

---

# **ENERGIE UND FELDER VERBINDEN**

Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes für den  
Anfangsunterricht Physik

---

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von  
Kristin Fiedler

Kiel, 2023

Erstgutachter: Prof. Dr. Knut Neumann

Zweitgutachter: Prof. Dr. Jeffrey Nordine

Tag der mündlichen Prüfung: 30.11.2023

Für  
Mama und Papa



## ZUSAMMENFASSUNG

Energie ist ein zentrales Konzept der Physik. Studien zeigen jedoch, dass Schülerinnen und Schüler häufig kein tiefgehendes Verständnis des Energiekonzeptes entwickeln. Besonders die potentielle Energie bereitet ihnen Schwierigkeiten. Schülerinnen und Schüler sind häufig von der großen Anzahl unterschiedlicher Formen der potentiellen Energie überfordert. Sie verwenden diese in der Folge als eine Art Etikett für bestimmte Situationen, entwickeln aber häufig kein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie. Ein konzeptionelles Verständnis, bei dem es den Schülerinnen und Schülern gelingt, alle Formen der potentiellen Energie auf wenige zugrunde liegende Prinzipien zurückzuführen, ist jedoch Voraussetzung dafür, dass sie das Energiekonzept als Ganzes verstehen und es auch im fortgeführten Lernen zur Erklärung von Phänomenen anwenden können.

In der Literatur wird intensiv diskutiert, ob die Einbeziehung des Feldkonzeptes die Schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler mit der potentiellen Energie adressieren kann. Hinsichtlich einer praktischen Umsetzung dieser Idee liegen bisher nur eingeschränkt Erkenntnisse vor. Die vorliegende Arbeit setzt diese Idee in die Praxis um. Es wurden zwei Unterrichtseinheiten – eine einführende Einheit und eine Einheit zum fortgeführten Lernen über Energie – entwickelt, die Felder bei den potentiellen Energieformen einbeziehen. Die Lernwirksamkeit des Unterrichtsansatzes wurde in zwei Durchgängen empirisch untersucht. Der erste Durchgang fand im Schuljahr 2018/2019 mit Schülerinnen und Schülern der 6. Klasse und der zweite Durchgang als Replikationsstudie im Schuljahr 2020/2021 mit Schülerinnen und Schülern der 7. Klasse statt.

Die Ergebnisse des ersten Durchgangs zeigen zunächst, dass es für Schülerinnen und Schüler schwierig sein kann, zwei Konzepte – Energie und Felder – zur gleichen Zeit zu erlernen. Nach der einführenden Einheit zur Energie haben sich die erhofften Effekte nicht eingestellt, und die Schülerinnen und Schüler, die mit Feldern unterrichtet wurden, haben im Vergleich schlechter in einem Energietest abgeschnitten als Schülerinnen und Schüler, die traditionell, ohne Felder unterrichtet wurden. Im fortgeführten Lernen zeigt sich jedoch, dass die Einbeziehung von Feldern die Schülerinnen und Schüler langfristig dabei unterstützen kann, Energie besser zu verstehen. Auf der Basis der Ergebnisse des ersten Durchgangs wurden die Unterrichtseinheiten überarbeitet, um den Schülerinnen und Schülern das gleichzeitige Erlernen von Energie und Feldern zu erleichtern. Die Ergebnisse der Replikationsstudie zeigen, dass Felder ein tiefgehendes Verständnis von Energie und insbesondere ein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie auch bereits in einer einführenden Einheit bewirken können und sich – wie bereits im ersten Durchgang – auch positiv auf das fortgeführte Lernen über Energie auswirken können. Die Schülerinnen und Schüler haben unter der Einbeziehung von Feldern Wissensnetzwerke aufbauen können, die viele relevante Ideen zum Energiekonzept enthalten, die stark miteinander verknüpft sind. Ein derartig strukturiertes Wissensnetzwerk ist Voraussetzung für erfolgreiches Lernen.

## **ABSTRACT**

Energy is a central concept in physics. However, studies show that students often do not develop a deep understanding of the energy concept. Especially potential energy is difficult for them. Students are often overwhelmed by the great number of different forms of potential energy. They use them as a kind of label for certain situations, but often do not develop a conceptual understanding of potential energy. However, a conceptual understanding in which students successfully relate all forms of potential energy to a few underlying principles is a prerequisite for them to understand the energy concept as a whole and also to be able to apply it in continued learning to explain phenomena.

There is much discussion in the literature about whether incorporating the fields concept can address students' difficulties with potential energy. With regard to practical implementation of this idea, only limited findings are available so far. This doctoral study puts this idea into practice. Two teaching units - an introductory unit and a unit for continued learning about energy - were developed that incorporate fields in potential energy forms. The learning outcomes of the teaching approach were empirically investigated in two cycles. The first cycle took place in the 2018/2019 school year with grade 6 students and the second cycle as a replication study in the 2020/2021 school year with grade 7 students.

The results of the first cycle initially show that it can be difficult for students to learn two concepts - energy and fields - at the same time. After the introductory unit on energy, the desired effects did not occur and students who were taught with fields performed worse in an energy test than students who were taught traditionally, without fields. However, the continued learning demonstrated that the inclusion of fields can support students to better understand energy in the long-term. Based on the results of the first cycle, the instructional units were revised to make it easier for students to learn about energy and fields at the same time. The results of the replication study show that fields can provide students with a deeper understanding of energy and in particular a conceptual understanding of potential energy even in an introductory unit and, as in the first cycle, can also have a positive impact on continued learning about energy. With the inclusion of fields, students have been able to build knowledge networks that hold many relevant ideas about the energy concept that are strongly interconnected. Such a structured knowledge network is a prerequisite for successful learning.

# INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG.....	i
ABSTRACT .....	ii
<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
Entwicklung eines Energieverständnisses.....	2
Unterrichtsansätze mit Fokus auf Energieformen .....	3
Unterrichtsansätze mit Fokus auf der einheitlichen Natur der Energie .....	5
Felder als zentrales Konzept .....	7
<b>ZIEL DER ARBEIT UND ZUSAMMENFASSUNG DER STUDIEN.....</b>	<b>11</b>
Entwicklung einer Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern.....	11
Forschungsschwerpunkte.....	13
PUBLIKATION 1: Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept.....	13
PUBLIKATION 2: Fields in middle school energy instruction to support continued learning of energy.....	14
PUBLIKATION 3: Supporting learning about energy with fields – Evidence from a mixed- methods study.....	15
PUBLIKATION 4: Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Eine Unterrichtseinheit zur Einführung des Energiekonzeptes mit Feldern .....	16
<b>PUBLIKATION 1 .....</b>	<b>17</b>
Einleitung.....	19
Theoretischer Hintergrund.....	20
Förderung des Verständnisses der potentiellen Energie durch Felder .....	21
Verständnis und Verständnisschwierigkeiten beim Lernen über Felder .....	23
Ziel und Forschungsfragen .....	24
Methode.....	26
Stichprobe .....	27
Interventionen.....	27
Instrumente.....	34
Ergebnisse .....	36
Forschungsfrage 1: Vergleich des Energieverständnisses .....	37
Forschungsfrage 2: Moderation des Effektes durch das Felderverständnis.....	38
Diskussion.....	40
Limitationen .....	42
Fazit und Ausblick.....	43

<b>PUBLIKATION 2</b> .....	<b>45</b>
Introduction.....	46
Theoretical background .....	46
Learning about energy .....	46
Promoting continued learning about energy with fields.....	48
Research question.....	50
Methods .....	51
Research design and sample .....	51
The instructional units.....	53
Instruments .....	56
Data Analysis .....	57
Results .....	58
Discussion.....	61
<b>PUBLIKATION 3</b> .....	<b>63</b>
Introduction.....	64
Theoretical background .....	65
Understanding potential energy .....	65
Promoting understanding of (potential) energy with fields .....	66
Research questions .....	69
Methods .....	69
The instructional units.....	70
Instruments .....	73
Participants.....	75
Data analysis.....	76
Results .....	79
RQ1 a): Comparison of students' understanding of energy in the introductory unit .....	80
RQ1 b): Comparison of students' understanding of energy in the continued learning unit .....	81
RQ2: Students' knowledge networks about energy .....	82
Discussion.....	86
<b>PUBLIKATION 4</b> .....	<b>91</b>
Einleitung.....	92
1. Verständnisschwierigkeiten mit der potentiellen Energie.....	92
2. Potentielle Energie mithilfe von Feldern greifbar machen.....	93
2.1 Die Wirkung der potentiellen Energie sichtbar machen.....	94
2.2 Die Wirkung der potentiellen Energie fühlbar machen .....	96

3. Eine Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern.....	96
3.1 Einführung der magnetischen Energie und des Magnetfeldes als Speicherort der magnetischen Energie .....	97
3.2 Einführung der Lageenergie und des Gravitationsfeldes als Speicherort der Lageenergie .....	99
3.3 Evaluierung der Unterrichtseinheit in einer Vergleichsstudie mit dem traditionellen Unterricht .....	102
<b>GESAMTDISKUSSION UND IMPLIKATIONEN.....</b>	<b>103</b>
Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....	103
Implikationen für die Forschung .....	108
Implikationen für die Praxis .....	111
Conclusio .....	112
<b>LITERATUR.....</b>	<b>113</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>123</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>125</b>
<b>ANHANG.....</b>	<b>127</b>



## **EINLEITUNG**

Dürre, Waldbrände und Extremwetterlagen: Die Folgen der Klimakrise sind in Europa schon jetzt deutlich zu spüren (Latif, 2023).

