontext der Mechanik).

Diese komplexe Modellvorstellung zum elektrischen Strom unter Berücksichtigung der Trennung zwischen Strom und Energie erfordert die visuelle wie begriffliche Trennung von Träger und Energie samt der Wandlung von Energie und der Erhaltung von Ladungsträgern. Für dieses (wissenschaftlich anschlussfähige) Konzept sollten geeignete visuelle Modelle zur Unterstützung der Anbahnung dieser Modellvorstellung entwickelt und für die Grundschule/den Sachunterricht geprüft werden (s. Kap. 3).

Wie bereits erwähnt, können bei Lernenden vorhandene Modellvorstellungen (wie sämtliche Lernendenvorstellungen) nicht direkt erfasst werden, sondern sie müssen aus Äußerungen oder anderen nonverbalen Handlungen der Lernenden interpretativ erschlossen werden (Adamina et al. 2018: 12), siehe exemplarisch für Modellvorstellungen zum elektrischen Strom Abb. 1. Entsprechend versuchen Testinstrumente zum Rückschluss auf vorhandene Modellvorstellungen meist, Lernende zu ebensolchen Äußerungen (oder zur Wahl zwischen verschiedenen Antwortoptionen bei inhaltlich vorstrukturierten Items) zu veranlassen. Für den Sekundarbereich gibt es aktuell mehrere Erhebungsinstrumente für Modellvorstellungen zum elektrischen Strom (vgl. z. B. Urban-Woldron & Hopf 2012; Kulgemeyer 2020). Für den Primarbereich finden sich weniger solcher Instrumente³. Es gibt einen Item-basierten Test von Shepardson & Moje (1994). Der Test besteht aus drei Teilen, wobei die Lernenden die drei aufgabenbasierten Teile absolvieren und zu ihren getätigten Antworten/Item-Auswahlen oder angefertigten Zeichnungen befragt werden (inkl. Audio- und Videografie). Zusätzlich wurden Feldnotizen angefertigt und zur Datentriangulation hinzugezogen (ebd.: 493ff).⁴ Der Test wurde im Rahmen des BMBF-Projekts „GeAR“ (FKZ 01JD1811A) für eigene Studien aus dem Englischen übersetzt, von der Gestaltung der Skizzen her modifiziert hin zu stärkerer Verwendung von Fotos von realen Objekten und Teil 1 wurde aus Effizienzgründen von acht auf drei Auswahlmöglichkeiten verkürzt (Abb.2). Diese adaptierte Version des „Elektrik-Konzepttests“ inkl. Instruktions- und Annotationsmaterial sowie Informationen zur Datenauswertung für Teil 1 stellen die Autor*innen auf Anfrage gerne zur Verfügung.

³ Während Schütte (2019) durch seinen Forschungsansatz auch auf die Rekonstruktion impliziten Wissens durch Handlungsanalyse abzielt, fokussiert dieser Artikel Instrumente, welche expliziertes Wissen der Lernenden adressieren.

⁴ Für eine Anwendung dieses Tests in einer Adaption siehe auch Haider (2010).

