

Interviewstudie zu Modellen einfacher Stromkreise

- Ein qualitativer Vergleich von Elektronengas- und Wasserfallmodell -

Katharina Leibfarth*, Ulrich Trautwein*, Peter Gerjets[†], Jan-Philipp Burde*

*Universität Tübingen [†]Leibniz-Institut für Wissensmedien Tübingen
katharina.leibfarth@uni-tuebingen.de

Kurzfassung

In der Physik sind viele Größen und Konzepte abstrakt, unanschaulich oder nicht direkt beobachtbar, wie beispielsweise die elektrische Spannung in einem Stromkreis. Daher liegt es nahe, bei der unterrichtlichen Behandlung von elektrischen Stromkreisen auf entsprechende Analogien bzw. Modelle zurückzugreifen, um diese zu veranschaulichen. Die fachdidaktische Forschung hat sich bisher primär auf die Entwicklung und Evaluation einzelner Modelle des einfachen Stromkreises fokussiert; vergleichende Analysen zur Akzeptanz bzw. Lernförderlichkeit der Modelle fehlen jedoch weitgehend. Um diesem Desiderat zu begegnen wurden Akzeptanzbefragungen mit Lernenden zum Elektronengasmodell und zum Wasserfallmodell durchgeführt, die beide grundsätzlich zur Veranschaulichung der elektrischen Spannung geeignet sind. Die Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich beide Modelle von den Lernenden akzeptiert werden. Unterschiede zwischen den Modellen zeigen sich in Bezug auf das Konzeptverständnis der Modelle und der zugrundeliegenden Stromkreise, sowie dem Analogieschluss zwischen Modell und Stromkreis.

1. Hintergrund

Vom Stromverbrauch bis zur Spannung als Eigenschaft des Stroms: Lernendenvorstellungen zu einfachen Stromkreisen sind auch nach dem Unterricht noch weit verbreitet (Burde, 2018; Engelhardt & Beichner, 2004; Ivanjek et al., 2021; Shipstone et al., 1988). Damit sind einfache Stromkreise ein schwieriges und abstraktes Thema des Physikunterrichts. Ein möglicher Grund der konzeptuellen Schwierigkeiten liegt in der geringen Anschaulichkeit: Zentrale Größen wie die elektrische Spannung, Stromstärke oder Widerstand, aber auch deren Beziehungen entziehen sich unserer direkten Wahrnehmung (Burde & Wilhelm, 2017). Infolgedessen liegt es nahe physikalische Größen und Zusammenhänge mit Hilfe von Modellen und Analogien zu veranschaulichen. Dabei schlägt die Analogie eine Brücke (Oh & Oh, 2011) vom Bekannten zum Unbekannten, d. h. hier vom Modell zum Stromkreis.

1.1. Modelle und Analogien

Allgemein betrachtet ist eine Analogie eine Abbildung, die, wie in Abbildung 1 illustriert, einen vertrauten Ausgangs- oder Modellbereich mit einem unbekannten Zielbereich verknüpft (Gentner, 1983). Ein Modell kann in diesem Sinne als der bekannte Modellbereich verstanden werden, der über eine Analogie das Verständnis des Zielbereichs, beispielsweise des Stromkreises, erleichtern soll. Die Analogie verbindet dabei sowohl Größen und Eigenschaften beider Bereiche als auch die Relationen zwischen den Größen miteinander (Gentner, 1983).

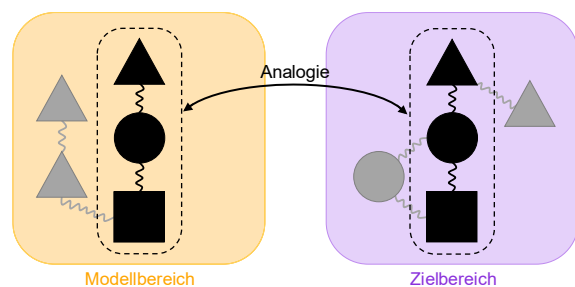


Abb. 1: Analogie zwischen Objekten und Beziehungen des Modell- und Zielbereichs (angelehnt an Duit & Glynn, 1995, S. 4)

Gleichzeitig haben Analogien als partielle Isomorphismen Grenzen. Dies sind beispielsweise Größen und Beziehungen, die keine strukturelle Entsprechung im anderen Bereich vorweisen und in Abbildung 1 grau veranschaulicht werden (Gentner, 1983). Als Beispiel nennen Burde und Gottschlich (2022), dass das Wasserfallmodell, entsprechend der Alltagserfahrung mit Flussquellen, die Lernendenvorstellung der Batterie als Konstantstromquelle fördert.

Neben dem Wasserfallmodell gibt es noch viele andere Modelle des elektrischen Stromkreises, die von Lehrkräften in der schulischen Praxis genutzt werden. Einerseits setzt die überwiegende Mehrheit der Lehrpersonen Stromkreismodelle ein. Andererseits wählen sie dabei individuell unterschiedliche Modelle, sodass eine große Heterogenität im Modelleinsatz besteht (Frank & Trefzger, 2024; Leibfarth et al., 2024; Schubatzky, 2020).