Wir brauchen den sofortigen Kohleausstieg und die erneuerbaren Energien müssen ausgebaut werden (Lesch, 2019).

Denn wir sind gut durch diesen Winter gekommen, auch ohne russische Gaslieferungen. [...] Eine enorme Hilfe ist dabei, dass die Bürgerinnen und Bürger weiter Energie sparen. Viele bauen sich zu Hause Wärmepumpen und Solaranlagen ein, andere haben das vor (Scholz, 2023).

Die Klimakrise, die Energiewende und der damit verbundene Kohleausstieg, die Sorgen um die Sicherstellung der Energieversorgung im Winter 2022/23 nach Ausbruch des Ukrainekriegs - aktuelle Krisen unserer Gesellschaft sind untrennbar mit dem Energiekonzept verknüpft (Mittenzwei et al., 2019; Smil, 2003, 2006, 2010). Um die Ursachen der Erderwärmung nachvollziehen zu können, müssen Energieströme in und aus unserer Atmosphäre bilanziert werden. Mit dem Ziel, die Erwärmung der Atmosphäre durch den Ausstoß großer Mengen an Treibhausgasen durch die Nutzung fossiler Energieträger wie der Kohle einzudämmen, vollzieht sich in unserer Gesellschaft der Energiewandel hin zur Nutzung erneuerbarer Energien. Um beurteilen zu können, ob ein Energieträger nachhaltig ist, muss unter anderem bestimmt werden, wie hoch der Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung ist, also wieviel der für die Umwandlung aufgewendeten Energie nach der Umwandlung auch genutzt werden kann. Die Dringlichkeit der Abkehr von fossilen Brennstoffen wie dem Erdgas wurde durch den drohenden Stopp der Gaslieferungen aus Russland noch einmal unterstrichen. Die Bundesregierung strebt an, dass jede neu eingebaute Heizung ab 2024 mit mindestens 65 Prozent erneuerbarer Energie betrieben wird (Bundesregierung, 2023). Zur Beurteilung des Beitrags einer Umstellung auf Wärmepumpen zur Eindämmung der Klimakrise bedarf es einer Abschätzung des Wirkungsgrades der Wärmepumpe, der für das Heizen mit Heizkörpern aufgrund ggf. hoher Vorlauftemperaturen im Vergleich zu einer Heizflächenauslegung über die Fußbodenheizung niedrig ausfallen kann.

Für viele Schülerinnen und Schüler hat die Eindämmung der Klimakrise eine hohe Relevanz. Sie lenken durch Klimastreiks unter dem Slogan *Fridays for Future* die Aufmerksamkeit auf die Klimakrise und ihre gravierenden Folgen. Es ist für sie dabei aber nicht nur von Bedeutung, auf die Missstände hinzuweisen, sondern vielmehr wollen sie aktiv an den Diskussionen über die und bei der Gestaltung von Lösungen mitwirken. Um die Entstehung gesellschaftlicher Krisen wie den Klimawandel zu verstehen und um an der Entwicklung von Lösungsansätzen teilhaben zu können, ist es notwendig, dass die Schülerinnen und Schüler ein Verständnis des

Energiekonzeptes entwickeln. Ein Verständnis des Energiekonzeptes befähigt sie nicht nur dazu, die Ursachen der Klimakrise zu verstehen, sondern auch dazu, wissenschaftsbasierte Entscheidungen zu treffen (Mittenzwei et al., 2019). Diese Relevanz des Energiekonzeptes für die Gesellschaft, aber auch für die Schülerinnen und Schüler wurde von der Bildungspolitik erkannt, und deswegen findet sich die Entwicklung eines Energieverständnisses heute in vielen Rahmendokumenten als ein zentraler Teil der Kompetenzentwicklung. Energie ist eines von vier Basiskonzepten im Physik- und im Chemieunterricht sowie Teil der Basiskonzepte im Biologieunterricht der Sekundarstufe I (Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK], 2005a, 2005b, 2005c). Energie ist Teil des Basiskonzeptes „Erhaltung und Gleichgewicht“ im Physikunterricht der Sekundarstufe II (KMK, 2020), ist zentrales Konzept der Naturwissenschaften auch in anderen Ländern (Ministère de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, 2016; NGSS Lead States, 2013) und hat aufgrund seiner gesellschaftlichen Relevanz ebenfalls Einzug in die Rahmendokumente gesellschaftswissenschaftlicher Fächer erhalten, zum Beispiel im Themenbereich der nachhaltigen Entwicklung im Geographieunterricht (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2015). Da das Energiekonzept in vielen aktuellen gesellschaftlichen Kontexten relevant ist, begegnet der Energiebegriff den Schülerinnen und Schülern sehr häufig in ihrem Alltag. Sie kommen deswegen mit sehr unterschiedlichen Präkonzepten über das Energiekonzept in die Schule (Driver & Warrington, 1985; Duit, 1986; Schecker et al., 2018). Um frühzeitig eine tragfähige Vorstellung über das Energiekonzept bei den Schülerinnen und Schülern anzubahnen, fordern die Fachanforderungen in Schleswig-Holstein (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2016) und Lehrpläne in anderen Bundesländern (z.B. Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2008) eine erste einführende Einheit zum Energiekonzept bereits im Anfangsunterricht Physik.

### **Entwicklung eines Energieverständnisses**

Reinders Duits Energiequadriga (1985) identifiziert vier Aspekte des Energiekonzeptes, die sich als zentral für die Entwicklung eines Energieverständnisses erweisen: Energieumwandlung, Energietransfer, Energieentwertung und Energieerhaltung. Die Energiequadriga aus den 1980er Jahren ist weitgehend akzeptiert und wurde später noch um den Aspekt der Energieformen ergänzt. In der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung besteht heute große Einigkeit darüber, dass Schülerinnen und Schüler diese fünf Aspekte über das Energiekonzept lernen sollen (Chen et al., 2014; Doménech et al., 2001; Nordine, 2016; Solomon, 1982). Das Energieverständnis soll im Verlauf der Schulzeit in Form eines Spiralcurriculums kumulativ aufgebaut werden (Bruner, 1980; Neumann et al., 2008). In jeder fortgeschrittenen Einheit zur Energie soll neues Wissen mit dem Vorwissen verknüpft und somit in das vorhandene Wissensnetz integriert werden (Fischer, 2022; Neumann, 2017). Um zu verstehen, wie die Schülerinnen und Schüler im Verlauf ihrer Schulzeit ihr

Energieverständnis mit Blick auf die fünf Aspekte des Energiekonzeptes aufbauen, haben mehrere Studien die Entwicklung des Energieverständnisses (genannt *Learning Progression*) bei Schülerinnen und Schülern untersucht und kommen zu vergleichbaren Ergebnissen: Die Schülerinnen und Schüler verstehen zunächst, dass sich Energie in unterschiedlichen Formen manifestiert, gefolgt davon, dass Energie transformiert oder transferiert wird, gefolgt von einem Verständnis der Energieentwertung. Energieerhaltung ist der Aspekt des Energiekonzeptes, den die Schülerinnen und Schüler als letztes verstehen und mit dem sie die größten Verständnisschwierigkeiten haben. Diese Studien belegen auch, dass bis zum Ende der Sekundarstufe I nur wenige Schülerinnen und Schüler ein tiefgehendes Verständnis des Energiekonzeptes entwickeln (Driver, 1994; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013). Weitere an diese Studien anschließende Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass die Entwicklung des Energieverständnisses von der Art des Unterrichtsansatzes abhängt, mit dem Energie unterrichtet wird (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Weßnigk & Neumann, 2015). In der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung der letzten Dekaden wurde intensiv darüber diskutiert, wie Energie am besten unterrichtet werden kann (Doménech et al., 2007). Energie wird in Lehrwerken traditionell im Zusammenhang mit dem Begriff der Arbeit eingeführt (Halliday et al., 2018; Tipler et al., 2019) oder überhaupt erst über die Arbeit definiert (Demtröder, 2015). Auch im Physikunterricht in der Schule wurde Energie lange als die „Fähigkeit, Arbeit zu verrichten“ in mechanischen Kontexten eingeführt (Driver & Millar, 1986; Duit, 1984, 2014; Warren, 1982). Dieser Ansatz wurde jedoch kritisiert, weil mit dem Begriff der Arbeit die Behandlung des Energiekonzeptes zu stark auf den Bereich der Mechanik eingegrenzt erscheint (Lehrman, 1973; Papadouris & Constantinou, 2016). Heute lassen sich zwei große Gruppen von Unterrichtsansätzen unterscheiden, die in der Literatur beschrieben werden: Unterrichtsansätze, die Energie als eine sich in Energieformen manifestierende Größe einführen, und Unterrichtsansätze, die Energieformen explizit vermeiden und stattdessen die einheitliche Natur der Energie in den Fokus rücken.