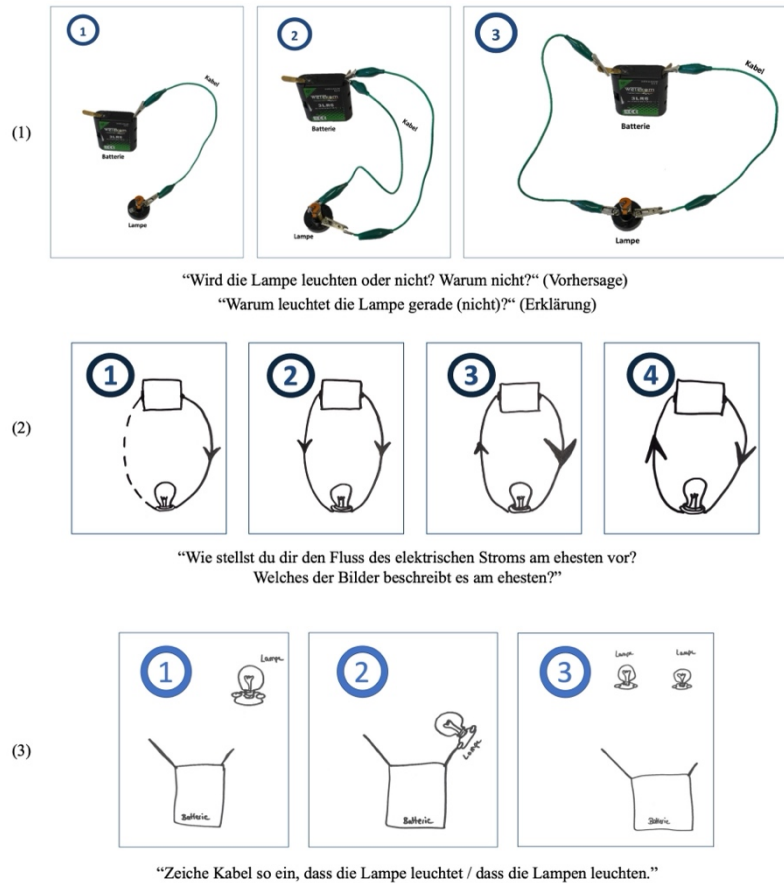


Abbildung 2: Testinstrument zur Erfassung bzw. zum Rückschluss auf Modellvorstellungen zum elektrischen Strom, adaptiert nach Sheparson & Moje 1994.

3 Weg des (elektrischen) Stroms und Weg der (elektrischen) Energie

Aufgrund der in der Lebenswelt eingeschränkten „Zugänglichkeit“/Wahrnehmbarkeit elektrischer Prozesse und der vielen nicht anschlussfähigen Modellvorstellungen zum elektrischen Strom, insb. zur Energieübertragung durch elektrischen Strom stellt sich die Frage nach geeigneten (visuellen) Unterstützungen für Lernende für die Ausbildung anschlussfähiger Modellvorstellungen. Dabei muss betont werden, dass jede modellhafte Visualisierung Grenzen hat und dass ein genereller Diskurs um das Für und Wider des Einsatzes von modellhaften Visualisierungen bei Kindern im Grundschulalter besteht (vgl. z. B. Haider & Fölling-Albers 2020 für den Kontext Elektrizität).⁵

⁵ Für den Sachunterricht gibt es durchaus Arbeiten, die zeigen, dass bzw. die erläutern, wie Modellvorstellungen bei Kindern im Grundschulalter angebahnt werden können (vgl. z. B. Gläser 2011, Grygier 2008). Hier soll die besondere Schwierigkeit der Adressierung von Modellvorstellungen beim Thema Elektrizität hervorgehoben werden.

Ein bereits existierendes (visuelles) Modell zur Veranschaulichung des Energietransports durch elektrischen Strom legt das Energie-Träger-Stromkreis Modell von Plappert (2020) zugrunde. In der Verknüpfung eines Wasser- und eines elektrischen „Kreislaufs“, in welchem letztlich über eine Wasserpumpe (über einen Dynamo) ein Rad zum Drehen gebracht wird, wird ein „Energiepfeil“ zur Visualisierung des Transports von Energie verwendet.⁶

Ausgehend von Plapperts (2020) Aufbau wurde mittels verschiedener Adaptionen und unter Einbezug von Peer-Feedback aus verschiedenen Bereichen eine weitere modellhafte Visualisierung zum Energietransport durch elektrischen Strom entwickelt (Abb. 3). Bei dieser Visualisierung werden der Weg des elektrischen Stroms und der Weg der Energie visualisiert. Durch die Weiterführung des Energiepfeils an der Lampe (in Anlehnung an Energieflussdiagramme) soll überdies verdeutlicht werden, dass auch die Energie an der Lampe nicht „verbraucht“, sondern lediglich gewandelt wird. Für den Weg des elektrischen Stroms wurde eine durchgehende Linie gewählt, da insbesondere lediglich der „Weg des Stroms“ adressiert werden soll und nicht, wie groß die Ladungsträger sind oder wie schnell oder in welchem Abstand voneinander sie sich bewegen. Eine solche Verwendung von einzelnen Punkten zur Andeutung der Teilchen könnte aus den genannten Gründen zur Ausbildung nicht anschlussfähiger Konzept-Aspekte bzgl. der Gestalt und der Art und Weise der Bewegung der elektrischen Ladungsträger in elektrischen Schaltungen führen und wurde deshalb vermieden.

Eine mögliche, aus lernpsychologischer Sicht vielversprechende technische Umsetzung einer solchen Visualisierung an elektrischen Schaltungen könnte mittels Augmented Reality (AR)⁷ (vgl. z. B. Azuma et al. 2001; Dörner et al. 2019) erfolgen: Gemäß der CLT (Plass et al. 2010; Sweller et al. 2011) bzw. der CTML/CATML (Mayer 2005; Moreno 2006) kann die Integration semantisch zusammenhängender Informationen im direkten Blickfeld die Verfügbarkeit kognitiver Ressourcen für den eigentlichen Lernprozess erhöhen. Verschiedene Reviews und Meta-Analysen konnten solche Effekte bereits zeigen (vgl. z.B. Alzahrani 2020; Avila-Garzon et al 2021). Denkbar ist –bei möglicher technischer Umsetzung– sogar die Anpassung der Visualisierung an die Anordnung/Positionierung der Kabel in AR.