1.2. Modellauswahl

Eine Möglichkeit zur Systematisierung der verschiedenen Modelle des elektrischen Stromkreises besteht darin, sie nach ihrer zum elektrischen Potential bzw. zur elektrischen Spannung analogen Größe zu kategorisieren (Burde & Wilhelm, 2017). Beispielsweise entspricht bei Höhenanalogien der Höhenunterschied der elektrischen Spannung, während es bei Druckanalogien z. B. der Luft- oder Wasserdruckunterschied ist. In Studien zeigt sich, dass es genau diese Modelle sind, die im Elektrizitätslehreunterricht am häufigsten verwendet werden (Frank & Trefzger, 2024; Leibfarth et al., 2024). Neben dem Wasserfallmodell, auch als offener Wasserkreislaufmodell mit Höhendifferenz bezeichnet, sind Beispiele für andere Modelle, denen eine Höhenanalogie zugrunde liegt, z. B. das Skifahrer:innen-, Bikepark- oder Stäbchenmodell (Bodensiek et al., 2019; Burde & Gottschlich, 2022; Gleixner, 1998; Müller & Mandler, 2022; Wodzinski, 2013). Beispiele für Modelle, denen die Druckanalogie zugrunde liegt, sind das Elektronengasmodell (Burde, 2018) und der ebene geschlossene Wasserkreislauf (Schwedes & Dudeck, 1993). Bei Ersterem entspricht die Spannung einem „elektrischen Druckunterschied“, bei Letzterem einem Wasserdruckunterschied. Während das Elektronengasmodell einen positiven Einfluss auf das Konzeptverständnis einfacher Stromkreise hat (Burde, 2018), haben Lernende mit dem ebenen Wasserkreislauf ähnliche Verständnisschwierigkeiten wie mit dem Stromkreis (Schwedes & Schilling, 1983). Im Folgenden wird daher nicht das Modell des ebenen geschlossenen Wasserkreislaufs näher betrachtet und mit dem Elektronengasmodell verglichen, sondern das Wasserfallmodell (vgl. Abbildung 2).

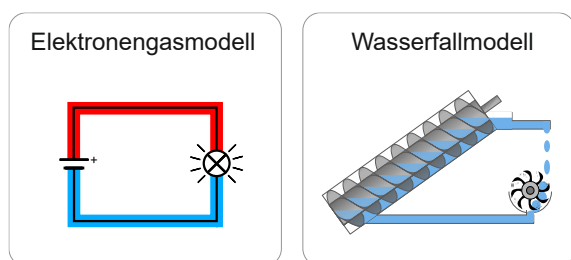


Abb. 2: Elektronengasmodell und Wasserfallmodell
(eigene Darstellung)

1.2.1. Elektronengasmodell

Das Elektronengasmodell (Burde, 2018) führt den „elektrischen Druck“ als Analogon zum elektrischen Potential und die Spannung dementsprechend als „elektrischen Druckunterschied“ ein. Der elektrische Strom sowie Bauteile wie Batterien und Lämpchen sind sowohl im Modell als auch realen Stromkreis gleich benannt. Das Modell verdeutlicht, dass sich die Spannung als Potentialdifferenz auf zwei Punkte im Stromkreis bezieht und (ideale) Batterien konstante Potentialdifferenzen liefern (Burde et al., 2021). Außerdem entwickeln Lernende, die anhand des

Elektronengasmodells unterrichtet wurden, ein besseres Verständnis der elektrischen Spannung (Burde, 2018). Obwohl nicht davon auszugehen ist, dass das Modell klar darstellt, dass Strom nicht verbraucht wird (Burde et al., 2021), tritt die Stromverbrauchsvorstellung im Vergleich zum klassischen Unterricht seltener auf (Burde, 2018).

1.2.2. Wasserfallmodell

Im Wasserfallmodell entspricht das elektrische Potential der Höhe bzw. der potentiellen Energie. Schüler:innen der Sekundarstufe I verfügen in der Regel über Vorerfahrungen hinsichtlich des Zusammenhangs von potentieller Energie und Höhe, an die anhand der Darstellung der Spannung als Höhendifferenz angeknüpft werden kann (Bodensiek et al., 2019).

Der Wasserstrom im Wasserfallmodell entspricht dem elektrischen Strom. Wie z. B. aus Wassermühlen bekannt, fließt im Wasserfallmodell das Wasser von großer Höhe über ein Wasserrad, das im Stromkreis dem elektrischen Widerstand entspricht, nach unten. Dabei gilt: So wie der Höhenunterschied die Ursache des Wasserstroms ist, ist die Spannung die Ursache des elektrischen Stroms (Burde & Gottschlich, 2022). Eine archimedische Schraube als Analogon zur Batterie transportiert das Wasser wieder auf die ursprüngliche Höhe, sodass ein Kreislauf entsteht. Eine Stärke der Höhenanalogie wird darin gesehen, dass sie das Verständnis von Potential, Spannung und deren Differenzcharakter erleichtert (Bodensiek et al., 2019; Gleixner, 1998; Hindriksen et al., 2023).

In der fachdidaktischen Forschung wurden Stromkreismodelle bisher primär im Rahmen der Entwicklung von Unterrichtskonzeptionen evaluiert (Burde, 2018; Gleixner, 1998; Koller et al., 2008) oder deren Stärken, Schwächen und Grenzen theoretisch diskutiert (Burde & Gottschlich, 2022; Burde & Wilhelm, 2017; Härtel, 2012; Kahnt, 2022; Müller & Mandler, 2022). Vergleichende Untersuchungen, z. B. mit Blick auf die Akzeptanz und das Verständnis des Elektronengasmodells und des Wasserfallmodells bei Lernenden, wurden bisher jedoch kaum durchgeführt (vgl. Hindriksen et al., 2023).

Um diesem Desiderat zu begegnen, sollen das Elektronengas- und das Wasserfallmodell anhand folgender Fragestellungen verglichen werden:

2. Forschungsfragen

- I. Wie werden das Elektronengasmodell und das Wasserfallmodell von den Lernenden akzeptiert, paraphrasiert und konzeptuell verstanden?
- II. Wie unterscheidet sich das Konzeptverständnis der Lernenden bezüglich des einfachen Stromkreises nach Instruktion auf Basis des Elektronengasmodells bzw. des Wasserfallmodells?