### **Unterrichtsansätze mit Fokus auf Energieformen**

Der auf Energieformen basierende Unterrichtsansatz hat seinen Ursprung in den 1970er Jahren. Backhaus und Schlichting (1979) schlagen vor, den Energiebegriff gänzlich vom Begriff der Arbeit zu lösen und Energie stattdessen als eine Größe einzuführen, die sich in unterschiedlichen Formen (zum Beispiel kinetische Energie, chemische Energie, elektrische Energie, thermische Energie) manifestiert. Dieser Unterrichtsansatz, der auf Energieformen basiert, wird Formenansatz genannt. In diesem Unterrichtsansatz können die Schülerinnen und Schüler die unterschiedlichen Energieformen anhand bestimmter beobachtbarer Größen identifizieren (Harrer, 2017). So können beispielsweise die kinetische Energie an der Geschwindigkeit und die potentielle Energie an der Höhe erkannt werden. Der Formenansatz ist im heutigen Physikunterricht vorherrschend (Alboteanu et al., 2016; Burzin et al., 2021; Fortus et al., 2012) und wird häufig auch bei der Entwicklung von Curricula herangezogen

(Nordine et al., 2011; Papadouris & Constantinou, 2016). Forschungsergebnisse zeigen, dass Schülerinnen und Schüler, die mit einem Formenansatz unterrichtet wurden, erfolgreich die Energieaspekte Formen und Energieumwandlung verstehen, jedoch Schwierigkeiten mit der Energieerhaltung haben (Nordine et al., 2011; Papadouris & Constantinou, 2016). In der Literatur wird argumentiert, dass das mangelnde Verständnis der Schülerinnen und Schüler in Bezug auf die Energieerhaltung daher rührt, dass sie kein konzeptionelles Verständnis der Energieformen erwerben. Es wird vermutet, dass die Bezeichnungen der Energieformen für die Schülerinnen und Schüler nur Begriffe bleiben, die sie als eine Art Etikett in bestimmten Phänomenen nutzen, sich dabei aber nicht den Energieformen zugrunde liegenden Prinzipien gewahr werden (R. Millar, 2014; Nordine et al., 2018; Swackhamer, 2005). Dies mag dadurch verstärkt werden, dass im traditionellen Formenansatz eine Vielzahl unterschiedlicher Energieformen eingeführt wird, ohne dass Beziehungen zwischen ihnen etabliert werden. Fundamental lassen sich nämlich nur zwei Energieformen unterscheiden: Die kinetische und die potentielle Energie.

Besonders deutlich wird das Fehlen eines konzeptionellen Verständnisses der Schülerinnen und Schüler bei der potentiellen Energie (Hirça et al., 2008). Für ein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie müssen die Schülerinnen und Schüler drei zugrunde liegende Aspekte der potentiellen Energie verstehen (Coopersmith, 2015):

- (1) Potentielle Energie ist immer dann involviert, wenn Objekte auf Distanz interagieren.
- (2) Potentielle Energie ist fundamental mit Systemen verknüpft.
- (3) Potentielle Energie hängt von der Konfiguration der Systemkomponenten, also der interagierenden Objekte, ab.

Schülerinnen und Schüler haben Schwierigkeiten damit, Energie als Teil eines Systems zu konzeptualisieren (Heron et al., 2009; Lindsey et al., 2012; Quinn, 2014; van Huis & van Berg, 1993). Die Identifikation der relevanten Komponenten des Systems ist es, was es den Schülerinnen und Schülern schwer macht, potentielle Energie richtig zu verstehen. Dies äußert sich darin, dass Schülerinnen und Schüler die potentielle Energie einem einzigen Objekt zuschreiben, statt einem System aus mindestens zwei Objekten (Doménech et al., 2007). Um die potentielle Energie eines fallengelassenen Balls zu bestimmen, muss seine Position relativ zu einem anderen Objekt, zum Beispiel dem Boden oder einem Tisch, berücksichtigt werden. Die absolute Höhe des Balls vor dem Loslassen ist dafür nicht ausreichend. Diese Schwierigkeiten mit der relativen Natur der Energie treten im Besonderen bei der potentiellen Energie auf (Kurnaz & Sağlam Arslan, 2011).

Als eine von zwei fundamental verschiedenen Energieformen ist die potentielle Energie zentral für die Entwicklung eines Energieverständnisses. Jedes Phänomen weist eine Umwandlung von kinetischer Energie in potentielle Energie auf und/oder umgekehrt. Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Entwicklung eines Energieverständnisses zeigen, dass Energieformen als erstes von den Schülerinnen und Schülern gelernt werden (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013). Ohne ein Verständnis

der potentiellen Energie ist im Sinne der Learning Progression die Aneignung der weiteren Energieaspekte (Umwandlung, Transfer, Entwertung und Erhaltung) und damit das fortgeführte Lernen über Energie erschwert. Dies wirkt sich besonders auf das Verständnis der Energieerhaltung aus. Um die Energieerhaltung als Prinzip zur Vorhersage des Verhaltens von Systemen zu nutzen, ist es wichtig, alle für das System relevanten Energieformen zu berücksichtigen. Dafür müssen die Energieformen erkannt werden. Bei der kinetischen Energie fällt dies den Schülerinnen und Schülern leicht. Sie können das Vorhandensein kinetischer Energie anhand von Bewegung erkennen. Bei der potentiellen Energie fällt es ihnen jedoch schwer, sie in Phänomenen zu erkennen. Zum Beispiel sieht man einem angehobenen Ball die potentielle Energie nicht an und den Lernenden fällt es schwer nachzuvollziehen, dass auch solche nicht bewegten Systeme Energie beinhalten (Tobin et al., 2018). Wenn die Schülerinnen und Schüler jedoch Schwierigkeiten haben, potentielle Energie in Phänomenen zu erkennen, widerspricht die Energieerhaltung ihren Alltagserfahrungen. Wird ein angehobener Ball fallengelassen, scheint die kinetische Energie quasi aus dem Nichts zu kommen (Hecht, 2003). Die potentielle Energie ist nicht existent, bis sie sich in kinetische Energie umwandelt (Cooper & Klymkowsky, 2013; Lindsey et al., 2012). Damit wirkt sich das Fehlen eines konzeptionellen Verständnisses der potentiellen Energie auf das Lernen des Energiekonzeptes als Ganzes aus und erschwert das fortgeführte Lernen über Energie (Kaper & Goedhart, 2002). Die Studien zur Entwicklung des Energieverständnisses von Schülerinnen und Schülern über den Verlauf ihrer Schulzeit belegen, dass viele Lernenden bis zum Ende der Sekundarstufe I kein tiefgehendes Verständnis des Energiekonzeptes und insbesondere der Energieerhaltung erworben haben (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013). Die Verständnisschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler in Bezug auf die potentielle Energie im traditionellen Formenansatz könnten ein Grund dafür sein.

In der Literatur finden sich verschiedene Vorschläge, wie der Formenansatz modifiziert werden kann, um bei den Schülerinnen und Schülern ein tiefergehendes Verständnis der Energieformen und der Energieerhaltung zu fördern. Ellse (1988) schlägt vor, dass sich der Energieunterricht vor allem auf die zwei fundamentalen Energieformen der kinetischen und der potentiellen Energie beschränken sollte. Auch Heron et al. (2009) schlagen eine Reduzierung der Anzahl der Energieformen vor. Ähnlich argumentieren auch Constantinou und Papadouris (2012) sowie Millar (2005), indem sie für eine Unterscheidung zwischen gespeicherter Energie und prozessbezogener Energie plädieren. Diese veränderten Formenansätze wurden nicht daraufhin untersucht, ob sie ein tiefergehendes Verständnis der Energieformen bei den Schülerinnen und Schülern erwirken konnten. Eines ist jedoch allen Vorschlägen gemein: Die Fokussierung auf wenige, zentrale Aspekte des Energiekonzeptes.