⁶ In der Arbeit von Haider (2010, S. 149 ff) werden u. a. Grenzen der Akzeptanz dieses Modells durch Lernende aufgezeigt.

⁷ Die Technologie AR findet auch im Sachunterricht vermehrt Einzug, vgl. z. B. Haarhus et al. (2023).

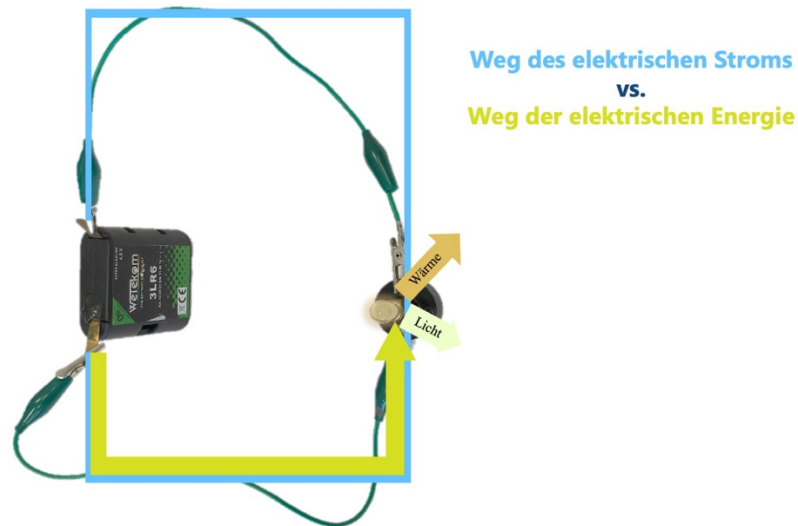


Abbildung 3: Konzeptionelle Darstellung einer Visualisierung zur Unterstützung eines anschlussfähigen Konzepts zum Energietransport durch elektrischen Strom für den (Sach-)Unterricht der Primarstufe.

4 Fazit

Insgesamt zeigt dieser Beitrag vorrangig die Bedeutsamkeit der Grundlegung und Anbahnung anschlussfähiger Modellvorstellungen zum Energietransport durch elektrischen Strom auf, welche zwischen Träger und Energie differenzieren. Hierfür scheint eine visuelle Unterstützung der Lernenden aufgrund der Unbeobachtbarkeit des elektrischen Stroms sinnvoll. Der Weg des elektrischen Stroms und der Weg der elektrischen Energie werden unterscheidbar abgebildet. Die Konzeption einer solchen visuellen Unterstützung ist jedoch stets eine Abwägung zwischen Vor- und Nachteilen verschiedener Visualisierungsentscheidungen (und damit der Modellierungen) in Bezug auf das Vermögen zur Anbahnung anschlussfähiger Modellvorstellungen bzw. der Gefahr des Evozierens nicht anschlussfähiger Modellvorstellungen. Umso wichtiger erscheint daher das proaktive Eruiere vorhandener Modellvorstellungen der Lernenden und deren Berücksichtigung bei der Planung und Gestaltung von Unterricht (didaktische Rekonstruktion).

Noch ausstehend sind die empirische Validierung des o. g. Tests zu Modellvorstellungen zum elektrischen Strom, insbesondere von Teil 1 sowie die technische Realisierung und empirische Erprobung der Visualisierung „Weg des Stroms und Weg der Energie“ in Augmentierungen.

Literatur

- Adamina, M.; Kübler, M.; Kalcsics, K.; Bietenhard, S. & Engeli, E. (Hrsg.). (2018): „Wie ich mir das denke und vorstelle...“: Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zu Lerngegenständen des Sachunterrichts und des Fachbereichs Natur, Mensch, Gesellschaft. Bad Heilbrunn.
- Alzahrani, N. M. (2020): Augmented Reality: A Systematic Review of Its Benefits and Challenges in E-learning Contexts. *Applied Sciences*, 10(16), 5660. <https://doi.org/10.3390/app10165660>.