3. Methode

Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurden Akzeptanzbefragungen (Jung, 1992; Wodzinski & Wiesner, 1996) mit Schüler:innen der siebten und achten Jahrgangsstufe durchgeführt. Die Interviews wurden aufgezeichnet, die Tonaufnahmen im Anschluss transkribiert und mittels einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet (Kuckartz & Rädiker, 2022).

Zum Zeitpunkt der Interviews hatten die Teilnehmenden im Physikunterricht einfache Stromkreise noch nicht behandelt.

3.1. Stichprobe

Insgesamt wurden 14 Schüler:innen der Jahrgangsstufen 7 und 8 aus Baden-Württemberg befragt. Die Hälfte, wurde dabei auf Basis des Elektronengasmodells, die andere Hälfte auf Basis des Wasserfallmodells instruiert. Die Teilnehmenden beider Gruppen waren zum Zeitpunkt der Befragungen 12 bis 13 Jahre alt ($M = 12.6$, $SD = 0.5$). Um sowohl die Heterogenität innerhalb einer Klasse abzubilden und gleichzeitig vergleichbare Gruppen zu betrachten, wurde in beiden Gruppen auf eine vergleichbare Verteilung der Lernenden mit Blick auf Gender und Leistungsstand geachtet. Die Stichprobe ist in Tabelle 1 beschrieben. Insgesamt identifizierten sich je Gruppe vier Personen als weiblich, drei Personen als männlich und keine Schüler:in als divers. Davon wurde jeweils eine männliche sowie eine weibliche Person als „leistungsstark“, „durchschnittlich“ und „leistungsschwach“ eingeschätzt. Die siebte weibliche Person wurde ebenfalls dem leistungsstarken Drittel zugeordnet.

Tab. 1: Stichprobenbeschreibung¹

	EGM		WFM	
	m	w	m	w
leistungsstark	1	2	1	2
durchschnittlich	1	1	1	1
leistungsschwach	1	1	1	1

3.2. Akzeptanzbefragung

Die Interviews basieren auf der Methode der Akzeptanzbefragung (Jung, 1992; Wodzinski & Wiesner,

1996), die sich aus der Kombination einer physikalischen Erklärung und semistrukturierten leitfadengestützten Einzelinterviews zusammensetzt.

Das Ziel liegt darin herauszufinden, inwieweit eine physikalische Erklärung von Lernenden akzeptiert wird und inwiefern Lernende ein physikalisches Konzept verstehen und anwenden können. Dafür wird zu Beginn eine fachliche Erklärung eines Konzepts des einfachen Stromkreises von der interviewenden Person gegeben, wobei der instruktive Charakter darauf abzielt, der Entstehung von Ad-hoc-Annahmen bei den Lernenden entgegenzuwirken (Wodzinski & Wiesner, 1996). Auf die Erklärung folgen drei Interviewschritte: Zuerst werden die Lernenden nach ihrer Akzeptanz gefragt (z. B. „Wie findest du diese Erklärung? Ist irgendetwas daran komisch oder unverständlich?“). Als Zweites werden die Teilnehmenden nach einer Paraphrase der Erklärung gefragt (z. B. „Kannst du die Erklärung mit deinen eigenen Worten wiederholen?“) und sie sollen im dritten Schritt Anwendungsaufgaben durch das Anwenden des Konzepts lösen (Jung, 1992). Dieser Vierschritt aus Erklärung, Akzeptanz, Paraphrase und Anwendungsaufgabe wird zyklisch mit unterschiedlichen Konzepten durchgeführt. Die Methode der Akzeptanzbefragung ermöglicht es die Akzeptanz und das Verständnis physikalischer Konzepte durch die Lernenden inklusive spezifischer Verständnisschwierigkeiten zu identifizieren, zu analysieren sowie Schwierigkeiten einzelner Aspekte der Erklärungen (z. B. anhand der Modelle) detailliert zu evaluieren (Wodzinski & Wiesner, 1996). Jung (1992) betont, dass sich die Methode insbesondere dazu eignet, Verständnisschwierigkeiten bzw. Lernendenvorstellungen zu identifizieren und der Frage nachzugehen, wie mit diesen umgegangen werden kann.

3.3. Interviewstruktur

Die Erklärungen innerhalb der Akzeptanzbefragung zielen auf zentrale Konzepte des elektrischen Stromkreises, beispielsweise die Spannung als Potentialdifferenz, ab. Dabei wurde mit Blick auf die Sachstruktur ein Potentialansatz verfolgt (Cohen et al., 1983; Herrmann & Schmälzle, 1984; Psillos et al., 1988): Ausgehend vom elektrischen Potential wird der Differenzcharakter der elektrischen Spannung als