### **Unterrichtsansätze mit Fokus auf der einheitlichen Natur der Energie**

Diese Idee der Reduzierung der von den Schülerinnen und Schülern zu lernenden Energieaspekte liegt auch der in der Literatur aktuell vorgeschlagenen Alternative zum

Formenansatz zu Grunde. Diese Unterrichtsansätze basieren auf einem vollständigen Verzicht auf Energieformen. Swackhamer (2005) und das *Framework for K-12 Science Education* (2012) plädieren dafür, dass in Unterrichtsansätzen die einheitliche Natur der Energie betont werden sollte. Unterrichtsansätze, die diese einheitliche Natur der Energie betonen, stützen sich häufig auf den Energietransfer als Mittel zur Beschreibung von Phänomenen (Brewer, 2011; Ellse, 1988; Falk et al., 1983; R. H. Millar, 2005; Nordine et al., 2018). Nordine et al. (2018) haben diese Idee der Fokussierung der einheitlichen Natur der Energie und des Energietransfers in ihrem so bezeichneten System-Transfer-Ansatz in einer Unterrichtseinheit für die Sekundarstufe I umgesetzt. Die Grundannahme des System-Transfer-Ansatzes ist es, dass Energie in Systemen gespeichert ist und in Phänomenen zwischen Systemen transferiert wird. Diese Fokussierung auf Energietransfer zwischen Systemen erfordert die Einführung von Feldern als System, in das Energie hineintransferiert werden kann oder aus dem Energie hinaustransferiert werden kann. In dieser Perspektive wird beim Phänomen eines fallengelassenen Balls Energie aus dem System Gravitationsfeld Erde-Ball auf das System Ball transferiert. Ergebnisse von Untersuchungen zur Lernwirksamkeit belegen, dass Schülerinnen und Schüler, die mit dem System-Transfer-Ansatz unterrichtet wurden, ein besseres Energieverständnis entwickelt haben als Schülerinnen und Schüler, die nach einem traditionellen Formenansatz unterrichtet wurden (Fortus et al., 2019; Kubsch et al., 2019; Kubsch, Opitz et al., 2021).

Ein Aspekt des System-Transfer-Ansatzes ist besonders bemerkenswert: Die Einbeziehung von Feldern. Erwies sich die Einführung von Feldern im System-Transfer-Ansatz als notwendiger Schritt zur Lokalisierung der Energie in Phänomenen, die Interaktion auf Distanz beinhalten, so haben Felder darüber hinaus eine besondere Rolle in Bezug auf die potentielle Energie. Potentielle Energie kann als die Energieform konzeptualisiert werden, die in Feldern zwischen interagierenden Objekten gespeichert ist. Felder könnten den Aufbau eines konzeptionellen Verständnisses der potentiellen Energie bewirken, denn über Felder können grundlegende Prinzipien formuliert werden, die auf alle Formen der potentiellen Energie anwendbar sind:

- (1) Felder vermitteln Interaktion auf Distanz.
- (2) Felder speichern potentielle Energie. Die Menge an gespeicherter potentieller Energie hängt von der Konfiguration der Systemkomponenten ab.

Die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie könnte den Schülerinnen und Schülern dabei helfen zu erkennen, dass potentielle Energie untrennbar mit Systemen verbunden ist. Die Anwendung der beiden Grundprinzipien der potentiellen Energie verlangt zwingend die Betrachtung von mehreren Objekten und lokalisiert die potentielle Energie in ein System aus mehreren Objekten und/oder einem Feld (Scherr et al., 2012). Ziel der Einbeziehung von Feldern bei der potentiellen Energie ist es, den Schülerinnen und Schülern die Zuordnung der großen Anzahl an vermeintlich unterschiedlichen potentiellen Energieformen zu einer der beiden Hauptenergieformen, der potentiellen Energie, zu erleichtern. Lageenergie wird nicht mehr an der Höhe, elektrische Energie nicht an

der Spannung erkannt, sondern für alle Formen der potentiellen Energie sind es die Interaktion auf Distanz von Objekten und deren Konfiguration, anhand derer die potentielle Energie erkannt und ihre Menge bestimmt werden kann.

Jede neue Energieform der potentiellen Energie, die den Schülerinnen und Schülern präsentiert wird, kann mit Hilfe von Feldern der potentiellen Energie zugeordnet werden. Neues Wissen kann folglich in das bereits vorhandene Wissensnetz integriert werden. Diesen Verständnisaufbau beschreibt die *knowledge integration perspective* (Linn, 2006). Felder könnten den Schülerinnen und Schülern dabei helfen, gut strukturierte Wissensnetzwerke zur Energie zu entwickeln, die es ihnen ermöglichen, bekannte Ideen in neuen Kontexten zu erkennen. Schülerinnen und Schüler könnten durch die Formulierung der zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie über Felder neue potentielle Energieformen leichter als solche erkennen. Dies könnte ihnen dabei helfen, ihr vorhandenes Wissen auf neue Kontexte zu übertragen (Bransford & Schwartz, 1999; diSessa & Wagner, 2005) und könnte folglich ihr fortgeführtes Lernen über Energie erleichtern. Felder sollen die Schülerinnen und Schüler von Beginn an, bei der Einführung der ersten potentiellen Energieform, beim Aufbau ihres Energieverständnisses unterstützen. Deswegen soll das Feldkonzept bereits im Anfangsunterricht zum Energiekonzept einbezogen werden.

### **Felder als zentrales Konzept**

Felder im Anfangsunterricht thematisieren zu wollen, erscheint auch losgelöst von seinem Nutzen für die Entwicklung des Energieverständnisses als sinnvoll, weil Felder wie Energie ein zentrales Konzept der Physik darstellen. Es waren Michael Faraday und James Clerk Maxwell, die im 19. Jahrhundert Interaktion auf Distanz erstmalig auf Felder zurückführten und diese als reale physikalische Größe definierten (Faraday, 1852; Maxwell & Niven, 2010). Heute sind Felder als zentrales Konzept der Naturwissenschaften in Naturwissenschaftsstandards (NGSS Lead States, 2013; KMK, 2020) verankert, und die moderne Physik diskutiert darüber, ob Felder im Vergleich zu Teilchen nicht sogar das fundamentalere Konzept der Natur sind (Hobson, 2013).

Schülerinnen und Schüler lernen das Magnetfeld oft schon in der Grundschule oder im Anfangsunterricht Physik auf der weiterführenden Schule kennen. Die Behandlung beschränkt sich dabei meist auf die Darstellung von Feldlinienbildern. Die Feldliniendichte an den Polen eines Stabmagneten dient der Erklärung, dass Gegenstände aus Eisen dort am stärksten angezogen werden (Burzin et al., 2021). Abgesehen von diesem Beispiel, werden Felder kaum zur Erklärung von Phänomenen herangezogen, sie bleiben weitgehend ungenutzt. Anders ist das im Physikunterricht der Sekundarstufe II. Felder stellen hier einen von drei zentralen Inhaltsbereichen dar, welche die Schülerinnen und Schüler bis zur Allgemeinen Hochschulreife lernen sollen. Magnetfelder und elektrische Felder sind bei der Bestimmung der spezifischen Masse  $e/m$  mit dem Fadenstrahlrohr, bei der Bestimmung von atomaren Massen mit einem

Massenspektrometer und beim Teilchenbeschleuniger zentral (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2016).

Echten Nutzen zur Erklärung von Phänomenen haben Felder für Schülerinnen und Schülern folglich erst ab der Sekundarstufe II. Dies mag auch ein Grund dafür sein, dass die Forschung zum Verständnis von Feldern von Schülerinnen und Schülern hauptsächlich im Oberstufenunterricht oder auf universitärem Level verortet ist (Campos et al., 2020; Furió & Guisasola, 1998; Pocoví, 2007; Viennot & Rainson, 1992). Die Studien belegen, dass selbst Oberstufenschülerinnen und -schüler sowie Studenten Verständnisschwierigkeiten mit dem Feldkonzept haben (Greca & Moreira, 1997; Guisasola et al., 2004). Aber auch für jüngere Schülerinnen und Schüler belegen die Studien von Bradamante und Viennot (2007) und Bar et al. (2007) Verständnisschwierigkeiten. Die Verständnisschwierigkeiten könnten darauf zurückzuführen sein, dass Felder bei ihrer formalen Einführung in der Oberstufe im Kontext von Kräften als abstraktes mathematisches Konstrukt eingeführt werden, das die Verteilung einer Kraft in Raum und Zeit angibt (z.B. Grehn & Krause, 2011). Saarelainen et al. (2006) argumentieren, dass diese Einführung des Feldes als Vektorfeld die Lernenden überfordert, weil sie die mathematischen Grundlagen von Vektorfeldern verstehen müssen, während sie gleichzeitig ein mentales Modell entwickeln sollen. Dabei gelingt es den Schülerinnen und Schülern nicht, ein mentales Modell von Feldern zu entwickeln, das ihnen dabei helfen könnte, Felder zu nutzen, um Phänomene zu erklären.