- Avila-Garzon, C.; Bacca-Acosta, J.; Kinshuk, Duarte, J. & Betancourt, J. (2021): Augmented Reality in Education: An Overview of Twenty-Five Years of Research. *Contemporary Educational Technology*, 13(3), ep302. <https://doi.org/10.30935/cedtech/10865>.
- Azuma, R.; Baillot, Y.; Behringer, R.; Feiner, S.; Julier, S. J. & MacIntyre, B. (2001): Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21(6), 34–47. <https://doi.org/10.1109/38.963459>.
- Beckerle, C.; Linck, S. & Bernecker, K. S. (2021): Adaptive sprachförderliche Interaktionen im Kita-Alltag. In K. Mackowiak, H. Wadepohl, & C. Beckerle (Hrsg.): *Interaktionen im Kita-Alltag gestalten: Grundlagen und Anregungen für die Praxis*. Stuttgart, 87-107.
- Biester, W. (2002): Elektrischer Strom. *Grundschulunterricht* 49 (4, Sonderheft), 10–12.
- Demuth, R. & Rieck, K. (2011): Schülervorstellungen im Sachunterricht aufgreifen—Grundlegende Ideen entwickeln. In: Demuth, R.; Walther, G. & Prenzel, M. (Hrsg.): *Unterricht entwickeln mit SINUS. 10 Module für den Mathematik- und Sachunterricht in der Grundschule*. Hannover. https://www.pedocs.de/volltexte/2015/10991/pdf/Demuth_Walther_Prenzel_2011_Unterricht_entwickeln_mit_SINUS.pdf, 65-72.
- Detken, F. (2023): Young children’s ideas of energy compared with the scientific energy concept: Results of a video study with interviews about children’s own drawings. *Frontiers in Education*, 8, 1035066. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1035066>.
- Duit, R. (1987): Unterricht über Energie-Ziele, Lernschwierigkeiten, Wege. *PdN-Ph* 3(36), 41–44.
- Duit, R.; Gropengießer, H.; Kattmann, U.; Komorek, M. & Parchmann, I. (2012): The Model of Educational Reconstruction – a framework for improving teaching and learning science. <https://doi.org/10.13140/2.1.2848.6720>.
- Duit, R. (2014): Teaching and Learning the Physics Energy Concept. In: Chen, R.F.; Eisenkraft, A.; Fortus, D.; Krajcik, J.; Neumann, K.; Nordine, J. & Scheff, A. (Hrsg.). *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education*. Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1_5, 67-85.
- Dörner, R.; Broll, W.; Grimm, P. & Jung, B. (2019): Virtual und Augmented Reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58861-1>.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) (Hrsg.) (2013): *Perspektivrahmen Sachunterricht (Vollständig überarbeitete und erweiterte Ausgabe)*. Bad Heilbrunn.
- Gläser, E. (2011): Arbeit mit Modellen im Sachunterricht. *Grundschule Sachunterricht*, 13(51), 34–35.
- Grygier, P. (2008): Wissenschaftsverständnis von Grundschulern im Sachunterricht. Bad Heilbrunn. <https://www.klinkhardt.de/verlagsprogramm/1608.html>
- Haarhus, L.; Holzapfel, M. & Brückmann, M. (2023): AR-Dinosaurier-Modelle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. Unpublished. <https://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.13343.74407>
- Haider, Michael. (2010). *Der Stellenwert von Analogien für den Erwerb naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. Eine Untersuchung im Sachunterricht der Grundschule am Beispiel „Elektrischer Stromkreis“*. Bad Heilbrunn.
- Haider, M. & Fölling-Albers, M. (2020): Auswirkungen von Analogiemodellen auf den Aufbau konzeptuellen Wissens im Sachunterricht der Grundschule – Beispiel Stromkreis. *Unterrichtswissenschaft*, 48(3), 469–491. <https://doi.org/10.1007/s42010-020-00077-5>.
- Heran-Dörr, E. (2011): Von Schülervorstellungen zu anschlussfähigem Wissen im Sachunterricht. IPN.
- Kattmann, U.; Duit, R.; Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 3–18.
- Kärqvist, C. (1985): The development of concepts by means of dialogues centered on experiments. *Aspect of Understanding Electricity*, 73-83.
- Koch-Priewe, B. (1995): Vorerfahrungen von Schülerinnen und Schülern im Unterricht. Skizze eines Dilemmas am Beispiel des Sachunterrichts. *Die deutsche Schule*, 87, 92–102.
- Kulgemeyer, C. (2020): Aufgaben DIRECT Test. https://physikdidaktik.com/wp-content/uploads/2020/11/Test_Elehre.pdf. [15.10.2024].
- Mayer, R. E. (2005): Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge University Press, 31.
- Moreno, R. (2006): Learning in High-Tech and Multimedia Environments. *Current Directions in Psychological Science*, 15(2), 63–67. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00408.x>.
- Osborne, R. & Freyberg, P. (1985): *Learning in Science: The Implications of Children’s Science*. Auckland: Heinemann.