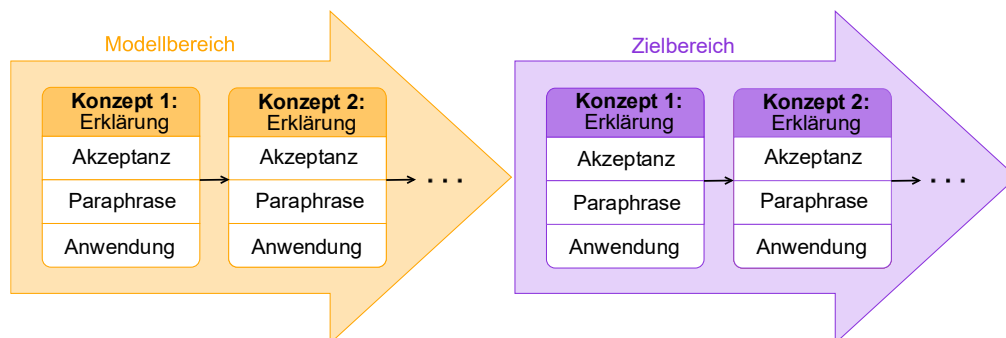
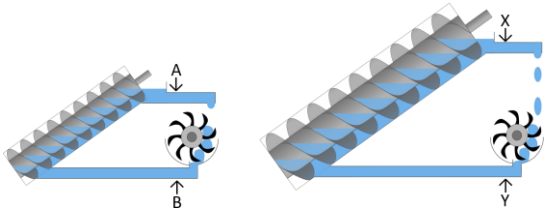


Abb. 3: Verlaufsplan der Interviews (eigene Darstellung)

¹EGM = Elektronengasmodell, WFM = Wasserfallmodell, m = männlich, w = weiblich

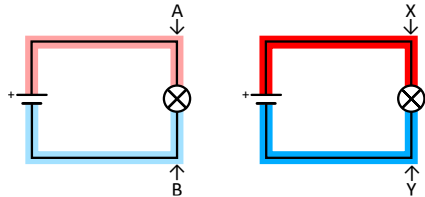
Die abgebildeten Wasserkreisläufe enthalten jeweils das gleiche Wasserrad, aber unterschiedliche Schrauben. In der linken Abbildung ist eine kleine Schraube, in der rechten Abbildung eine große Schraube verbaut.



Der **Höhenunterschied** zwischen den Punkten A und B (linke Abbildung) ist kleiner als der **Höhenunterschied** zwischen den Punkten X und Y (rechte Abbildung). Welche Aussage zum **Wasserstrom** ist richtig?

- A) Der **Wasserstrom** am Punkt A ist größer als der **Wasserstrom** am Punkt X.
- B) Der **Wasserstrom** am Punkt A ist kleiner als der **Wasserstrom** am Punkt X.
- C) Der **Wasserstrom** am Punkt A ist gleich groß wie der **Wasserstrom** am Punkt X.

Die abgebildeten Stromkreise enthalten jeweils das gleiche Lämpchen aber unterschiedliche Batterien. In der linken Abbildung ist eine schwache Batterie, in der rechten Abbildung eine starke Batterie verbaut.



Der **elektrische Druckunterschied** zwischen den Punkten A und B (linke Abbildung) ist kleiner als der **elektrische Druckunterschied** zwischen den Punkten X und Y (rechte Abbildung). Welche Aussage zum **elektrischen Strom** ist richtig?

- A) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist größer als der **elektrische Strom** am Punkt X.
- B) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist kleiner als der **elektrische Strom** am Punkt X.
- C) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist gleich groß wie der **elektrische Strom** am Punkt X.

Abb. 4: Anwendungsaufgabe im Wasserfallmodell und im Elektronengasmodell (eigene Darstellung)

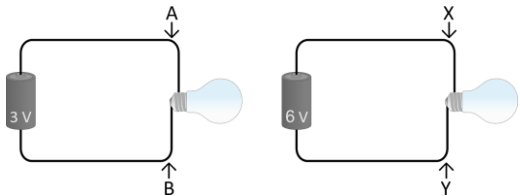
Potentialdifferenz eingeführt. Nach anschließender Einführung des elektrischen Stroms wird die Relation beider Grundgrößen Spannung und Stromstärke in unterschiedlichen Situationen, beispielsweise einem offenen Stromkreis oder einer Parallelschaltung, behandelt.

Inhaltlich gliedern sich die Akzeptanzbefragungen in zwei parallele Teile: Im ersten Teil wird der Modellbereich behandelt und im zweiten Teil der Stromkreis als Zielbereich. Abbildung 3 veranschaulicht die Zweiteilung in Modellbereich (gelb) und Zielbereich (lila). Die Zweiteilung dient dazu, das Verständnis zentraler Konzepte innerhalb eines Modells sowie das Verständnis entsprechender Konzepte im einfachen Stromkreis zu unterscheiden, getrennt zu analysieren und vergleichend zu betrachten.

Im ersten Teil werden grundlegende Konzepte innerhalb eines Modells – entweder dem Elektronengas- oder dem Wasserfallmodell – erörtert. Beispielsweise ist der Höhenunterschied im Wasserfallmodell für den Wasserstrom verantwortlich, während der elektrische Druckunterschied im Elektronengasmodell eine Voraussetzung für den elektrischen Strom ist. Im zweiten Teil werden die analogen Konzepte im einfachen Stromkreis unter Rückbezug zum Modell thematisiert. Beispielsweise ist im Stromkreis die elektrische Spannung als Potentialdifferenz mit der Höhendifferenz im Wasserfallmodell sowie der elektrischen Druckdifferenz des Elektronengasmodells vergleichbar. So ähnlich wie der Höhenunterschied für den Wasserstrom und der elektrische Druckunterschied für den elektrischen Strom verantwortlich sind, bildet die elektrische Spannung eine Voraussetzung für den elektrischen Strom. Der Aufbau sowie der physikalische Inhalt beider in Abbildung 3

dargestellten Interviewteile ist analog gehalten. Wird beispielsweise in einer Erklärung im Modellbereich die Relation des Höhenunterschieds mit dem Wasserstrom bzw. des elektrischen Druckunterschieds mit der elektrischen Stromstärke behandelt, wurde an gleicher Stelle im Zielbereich der Zusammenhang von Potentialdifferenz und Stromstärke thematisiert. Exemplarisch ist eine Anwendungsaufgabe zum Zusammenhang von Spannung und Stromstärke in Abbildung 5 bzw. deren Analogon in beiden Modellbereichen in Abbildung 4 dargestellt. Zu Beginn der Anwendungsaufgabe wird den Schüler:innen eine

Die abgebildeten Stromkreise enthalten jeweils das gleiche Lämpchen aber unterschiedliche Batterien. In der linken Abbildung ist eine schwache Batterie, in der rechten Abbildung eine starke Batterie verbaut.