Die Verständnisschwierigkeiten der Lernenden sind in der Literatur belegt, aber kaum eine Studie untersucht die Rolle des Feldkonzeptes beim Erlernen anderer Konzepte. Untersuchungen sollten Aufschluss darüber geben, welche Aspekte des Feldkonzeptes nützlich sein könnten, um andere Konzepte wie das Energiekonzept und insbesondere die potentielle Energie besser zu verstehen. Das Feld wird in der Schule häufig als Vektorgröße eingeführt. Dieser mathematische Zugang hilft jedoch nicht bei der Entwicklung eines konzeptionellen Verständnisses von Energie. Für das Verständnis der potentiellen Energie müssen Schülerinnen und Schüler nur zwei Aspekte des Feldkonzeptes verstehen: (1) Felder sind real existierende physikalische Entitäten und (2) Felder vermitteln Interaktion auf Distanz und speichern potentielle Energie. Untersuchungen zeigen, dass diese beiden Aspekte des Feldkonzeptes auch von jüngeren Schülerinnen und Schülern verstanden werden können. In einem Unterrichtsvorschlag von Atkin und Karplus (1962) konnten Zweitklässler im Experiment „fühlen“, dass da etwas zwischen zwei Magneten ist. Auch in der Untersuchung von Bradamante und Viennot (2007) waren Schülerinnen und Schüler im Alter von 9-11 Jahren in der Lage zu erkennen, dass Felder eine gewisse Gestalt um Magneten annehmen. Schülerinnen und Schüler sind also in der Lage, das Feld als real existierende Entität zu erkennen. Die Forschungsergebnisse des System-Transfer-Ansatzes belegen ebenfalls, dass Felder nicht zu schwer für Schülerinnen und Schüler sind. Aufgaben, die eine Behandlung von Feldern erforderten, waren für die Schülerinnen und Schüler nicht schwerer zu lösen als Aufgaben, die keine Einbeziehung von Feldern erforderten. Die Ergebnisse des System-

Transfer-Ansatzes zeigen erstmalig, dass Schülerinnen und Schüler in der Lage sind, Energie und Felder miteinander zu verbinden, und dass sich die Einbeziehung von Feldern nicht negativ auf das Lernen von Energie ausgewirkt hat (Fortus et al., 2019; Kubsch et al., 2019; Kubsch, Opitz et al., 2021).

Potentielle Energie als in Feldern gespeichert zu konzeptualisieren wird in der Literatur empfohlen (NRC, 2012; Quinn, 2014; Swackhamer, 2005) und findet in der Fachliteratur seine Anfänge bei Maxwell. In seinen *Scientific Papers* beschreibt Maxwell 1890 den Zusammenhang zwischen Feldern und Energie wie folgt:

*“In speaking of the Energy of the field, however, I wish to be understood literally. [...] The only question is, Where does it reside? On the old theories it resides in the electrified bodies, conducting circuits, and magnets, in the form of an unknown quality called potential energy, or the power of producing certain effects at a distance. On our theory it resides in the electromagnetic field, in the space surrounding the electrified and magnetic bodies, as well as in those bodies themselves”* (Maxwell & Niven, 2010).

Der Transfer von Energie in und aus Systemen wie Feldern ist eine grundlegende Idee zur Bildung eines konzeptionellen Verständnisses von Energie in allen Naturwissenschaften (Coopersmith, 2015). Studien zeigen, dass Schülerinnen und Schüler Energie in den verschiedenen Kontexten, zum Beispiel den verschiedenen Naturwissenschaften unterschiedlich konzeptualisieren (Cooper & Klymkowsky, 2013; Opitz et al., 2017; Park & Liu, 2016). Die Einbeziehung von Feldern könnte die Verwendung derselben Sprache über Energie in allen Naturwissenschaften fördern. Durch die Einbeziehung von Feldern in den Energieunterricht im Anfangsunterricht werden Felder auch schon in der Sekundarstufe I zu einem erklärungsmächtigen Mittel, was über ihre bloße grafische Darstellung mit Eisenfeilspänen hinausgeht. Hierdurch könnte die Anbahnung einer tragfähigen Vorstellung über Felder bereits im Anfangsunterricht erreicht werden, wodurch die Schülerinnen und Schüler auf das zukünftige Lernen über Felder in der Sekundarstufe II vorbereitet wären. Die Relevanz der Untersuchung der Lernwirksamkeit einer Unterrichtseinheit, die Energie und Felder miteinander verknüpft, begründet sich deswegen nicht nur auf dem hohen Stellenwert des Energiekonzeptes, sondern auch auf der Relevanz des Feldkonzeptes für die Physik und die Naturwissenschaften insgesamt.

Das Energiekonzept ist ein zentrales Konzept der Physik, das sich durch seine hohe Relevanz für bedeutende Themen unserer Gesellschaft auszeichnet und deswegen fest in den Bildungsstandards verankert ist. Im Kontrast zu diesem hohen Stellenwert, den unsere Gesellschaft dem Energiekonzept zuweist, belegen Studien, dass Schülerinnen und Schüler im traditionellen Unterricht kein tiefgehendes Verständnis des Energiekonzeptes erwerben. Der traditionell in den Schulen unterrichtete Formenansatz steht in der Literatur viel in der Kritik.

Betont wird vor allem, dass es Schülerinnen und Schülern häufig nicht gelingt, ein tiefgehendes Verständnis der Energieformen zu entwickeln. Trotz dieser Kritik ist der Formenansatz heute nach wie vor Standard im Energieunterricht und formenbasierte Sprache wird von Naturwissenschaftlern genutzt, wenn sie über Phänomene sprechen, die Energieaspekte beinhalten (Harrer, 2017). Studien belegen die Lernwirksamkeit von Unterrichtsansätzen, die auf Energieformen verzichten und Felder in den Energieunterricht einbezogen haben. Die Hypothese ist, dass es diese Einbeziehung von Feldern ist, die entscheidend ist für das in den Studien gefundene tiefergehende Energieverständnis der Schülerinnen und Schüler. Forschung zum Verständnis der Schülerinnen und Schüler über Felder belegen, dass neben dem Energiekonzept auch das Feldkonzept für sie ein schwieriges Konzept ist. Gleichzeitig ist jedoch untersucht, dass grundlegende Aspekte des Feldkonzeptes auch von jungen Schülerinnen und Schülern verstanden werden können. Für die Einbeziehung von Feldern in den Energieunterricht reicht ein Verständnis grundlegender Aspekte des Feldkonzeptes aus, um bei den Schülerinnen und Schülern ein tiefergehendes, konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie zu fördern, das ihnen auch das fortgeführte Lernen erleichtern könnte. Aus diesen Überlegungen lässt sich eine Notwendigkeit ableiten, herauszufinden, ob sich die Idee, Energie und Felder zu verbinden, auf den traditionellen Formenansatz übertragen lässt. Um den Forderungen der Lehrpläne der Bundesländer nach einer frühen Anbahnung eines Energieverständnisses gerecht zu werden, soll eine Einheit zur Energie unter Einbeziehung von Feldern entwickelt werden, die sich bereits für den Anfangsunterricht eignet.

## ZIEL DER ARBEIT UND ZUSAMMENFASSUNG DER STUDIEN

Felder könnten den Schülerinnen und Schülern dabei helfen, potentielle Energie besser zu verstehen, und sich in der Folge positiv auf die Entwicklung des Energieverständnisses auswirken. Felder könnten zur Entwicklung eines tiefergehenden, konzeptionellen Verständnisses der Energieformen beitragen und damit einen Hauptkritikpunkt des Formenansatzes adressieren. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss der Einbeziehung des Feldkonzeptes auf die Entwicklung des Energieverständnisses in einem Formenansatz im Anfangsunterricht Physik zu untersuchen.

### Entwicklung einer Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern

Um den Einfluss des Feldkonzeptes auf das Lernen der Schülerinnen und Schüler über Energie untersuchen zu können, wurden insgesamt vier Unterrichtseinheiten entwickelt (siehe Abbildung 1): zwei Einheiten für eine einführende Einheit zur Energie und zwei Einheiten zum fortgeführten Lernen. In beiden Teilen der Studie – der einführenden Einheit und dem fortgeführten Lernen – wurde jeweils eine Einheit entwickelt, die Felder bei den potentiellen Energieformen einbezieht, und eine Einheit, die einem traditionellen Unterrichtsgang ohne Felder folgt.

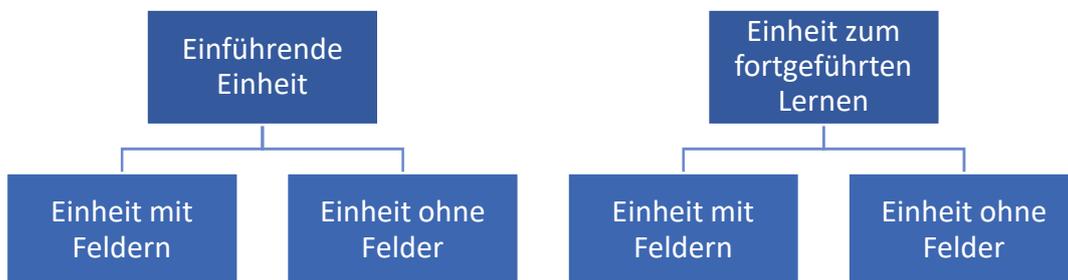


Abbildung 1: Unterrichtseinheiten für eine einführende Einheit zur Energie und eine Einheit zum fortgeführten Lernen mit und ohne die Einbeziehung von Feldern.