- Peschel, M. (2007): Konzeption einer Studie zu den Lehrvoraussetzungen und dem Professionswissen von Lehrenden im Sachunterricht der Grundschule – Das Projekt SUN. In: Lauterbach, R.; Hartinger, A.; Feige, B. & Cech, D. (Hrsg.): *Kompetenzerwerb im Sachunterricht fördern und erfassen*. Bad Heilbrunn, 151–160, https://www.pedocs.de/volltexte/2017/15054/pdf/PPS_17.pdf#page=151 [09.10.2024].
- Peschel, M. (2016): Energie als perspektivenvernetzender Themenbereich im Sachunterricht. In Maurer, C. (Hrsg.): *Authentizität und Lernen—Das Fach in der Fachdidaktik*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Berlin 2015, 373–375. https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tagungsbaende/GDCP_Band36.pdf [09.02.2026].
- Plappert, D. (2020): Systemisches Denken im Physikunterricht. https://plappert-freiburg.de/images/VAD_Physik_Systemisches_Denken_komp.pdf [09.02.2026].
- Plass, J. L.; Moreno, R. & Brünken, R. (Hrsg.). (2010): *Cognitive Load Theory* (1. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511844744>.
- Reimer, M. (2020): Ohne Energie wäre alles weg vom Fenster: Vorstellungen von Grundschulkindern zu Energie. Baltmannsweiler.
- Schecker, H.; Wilhelm, T.; Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.). (2018): *Schülervorstellungen und Physikunterricht—Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>.
- Schniotalle, M. (2003): Räumliche Schülervorstellungen von Europa. Ein Unterrichtsexperiment zur Bedeutung kartographischer Medien für den Aufbau räumlicher Orientierung im Sachunterricht der Grundschule, Lüneburg.
- Schütte, F. (2019): Freies Explorieren zum Thema elektrischer Stromkreis: Eine Suchraumrekonstruktion nach der dokumentarischen Methode [Springer Fachmedien Wiesbaden]. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-23059-3>.
- Shepardson, D. P. & Moje, E. B. (1994): The nature of fourth graders' understandings of electric circuits. *Science Education*, 78(5), 489–514. <https://doi.org/10.1002/sce.3730780505>.
- Shipstone, D. M. (1984): A study of children's understanding of electricity in simple DC circuits. *European journal of science education*, 6(2), 185–198.
- Staraschek, E. & Murmann, L. (2016): „Der Strom kommt von der Batterie“ – Kindervorstellungen zum einfachen elektrischen Stromkreis. *Grundschule Sachunterricht*, 69, 7.
- Stork, E. & Wiesner, H. (1981): Schülervorstellungen zur Elektrizitätslehre und Sachunterricht. Bericht über einen Versuch zur Integration von fachdidaktischer Forschung und schulpraktischer Ausbildung an der Universität. *Sachunterricht und Mathematik in der Primarstufe*, 9, 218–230.
- Sweller, J.; Ayres, P. & Kalyuga, S. (2011): *Cognitive Load Theory*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>.
- Tarciso Borges, A. & Gilbert, J. K. (1999): Mental models of electricity. *International Journal of Science Education*, 21(1), 95–117. <https://doi.org/10.1080/095006999290859>.
- Tobin, R. G.; Lacy, S. J.; Crissman, S. & Haddad, N. (2018): Model-based reasoning about energy: A fourth-grade case study. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(8), 1134–1161. <https://doi.org/10.1002/tea.21445>.
- Urban-Woldron, H. & Hopf, M. (2012): Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 201–227.
- Widodo, A., & Duit, R. (2004): Konstruktivistische Lehr-Lern-Sequenzen und die Praxis des Physikunterrichts. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10, 233–255.
- Wiesner, H. (1995): Physikunterricht—An Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientiert. *Unterrichtswissenschaft*, 23(2), 127–145.
- Wilhelm, T. & Hopf, M. (2018): Schülervorstellungen zum elektrischen Stromkreis. In: H. Schecker, H.; Wilhelm, T.; Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.): *Schülervorstellungen und Physikunterricht—Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*, Wiesbaden, 115–138, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>.
- Wodzinski, R. (2011): Naturwissenschaftliche Fachkonzepte anbahnen—Anschlussfähigkeit verbessern. IPN Leibniz-Institut f. d. Pädagogik d. Naturwissenschaften an d. Universität Kiel.