Der **Potentialunterschied** zwischen den Punkten A und B (linke Abbildung) ist kleiner als der **Potentialunterschied** zwischen den Punkten X und Y (rechte Abbildung). Welche Aussage zum **elektrischen Strom** ist richtig?

- A) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist gleich groß wie der **elektrische Strom** am Punkt X.
- B) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist größer als der **elektrische Strom** am Punkt X.
- C) Der **elektrische Strom** am Punkt A ist kleiner als der **elektrische Strom** am Punkt X.

Abb. 5: Anwendungsaufgabe im Stromkreis (eigene Darstellung)

Abbildung des Sachverhalts im Modell bzw. im elektrischen Stromkreis vorgelegt, die Aufgabe beschrieben und dann mögliche physikalische Antworten durch die interviewende Person präsentiert, aus denen die Lernenden wählen und dies begründen sollen. Die Darstellung der Lämpchen ist unabhängig von der Stromstärke gewählt.

3.4. Auswertung

Durchschnittlich dauerten die Interviews 47 Minuten, was etwa einer Schulstunde entspricht, wobei das kürzeste Interview 35 Minuten, das längste 62 Minuten in Anspruch nahm.

Die Codierung basiert auf deduktiv festgelegten Kategorien. Dabei werden zur Evaluation der Akzeptanz die ordinalskalierten Kategorien „uneingeschränkt akzeptiert“, „akzeptiert mit Einschränkungen“ und „nicht akzeptiert“ angewandt. Analog werden die Paraphrase und die Anwendungsaufgaben mit „korrekt paraphrasiert/ gelöst“, „teilweise korrekt paraphrasiert/ gelöst“ oder „nicht korrekt paraphrasiert/ gelöst“ codiert.

Die Doppeltcodierung von 20 % der Interviews durch eine unabhängige Person ergab eine Inter-coder-Übereinstimmung von $\kappa = .81$ (Brennan & Prediger, 1981), was einer sehr guten Übereinstimmung entspricht (Kuckartz & Rädiker, 2022).

4. Ergebnisse

Entsprechend Forschungsfrage I werden im Folgenden zunächst die Ergebnisse des ersten Teils der Akzeptanzbefragung, welcher sich auf die Akzeptanz und das Verständnis des Modells bezieht, berichtet. Anschließend werden die Ergebnisse zu Forschungsfrage II zum Konzeptverständnis des Stromkreises vorgestellt.

4.1. FF I: Akzeptanz, Paraphrase und Anwendungsaufgaben im Modell

Die Ergebnisse der Akzeptanz- und Paraphrastufen beider Modelle sind in Abbildung 6 farbcodiert dargestellt. Angelehnt an ein „Ampelsystem“ (Morris & Hopf, 2022, S. 2) entspricht Grün einer uneingeschränkten Akzeptanz der Erklärung seitens der Lernenden, Gelb stellt eine Akzeptanz mit Einschränkungen dar und Rot signalisiert, dass die Erklärung nicht angenommen wurde. Hinsichtlich der Paraphrase beschreibt Grün, dass die Erklärung korrekt, Gelb, dass teilweise korrekt und Rot, dass nicht korrekt paraphrasiert wurde. Die Benennung der einzelnen Konzepte im Modell orientiert sich dabei an der analogen Größe im Stromkreis, beispielsweise beschreibt der „Potentialunterschied“ je nach Modell den elektrischen Druckunterschied bzw. den Höhenunterschied.

Wie Abbildung 6 zu entnehmen ist, stoßen die Erklärungen der einzelnen Konzepte sowohl im Elektronengasmodell als auch im Wasserfallmodell bei den meisten Lernenden auf Akzeptanz. Unterschiede zeigen sich hingegen bei der Paraphrase. Insbesondere scheinen Lernende im Elektronengasmodell etwas mehr Schwierigkeiten mit der Paraphrase der Inhalte des Abschnitts „Einführung“ zu haben, in welchem Bauteile wie Lämpchen und Batterien und deren Darstellung eingeführt wurden, als Lernende, die hier eine Erklärung auf Basis des Wasserfallmodells erhalten haben. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass Lernende mit den entsprechenden Begriffen und Darstellungen des Wasserfallmodells (z. B. „Wasserrad“ oder „Schraube“) vertrauter sind als mit den im Elektronengasmodell genutzten technisch-physikalischen Begriffen und Schaltzeichen (z. B. „Lämpchen“ oder „Batterie“).