Ein Kriterium bei der Entwicklung der Unterrichtseinheiten war, dass sie den Anforderungen des kumulativen Lernens zum Aufbau von Kompetenzen genügen. Das kumulative Lernen beschreibt den systematischen Aufbau des Verständnisses der Schülerinnen und Schüler, in dem an ihr Vorwissen angeknüpft und auf diesem aufgebaut wird (Neumann et al., 2008). Die Einbeziehung von Feldern kann kumulatives Lernen fördern, weil sie ein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie bewirken können. Das kumulative Lernen wird in der Einheit zum fortgeführten Lernen dadurch umgesetzt, dass die grundlegenden Prinzipien der potentiellen Energie wieder aufgegriffen und gefestigt werden. Bereits im Einstieg begegnen die Schülerinnen und Schüler einem Phänomen, das Interaktion auf Distanz beinhaltet. Ein elektrostatischer Stick stößt Figuren aus Aluminium ab. Durch die Interaktion auf Distanz

können die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass dieses Phänomen eine Form der potentiellen Energie beinhalten muss. Ihr Vorwissen wird reaktiviert und auf dieses anhand der Einführung der neuen Energieform der elektrischen Energie aufgebaut. Im weiteren Verlauf der Einheit wird das kumulative Lernen dadurch gefördert, dass die grundlegenden Prinzipien zur potentiellen Energie auf die neue Energieform der elektrischen Energie übertragen werden. Das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler wird dadurch gefestigt.

Ein weiteres Kriterium bei der Entwicklung der beiden Einheiten (einführende Einheit und Einheit zum fortgeführten Lernen) war die Herstellung von Kohärenz innerhalb der beiden Einheiten und zwischen ihnen (Fortus et al., 2015; Kali et al., 2008). Kohärenz wurde durch drei Designaspekte erreicht: (1) den Fokus auf die durch Felder definierten zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie, (2) den Einsatz eines *Storyline*-Ansatzes (Nordine et al., 2019) und (3) den Einsatz von Leitfragen nach dem *Project-Based Learning* (Krajcik, J. S., & Shin, N., 2014). Jede neu eingeführte Form der potentiellen Energie wird in beiden Einheiten als solche klassifiziert, indem die zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie identifiziert werden. Sie sind das Bindeglied zwischen der einführenden und der Einheit zum fortgeführten Lernen. Neumann und Nordine (2022) argumentieren, dass Kompetenzentwicklung Kohärenz zwischen mehreren Unterrichtsstunden und zwischen mehreren Unterrichtseinheiten erfordert. Die wiederkehrende Betonung der zugrunde liegenden Prinzipien innerhalb jeder Einheit und auch zwischen den Einheiten soll den Aufbau eines konzeptionellen Verständnisses der potentiellen Energie bei den Schülerinnen und Schülern unterstützen. Der Einsatz von Storylines dient dazu, Kohärenz innerhalb einer Einheit herzustellen. Storylines stellen den Zusammenhang der physikalischen Inhalte der gesamten Unterrichtseinheit kontextorientiert dar. Die Unterrichtsstunden bauen logisch aufeinander auf, so dass eine Folgestunde offene Fragen der vorangegangenen Stunde thematisiert (Reiser, 2017). In der einführenden Einheit lässt sich das am Beispiel der Unterrichtsstunde zur Lageenergie illustrieren, die logisch an die vorangegangene Stunde zur magnetischen Energie anschließt. Dies gelingt dadurch, dass die Schülerinnen und Schülern beide Male ein Phänomen untersuchen, bei dem ein Objekt erst langsamer wird, stehen bleibt und dann wieder in die andere Richtung beschleunigt. In der Unterrichtsstunde zur magnetischen Energie ist dies ein Wagen mit einem Magneten, in der Stunde zur Lageenergie eine Kugel. Die Ähnlichkeit des Bewegungsablaufes zwischen der Kugel und dem Magnetwagen wirft bei den Schülerinnen und Schülern die Frage nach der Ursache auf. Hierdurch wird ausgehend vom Magnetfeld die Existenz des Gravitationsfeldes eingeleitet. Durch eine Storyline können sich die Schülerinnen und Schüler leichter in der Einheit orientieren und können den inhaltlichen Zusammenhang zwischen den Unterrichtsstunden besser nachvollziehen. Die Storyline bildet auch die Leitfragen ab, welche die Schülerinnen und Schüler durch die Einheit begleiten. Es wird aus dem Unterricht heraus eine übergeordnete Leitfrage entwickelt. Diese wird in Teilfragen unterteilt, deren Beantwortung im Laufe der Einheit den Schülerinnen und Schülern

sukzessive die Beantwortung der übergeordneten Leitfrage ermöglicht. Diese Sequenzierung der Lerninhalte fördert die Kohärenz innerhalb der Einheit (Neumann, 2020).

### **Forschungsschwerpunkte**

Der Einfluss der Einbeziehung von Feldern auf die Entwicklung des Energieverständnisses von Schülerinnen und Schülern wird in dieser Arbeit im Rahmen von drei Studien untersucht. Die Schülerinnen und Schüler waren entweder der Felder-Gruppe zugeordnet, deren Energieunterricht Felder bei den potentiellen Energieformen einbezogen hat oder der der Nicht-Felder-Gruppe, deren Energieunterricht einem traditionellen Unterricht ohne Felder folgte. Das Energieverständnis der Schülerinnen und Schüler beider Gruppen wird miteinander verglichen. Drei Forschungsschwerpunkte werden festgemacht: Herauszufinden, (1) inwiefern die Einbeziehung von Feldern das Energieverständnis in einer einführenden Einheit fördern kann, (2) inwiefern die Einbeziehung von Feldern das fortgeführte Lernen über Energie fördern kann und (3) wie Schülerinnen und Schüler Energie und Felder verbinden, um Phänomene zu erklären. In der Studie 1 wird untersucht, inwiefern Felder das Verständnis der Schülerinnen und Schüler in einer einführenden Einheit beeinflussen. Die Studie 2 untersucht, wie sich die Einbeziehung von Feldern auf das fortgeführte Lernen über Energie auswirkt. Nach einer Pilotierung der beiden Einheiten im Schuljahr 2018/2019 (einführende Einheit und die Einheit zum fortgeführten Lernen) konnte eine erste Evaluation der Lernwirksamkeit der Einheiten vorgenommen werden. Dies ermöglichte eine Überarbeitung der Einheiten. Rückmeldungen der unterrichtenden Lehrkräfte zeigten auf, an welchen Stellen die Schülerinnen und Schüler Verständnisschwierigkeiten hatten. Das Augenmerk galt dabei vor allem der Überprüfung, ob die Materialien und der Unterrichtsgang geeignet sind, um das konzeptionelle Verständnis der potentiellen Energie zu fördern. Den Hinweisen der Lehrkräfte folgend und basierend auf der Auswertung der Ergebnisse der Schülerinnen und Schüler, wurden die Einheiten überarbeitet und im Schuljahr 2020/2021 im Rahmen der Studie 3 erneut getestet. Während die Auswertung der Pilotierung in den Studien 1 und 2 auf quantitativen Testergebnissen beruht, wurden in der zweiten Durchführung im Rahmen der Studie 3 zusätzlich qualitative Daten zur Ergänzung der quantitativen Daten herangezogen. Mit diesen Daten kann der dritte Forschungsschwerpunkt verfolgt werden um herauszufinden, wie Schülerinnen und Schüler Energie und Felder verbinden, um Phänomene zu erklären.

### **PUBLIKATION 1: Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept**

Publikation 1 beschreibt die Studie 1, die den Einfluss der Einbeziehung von Feldern in einer einführenden Einheit im Anfangsunterricht der 6. Klasse auf die Entwicklung des Energieverständnisses untersucht. Eine Schülergruppe ( $N = 43$ ) wurde nach einem

traditionellen Formenansatz ohne Felder unterrichtet (Nicht-Felder-Gruppe) und eine Schülergruppe ( $N = 47$ ) nach einem Formenansatz, bei dem die potentielle Energie als in Feldern gespeichert konzeptualisiert wird (Felder-Gruppe). Basierend auf den Daten aus dem schriftlichen Energietest am Ende der Einheit wird in einem ersten Schritt das Energieverständnis der Felder-Gruppe mit demjenigen der Nicht-Felder-Gruppe verglichen. In einem weiteren Schritt wird untersucht, wie sich das Felderverständnis auf das Energieverständnis auswirkt. In Bezug auf den Vergleich des Energieverständnisses zeigt sich, dass unter Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler und ihres Vorwissens über Energie entgegen den Erwartungen die Felder-Gruppe im Energietest am Ende der Einheit schlechter abschneidet als die Nicht-Felder-Gruppe. Die Untersuchung des Einflusses des Felderverständnisses zeigt, dass unter Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten und des Vorwissens über Energie sich in der Felder-Gruppe ein gutes Verständnis von Feldern positiv auf die Entwicklung des Energieverständnisses auswirkt. Mögliche Ursachen für das schlechtere Abschneiden der Felder-Gruppe im Energietest am Ende der einführenden Einheit werden in der Publikation diskutiert. Offen bleibt die Frage, ob sich die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie langfristig positiv auf die Entwicklung des Energieverständnisses auswirkt, sich die Effekte der Einbeziehung von Feldern folglich im fortgeführten Lernen über Energie manifestieren.