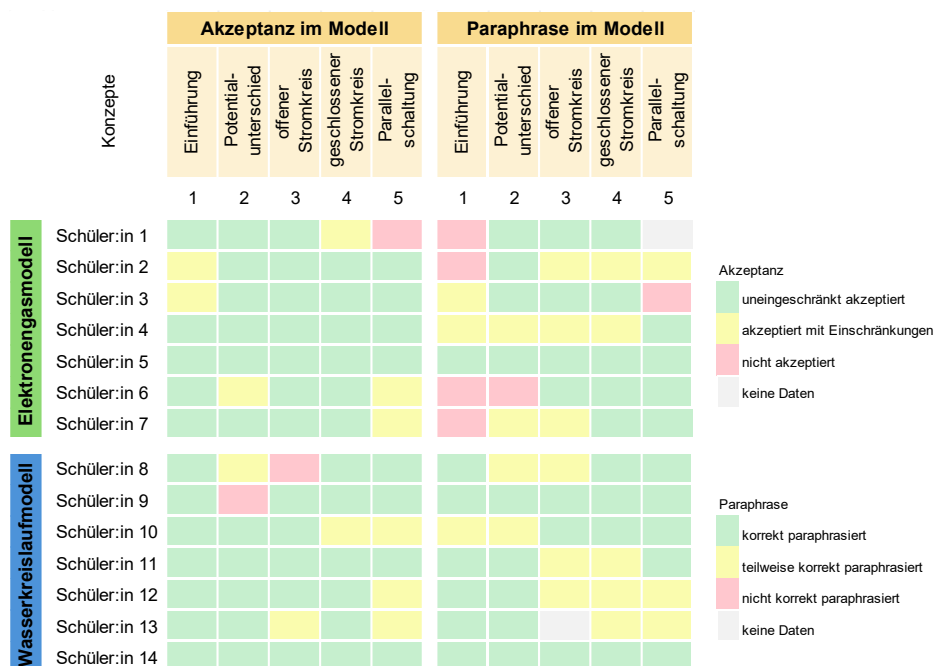


Abb. 6: Farbcodierte Ergebnisse der Akzeptanz sowie der Paraphrase der Erklärungen im Elektronengas- und Wasserfallmodell (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse der Anwendungsaufgaben sind in Abbildung 7 gezeigt. Entsprechend der zeitlichen Abfolge in den Akzeptanzbefragungen zeigt die linke Seite je zwei Anwendungsaufgaben je Konzept im Modell, die rechte Seite die entsprechenden Aufgaben und Konzepte im Stromkreis. Pro Zeile sind die Antworten einer:s Lernenden dargestellt, wobei Schüler:in 1-7 dem Elektronengasmodell und Schüler:in 8-14 dem Wasserfallmodell zuzuordnen sind. Die Antworten der Schüler:innen bei den Anwendungsaufgaben zu den Modellen sind vor allem mit Blick auf die zur Spannung analogen Größen, d. h. dem elektrischen Druckunterschied sowie dem Höhenunterschied vielversprechend: In beiden Modellen ist ein Großteil der Lernenden in der Lage, die Druck- bzw. Höhenunterschiede innerhalb eines einfachen Kreislaufs (vgl. Anwendungsaufgabe 2b (links) in Abbildung 7), wie er beispielsweise in Abbildung 2 dargestellt ist, aber auch in Parallelschaltungen (vgl. Anwendungsaufgabe 5a (links) in Abbildung 7) auf einfache Fragestellungen anzuwenden.

Hingegen zeigt sich ein wesentlicher Unterschied im Verständnis der Modelle hinsichtlich der Stromstärke in einem geschlossenen Stromkreis (vgl. Anwendungsaufgabe 4b (links) in Abbildung 7): Die Mehrheit der Lernenden, die anhand des Elektronengasmodells angeleitet wurde, hat Schwierigkeiten die Stromstärke „vor“ und „hinter“ einem Lämpchen korrekt als gleich groß zu erkennen. Viele Lernende sagen stattdessen, dass die Stromstärke vor der Lampe größer sei als dahinter, was womöglich jedoch auf eine begriffliche bzw. konzeptionelle Vermischung des Potenzial- und Stromstärkebegriffs und nicht zwangsläufig auf eine Stromverbrauchsvorstellung hindeutet.

Im Gegensatz dazu erkennen im Wasserfallmodell beinahe alle Lernenden, dass die Wasserstromstärke durch das Wasserrad nicht verändert wird (vgl. Anwendungsaufgabe 4b (links) in Abbildung 7), denn „das ist ja immer ein Kreislauf und das Wasser, wo mal hier [unten] ist, ist auch mal hier oben“ (Schüler:in 11, Pos. 37). Diese Argumentation des Kreislaufs wird von weiteren Lernenden angeführt, beispielsweise argumentiert Schüler:in 13: „Es ist ja immer der gleiche Kreislauf und die Menge ist gleich. Das wird ja nicht einmal mehr und einmal weniger oben und unten“ (Pos. 55).

In Parallelschaltungen scheint die Stromstärke für die Lernenden insgesamt im Vergleich zur Spannung die schwierigere Größe darzustellen (vgl. Anwendungsaufgabe 5b (links) in Abbildung 7). Im Elektronengasmodell sind die Lernenden eher in der Lage die Stromstärken korrekt anzugeben, allerdings fallen die Begründungen häufig unvollständig oder physikalisch inkorrekt aus. Beim Wasserfallmodell argumentieren mehrere Lernende anhand der Aufteilung des konstanten Wasserstroms auf parallel geschaltete Wasserräder – analog zur Lernendenvorstellung der „konstanten Stromquelle“ im elektrischen Stromkreis.

4.2. FF II: Anwendungsaufgaben im Stromkreis

Betrachtet man die Antworten auf die Anwendungsaufgaben im Stromkreis (Abbildung 7 rechts), zeigen sich teilweise Parallelen zu den Ergebnissen in den Modellen (Abbildung 7 links). Einerseits sind beispielsweise die Schwierigkeiten mit dem Strom in einem geschlossenen Stromkreis, die bereits im Elektronengasmodell beobachtet wurden, bei dieser Gruppe auch im Stromkreis zu sehen. Ähnlich treten

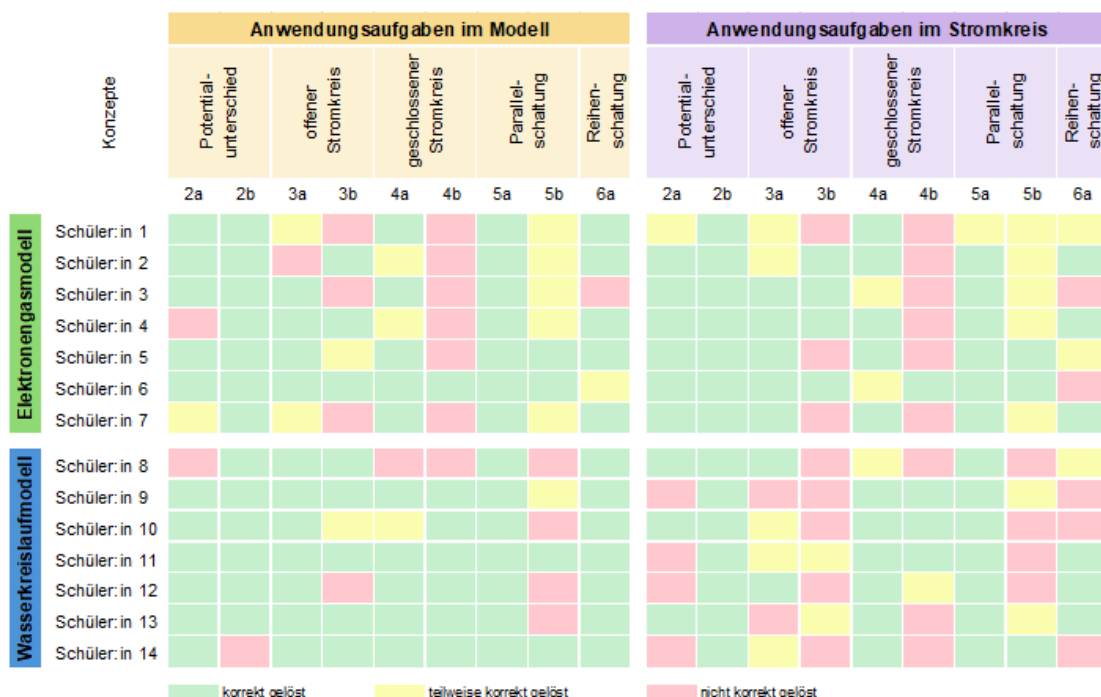


Abb. 7: Farbcodierte Ergebnisse der Anwendungsaufgaben im Elektronengas- und Wasserfallmodell sowie im einfachen Stromkreis (eigene Darstellung)

die Schwierigkeiten mit Parallelschaltungen vor allem bei der Wasserfallgruppe erneut auf.

Andererseits zeigen sich mit Blick auf den Analogieschluss zwischen dem Elektronengas- und dem Wasserfallmodell Unterschiede: Während bei den Anwendungsaufgaben im Modellbereich beim Wasserfallmodell weniger Schwierigkeiten aufgetreten sind als im Elektronengasmodell, haben Lernende, die auf Basis des Elektronengasmodells instruiert wurden, im Zielbereich weniger Schwierigkeiten als ihre Peers, die zuvor auf Basis des Wasserfallmodells unterrichtet wurden.

5. Diskussion

Basierend auf der Literatur sind beide Modelle grundsätzlich geeignet die elektrische Spannung, die Lernenden häufig Schwierigkeiten bereitet (Ivanjek et al., 2021), und ihren Differenzcharakter zu veranschaulichen (Burde, 2018; Burde & Gottschlich, 2022). Die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung bestätigen diese Einschätzungen.

Die ähnlichen Ergebnisse des Modell- und Zielbereichs im Elektronengasmodell mit Blick auf die Anwendungsaufgaben deuten darauf hin, dass den Lernenden der Analogieschluss hier leichter fällt. Zurückzuführen ist dies möglicherweise darauf, dass der Übergang vom Wasserfallmodell hin zum Stromkreis eine größere Transferleistung seitens der Lernenden erfordert als bei einer Instruktion auf Basis des Elektronengasmodells, das eine größere Ähnlichkeit zu den Oberflächenstrukturen zum Stromkreis hat. Hingegen kann das bessere Verständnis des Modellbereichs im Wasserfallmodell möglicherweise auf die größere Vertrautheit der Lernenden hiermit zurückgeführt werden.

Ferner werfen die Akzeptanzbefragungen die Frage nach Lernendenvorstellungen auf. Beispielsweise beschreibt die Literatur die begriffliche und konzeptuelle Vermischung des Strom- und Spannungskonzepts als häufig vertretene Lernendenvorstellung zu einfachen Stromkreisen (Burde, 2018; Engelhardt & Beichner, 2004; von Rhöneck, 1986). Auf ähnliche Schwierigkeiten deuten unsere Ergebnisse hin, wobei der entscheidende Unterschied darin liegt, dass die Lernenden nach einer Instruktion mittels des Elektronengasmodells das Potential bzw. den elektrischen Druck (statt die elektrische Spannung) teils mit dem Strombegriff vermischen. Außerdem wird die Batterie von vielen Lernenden als eine konstante Stromquelle aufgefasst (Engelhardt & Beichner, 2004; Shipstone et al., 1988; Urban-Woldron & Hopf, 2012), was ähnlich im Wasserfallmodell bereits von Burde und Gottschlich (2022) als Schwäche des Modells beschrieben wurde.