### **PUBLIKATION 2: Fields in middle school energy instruction to support continued learning of energy**

Dieser Frage nach der langfristigen Wirkung der Einbeziehung von Feldern wird in der Publikation 2 nachgegangen, welche die Studie 2 beschreibt. Ein wichtiger Bestandteil für erfolgreiches fortgeführtes Lernen ist, dass Lernende eine kleine Anzahl an grundlegenden Prinzipien in verschiedenen Kontexten anwenden können (Bransford & Schwartz, 1999; diSessa & Wagner, 2005). Wenn die Einbeziehung von Feldern bei den Schülerinnen und Schülern ein Verständnis der grundlegenden Prinzipien der potentiellen Energieformen fördert, so sollte ihnen das fortgeführte Lernen über Energie erleichtert werden. Die zweite Studie nimmt das fortgeführte Lernen der Schülerinnen und Schüler der 6. Klasse am Beispiel der elektrischen Energie, einer ihnen bislang noch unbekanntem Form der potentiellen Energie, in den Blick. Eine Schülergruppe ( $N = 18$ ) wurde, wie in einer einführenden Einheit, auch in der Einheit zur elektrischen Energie nach dem traditionellen Formenansatz ohne Felder (Nicht-Felder-Gruppe) und eine Schülergruppe ( $N = 46$ ), ebenfalls wie in einer einführenden Einheit, auch in der Einheit zur elektrischen Energie mit einem Formenansatz unterrichtet, der Felder, hier das elektrische Feld, einbezieht (Felder-Gruppe). Die Ergebnisse basieren auf den Daten eines schriftlichen Energietests am Ende der Einheit zum fortgeführten Lernen. Sie zeigen, dass die Felder-Gruppe unter Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten und des Vorwissens über Energie aus der einführenden Einheit und über elektrische Energie besser abschneidet als die Nicht-Felder-Gruppe. Die Ergebnisse legen nahe, dass sich die

Einbeziehung von Feldern langfristig positiv auf die Entwicklung des Energieverständnisses auswirkt. Basierend auf quantitativen Daten bleibt in dieser Publikation offen, ob die Schülerinnen und Schüler Felder und Energie auch tatsächlich verbinden, um Phänomene zu erklären.

**PUBLIKATION 3: Supporting learning about energy with fields – Evidence from a mixed-methods study**

Eine qualitative Untersuchung der Wissensstrukturen der Schülerinnen und Schüler ist der Schwerpunkt in der Publikation 3, welche die Studie 3 beschreibt. Lernen ist erfolgreicher, wenn Lernende Wissensnetzwerke aufbauen, die um zentrale Ideen organisiert sind (Bransford et al., 2000; Lee & Liu, 2010; Linn, 2006). Die zentralen, zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie sind über Felder formuliert. Wenn Felder als zugrunde liegendes Konzept alle Formen der potentiellen Energie miteinander verbinden, sollten die Wissensnetzwerke der Schülerinnen und Schüler starke Verbindungen zwischen den Aspekten des Energiekonzeptes und insbesondere zwischen den zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie aufweisen. Studie 3 fokussiert auf der Basis von Interviews, wie Schülerinnen und Schüler Felder im Zusammenhang mit Energie verwenden, um Phänomene zu erklären. Die Studie stellt eine Replikationsstudie dar und testet erneut die Lernwirksamkeit der Unterrichtseinheiten zur Einführung von Energie und zum fortgeführten Lernen über Energie mit Schülerinnen und Schülern der 7. Klasse. Eine Schülergruppe ( $N = 23$ ) wurde in der einführenden Einheit und in der Einheit zum fortgeführten Lernen mit einem traditionellen Formenansatz unterrichtet (Nicht-Felder-Gruppe). Eine weitere Schülergruppe ( $N = 44$ ) wurde in der einführenden Einheit und in der Einheit zum fortgeführten Lernen mit einem Formenansatz unterrichtet, der Felder bei den potentiellen Energieformen einbezieht (Felder-Gruppe). Zunächst wird das Energieverständnis der beiden Gruppen mittels schriftlicher Tests zum Energieverständnis jeweils am Ende der einführenden Einheit und der Einheit zum fortgeführten Lernen miteinander verglichen. Anschließend wird auf der Basis von Interviews mit 8 Schülerinnen und Schülern der Felder-Gruppe und 4 Schülerinnen und Schülern der Nicht-Felder-Gruppe eine Netzwerkanalyse durchgeführt, um die Wissensnetzwerke der beiden Gruppen zu beschreiben und zu vergleichen. Die Analysen zeigen, dass die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe sowohl in dem Energietest nach der einführenden Einheit als auch in demjenigen nach der Einheit zum fortgeführten Lernen unter Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten und des Vorwissens der Schülerinnen und Schüler besser abschneiden als die Nicht-Felder-Gruppe. Die Auswertung der Wissensnetzwerke zeigt, dass die Wissensnetzwerke der Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe mehr relevante Ideen aufweisen, die auch stärker miteinander verknüpft sind als in den Wissensnetzwerken der Nicht-Felder-Gruppe. Die Ergebnisse lassen schlussfolgern, dass die Einbeziehung von Feldern Schülerinnen und Schüler dabei unterstützen kann, ein konzeptionelles Verständnis von Energie und insbesondere der potentiellen Energie zu entwickeln.

**PUBLIKATION 4: Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Eine Unterrichtseinheit zur Einführung des Energiekonzeptes mit Feldern**

Diese Publikation hat zum Ziel, die in dieser Arbeit entwickelten Unterrichtseinheiten bei Lehrerinnen und Lehrern in Österreich und Deutschland bekannt zu machen. Die Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass sich die Einbeziehung von Feldern als lernwirksam für die Entwicklung eines Energieverständnisses erweist. Für Lehrerinnen und Lehrer ist diese Idee der Einbeziehung von Feldern jedoch neu. Die Publikation 4 strebt an, die grundlegenden Ideen des Unterrichtsansatzes mit Feldern und den groben Unterrichtsverlauf für Lehrkräfte aufbereitet darzustellen, um eine Implementation der Einheit an den Schulen zu erleichtern.

## **PUBLIKATION 1**

### **DER POTENTIELLEN ENERGIE EIN ZUHAUSE GEBEN– FELDER ALS DIDAKTISCHES HILFSMITTEL IM ANFANGSUNTERRICHT ZUM ENERGIEKONZEPT**

#### **Zusammenfassung**

Der vorliegende Beitrag präsentiert Erkenntnisse zur Wirksamkeit eines neuen Unterrichtsansatzes zur Einführung des Energiekonzeptes mit Hilfe von Feldern. Die zentrale Bedeutung des Energiekonzeptes in Physik steht im Kontrast zu den Verständnisschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler, insbesondere mit der potentiellen Energie. Die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie erlaubt eine physikalisch korrekte und gleichzeitig anschauliche Begründung der für Schülerinnen und Schüler verwirrenden Eigenschaften der potentiellen Energie. Wir haben deswegen einen Unterrichtsansatz entwickelt und getestet, der Felder in den Anfangsunterricht zur Energie integriert. Dazu haben wir den traditionellen formenbasierten Ansatz, Energie zu unterrichten, erweitert. In einer quasi-experimentellen Studie haben wir anschließend eine Schülergruppe ( $N = 43$ ) nach dem traditionellen formenbasierten Ansatz unterrichtet und eine Gruppe ( $N = 47$ ) nach dem erweiterten Ansatz, der potentielle Energieformen als in entsprechenden Feldern gespeicherte Energie konzeptualisiert. Neben den kognitiven Fähigkeiten als Kovariate wurden das Verständnis vom Energie- und Feldkonzept als abhängige Variablen erfasst. Die Ergebnisse zeigen zunächst, dass die Schülerinnen und Schüler des erweiterten Ansatzes im Energietest schlechter abschneiden als die Schülerinnen und Schüler des traditionellen Ansatzes. Eine Untersuchung des Einflusses des Feldverständnisses auf den Effekt der Intervention ergibt jedoch, dass die nach dem erweiterten Ansatz unterrichteten Schülerinnen und Schüler wesentliche Aspekte des Feldkonzeptes verstehen und dass sich dieses Verständnis positiv auf ihr Verständnis von Energie auswirken könnte. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Feldkonzept ein Mittel zur Entwicklung eines besseren Energieverständnisses sein könnte, dessen Einfluss auf das zukünftige Lernen über Energie weiter untersucht werden sollte.