Da die Lernenden erstmalig im Rahmen der Akzeptanzbefragungen mit dem Thema „einfacher Stromkreis“ in Kontakt kamen, konnten lediglich grundlegende Konzepte und Zusammenhänge in sehr einfachen Stromkreisen untersucht werden, was die

Aussagekraft der Befunde insbesondere mit Blick auf weiterführende Themen des Unterrichts einschränkt. Aufgrund der geringen Stichprobe von 14 Lernenden sind die Ergebnisse zudem nicht verallgemeinerbar.

6. Ausblick

Während die hier vorgestellten Ergebnisse der Akzeptanzbefragung bereits wertvolle Einblicke bieten, steht eine tiefergehende Analyse der Antworten der Lernenden und eine Evaluation hinsichtlich gezeigter Lernendenvorstellungen noch aus. Außerdem werden weitere Akzeptanzbefragungen mit dem Fahrradkettenmodell, dessen Fokus auf der Stromstärke liegt, einer Kombination zweier Modelle sowie einer modellfreien Vermittlung geführt. Die hier gewonnenen qualitativen Erkenntnisse bilden die Grundlage für eine anschließende empirisch-quantitative Studie zum Vergleich unterschiedlicher Stromkreismodelle.

7. Literatur

- 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>
- Brennan, R. L., & Prediger, D. J. (1981). Coefficient Kappa: Some Uses, Misuses, and Alternatives. *Educational and Psychological Measurement*, 41(3), 687–699. <https://doi.org/10.1177/001316448104100307>
- 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., Weatherby, T. S., & Kronenberger, A. (2021). An analogical simulation for teaching electric circuits: A rationale for use in lower secondary school. *Physics Education*, 56, 055010. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac03fe>
- Burde, J.-P., & Wilhelm, T. (2017). Modelle in der Elektrizitätslehre. Ein didaktischer Vergleich verbreiteter Stromkreismodelle. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 28(157), 8–13.
- Cohen, R., Eylon, B., & Ganiel, U. (1983). Potential difference and current in simple electric circuits: A study of students' concepts. *American Journal of Physics*, 51(5), 407–412. <https://doi.org/10.1119/1.13226>
- Duit, R., & Glynn, S. (1995). Analogien - Brücken zum Verständnis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 6(27), 4–10.
- Engelhardt, P. V., & Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *American Journal of Physics*, 72(1), 98–115.

- Frank, F., & Trefzger, T. (2024). Zum Einfluss der Nutzung von Modellanalogien auf das Konzeptwissen: Bericht zum Leistungsstand gymnasialer Mittelstufenschüler*innen in der Elektrizitätslehre. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1469>
- Gentner, D. (1983). Structure-Mapping: A Theoretical Framework for Analogy*. *Cognitive Science*, 7(2), 155–170. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0702_3
- Gleixner, C. (1998). *Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potential: Untersuchungen zu Lernprozessen in der elementaren Elektrizitätslehre*. Ludwig-Maximilians-Universität München.
- 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.
- Hindriksen, A., Kahnt, M., & Berger, R. (2023). Lernwirksamkeit von Analogiemodellen zum elektrischen Potenzial. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1340>
- Ivanjek, L., Morris, L., Schubatzky, T., Hopf, M., Burde, J.-P., Haagen-Schützenhöfer, C., Dopatka, L., Spatz, V., & Wilhelm, T. (2021). Development of a two-tier instrument on simple electric circuits. *Physical Review Physics Education Research*, 17(2), 020123. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEduRes.17.020123>
- Jung, W. (1992). Probing Acceptance, A Technique for Investigating Learning Difficulties. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Hrsg.), *Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies* (S. 278–295).
- 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.
- Kuckartz, U., & Rädiker, S. (2022). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung: Grundlagentexte Methoden* (5. Auflage). Beltz Juventa.
- Leibfarth, K., Gottschlich, B., & Burde, J.-P. (2024). Modelle des einfachen Stromkreises in der Sekundarstufe I in Baden-Württemberg. *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. <https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1449>
- Morris, L., & Hopf, M. (2022). Energieübertragung in elektrischen Systemen mithilfe von elektromagnetischen Feldern erklären. https://www.gdcp-ev.de/wp-content/tb2022/TB2022_556_Morris.pdf
- Müller, R., & Mandler, J. (2022). Stromkreise besser verstehen mit Potenzial und Bikepark-Analogie. *plusLucis*, 2, 8–13.
- Oh, P. S., & Oh, S. J. (2011). What Teachers of Science Need to Know about Models: An overview. *International Journal of Science Education*, 33(8), 1109–1130. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.502191>
- Psillos, D., Tiberghien, Andrée, & and Koumaras, P. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching sequence on DC circuits. *International Journal of Science Education*, 10(1), 29–43. <https://doi.org/10.1080/0950069880100104>
- Schubatzky, T. (2020). *Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht: Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*. Logos Verlag Berlin. <https://doi.org/10.30819/5159>
- 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., & Schilling, P. (1983). Schülervorstellungen zu Wasserstromkreisen. *physica didactica*, 10(3/4), 172–183.
- Shipstone, 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>
- Urban-Woldron, H., & Hopf, M. (2012). Entwicklung eines Testinstruments zum Verständnis in der Elektrizitätslehre. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 201–227.
- von Rhöneck, C. (1986). Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 34(13), 10–14.
- Wodzinski, R. (2013). Lernhilfe oder Lernhinder-nis?: Modelle von Leitungsvorgängen in Stromkreisen unter der Lupe. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 23(133), 12–16.
- Wodzinski, R., & Wiesner, H. (1996). Akzeptanzbefragungen als Methode zur Untersuchung von Lernschwierigkeiten und Lernverläufen. In R. Duit & C. von Rhöneck (Hrsg.), *Lernen in den Naturwissenschaften: Beiträge zu einem Workshop an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg* (S. 250–274).