Schlüsselwörter:

Energie, Felder, Energieverständnis, potentielle Energie, Energieformen

Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K., & Nordine, J. (2022). Der potentiellen Energie ein Zuhause geben–Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 28(1), 6.

## GIVING POTENTIAL ENERGY A HOME – FIELDS AS A DIDACTIC TOOL IN INTRODUCTORY ENERGY INSTRUCTION

### **Abstract**

This paper presents findings on the effectiveness of a new approach to teaching energy which includes the concept of fields. While energy is a central concept in physics, students often struggle with the energy concept, especially the aspect of potential energy. Conceptualizing potential energy as energy stored in fields allows a physically correct and yet illustrative explanation of the properties of potential energy that are confusing to students, such as its dependence on the reference point. Therefore, we have developed and tested an approach that integrates fields into introductory energy instruction. For this purpose, we enhanced the traditional forms-based approach. In a quasi-experimental study, we then taught one group of students ( $N = 43$ ) using the traditional forms-based approach and one group ( $N = 47$ ) using the enhanced approach, which conceptualizes potential energy forms as energy stored in respective fields. In addition to cognitive abilities as a covariate, we measured understanding of the concepts of energy and fields as dependent variables. The results show that the students of the enhanced approach perform worse in the energy test compared to the students of the traditional approach. However, an examination of the effect of the field understanding on the effect of the intervention reveals that students taught using the enhanced approach understand key aspects of the field concept and that this understanding could have a positive impact on their understanding of energy. The results suggest that the field concept may be a means of developing a better understanding of energy, whose impact on future learning about energy should be further investigated.

Keywords:

Energy, fields, energy understanding, potential energy, forms-based approach

## Einleitung

Die Teilhabe an Diskussionen über gesellschaftlich relevante Themen, wie z.B. den Klimawandel, erfordert ein fundiertes Verständnis von Energie (z.B. (Chen et al., 2014). Um zum Beispiel die Ursachen der Erderwärmung nachvollziehen zu können, ist es notwendig, energetische Prozesse in der Erdatmosphäre zu modellieren und zu bilanzieren. Diese besondere Bedeutung des Energiekonzeptes spiegelt sich auch in den Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss in den naturwissenschaftlichen Fächern wider. Energie ist das einzige Konzept, das in den drei Fächern Biologie, Chemie und Physik als zentrales Konzept identifiziert wird (KMK, 2005a; 2005b, 2005c). Auch die Physiklehrpläne der Bundesländer räumen dem Energiekonzept einen hohen Stellenwert ein und situieren vielfach eine qualitative Einheit zur Energie am Anfang der Sekundarstufe I, auf der im weiteren Verlauf der Schulzeit aufgebaut wird (z.B. Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2016). Die Entwicklung eines fundierten Verständnisses des Energiekonzeptes ist daher ein wesentliches Ziel des Schulunterrichts in Naturwissenschaften im Allgemeinen und der Physik im Besonderen.

Die naturwissenschafts- bzw. physikdidaktische Forschung zeigt zugleich, dass Schülerinnen und Schüler zum Teil massive Schwierigkeiten mit dem Energiekonzept haben (für einen Überblick siehe Chen et al., 2014). Besonders die potentielle Energie stellt für Schülerinnen und Schüler eine Herausforderung dar: Sie schreiben die potentielle Energie z.B. einzelnen Objekten zu, was zu Schwierigkeiten bei der Entwicklung eines fundierten Verständnisses von Energie führen kann (Hecht, 2003; Lindsey et al., 2012). Diese Probleme können möglicherweise vermieden werden, wenn man die potentielle Energie, als im Feld zwischen mehreren Objekten gespeichert, einführt (Swackhamer, 2005). Allerdings sind Felder selbst ein Konzept, das für Schülerinnen und Schüler nicht leicht zu verstehen ist (Greca & Moreira, 1997). In der Folge wurde bisher in der Schule davon abgesehen, bei der Konzeptualisierung potentieller Energie auf Felder zurückzugreifen. Eine Ausnahme stellt der sogenannte System-Transfer-Ansatz dar (Fortus et al. 2019). Dieser Ansatz vermeidet die explizite Behandlung von Energieformen und betrachtet ausschließlich den Transfer von Energie zwischen Systemen. Zur Erklärung von Phänomenen wie einem Pendel muss dann das (Gravitations-)Feld (zwischen Erde und Pendel) als eigenständiges System eingeführt werden. Die Forschung zu diesem Ansatz legt nahe, dass die Einführung von Feldern zumindest kein zusätzliches Lernhindernis darstellt. Vielmehr scheint der Ansatz gerade leistungsschwächeren Schülerinnen und Schülern zu helfen (siehe auch Kubsch, Opitz et al., 2021). Bisher liegt jedoch keine Evidenz vor, inwieweit die Integration von Feldern in den traditionellen formenbasierten Unterricht hilfreich ist.

Die vorliegende Studie untersucht, mit dem Ziel dieses Forschungsdefizit zu beheben, ob bzw. inwieweit die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in einem Feld zwischen zwei oder mehreren Objekten gespeicherter Energie Schülerinnen und Schüler darin unterstützen kann, ein besseres Verständnis von (potentieller) Energie zu entwickeln.

### **Theoretischer Hintergrund**

In der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung besteht ein breiter Konsens, dass ein fundiertes Energieverständnis Wissen zu fünf Aspekten des Energiekonzeptes erfordert: dass 1) Energie sich in verschiedenen Formen manifestiert und aus unterschiedlichen Quellen gewonnen werden kann, 2a) Energie von einer Form in eine andere umgewandelt werden oder 2b) von einem Ort zu einem anderen transportiert werden kann, 3) in Phänomenen bei der Umwandlung von einer Energieform in eine andere oder dem Transport von einem Ort zu einem anderen immer ein Teil der Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird, obwohl 4) die Summe der Energie in einem abgeschlossenen System erhalten bleibt (Duit, 1984; siehe auch Chen et al. 2014). Die gängige Unterrichtspraxis, um ein solches Verständnis von Energie zu entwickeln, ist der formenbasierte Unterrichtsansatz. In diesem Ansatz wird Energie zunächst eingeführt als Größe, die sich in unterschiedlichen Formen manifestiert (z.B. Bewegungsenergie, Lageenergie oder magnetische Energie), die ineinander umgewandelt werden können. Die naturwissenschafts- bzw. physikdidaktische Forschung belegt in der Folge für den gängigen formenbasierten Unterrichtsansatz, dass sich die Entwicklung des Verständnisses von Energie, ausgehend von der Kenntnis einzelner Energieformen hin zu einem vernetzten Wissen über alle Aspekte des Energiekonzeptes hinweg vollzieht. Ein derartiges Wissen ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern, sich Phänomene erschließen und sie erklären zu können (Liu & McKeough, 2005; Lee & Liu, 2010; Neumann et al., 2013; Herrmann-Abell & DeBoer, 2018).

Die naturwissenschaftsdidaktische Forschung offenbart aber auch die Schwierigkeiten, die Schülerinnen und Schüler mit der Entwicklung eines fundierten Energieverständnisses haben (Goldring, H. & Osborne, J., 1994; für einen Überblick siehe Duit, 2014). Häufig zeigen Schülerinnen und Schüler nur fragmentiertes Wissen. Sie können z.B. im Kontext eines gegebenen Phänomens relevante Energieformen zuordnen. Darüber hinaus sind sie jedoch häufig nicht in der Lage, die Aspekte des Energiekonzeptes sinnvoll miteinander zu verknüpfen und diese anzuwenden, um Phänomene zu erklären (Lee & Liu, 2010). Kritiker sehen einen Grund für diese Schwierigkeiten in der gängigen Unterrichtspraxis, Energie als in verschiedenen Formen beobachtbar zu konzeptualisieren (z.B. Millar 2014; für einen Überblick siehe Kaper & Goedhart, 2002, 2010). Die scheinbar hohe Anzahl von Energieformen und deren inkonsistente Verwendung gelten als Ursache der beobachteten Fragmentierung des Wissens der Schülerinnen und Schüler (z.B. R. Millar, 2014). Ellse (1988) weist in der Folge darauf hin, dass es nur zwei fundamental unterschiedliche Formen von Energie in den Naturwissenschaften gibt, kinetische und potentielle Energie, und regt an, sich auf die Behandlung dieser Energieformen zu konzentrieren. Gerade mit der potentiellen Energie haben Schülerinnen und Schüler jedoch besondere Schwierigkeiten. Zum Beispiel waren in der Studie von Herrmann-Abell & DeBoer, 2018) die Aufgaben zur potentiellen Energie der Lageenergie für die Schülerinnen und Schüler schwieriger als die Aufgaben zur kinetischen

Energie. Stephanik et al., 2012 zeigen, dass die potentielle Energie selbst für Studierende schwierig ist.

Schülerinnen und Schüler assoziieren Energie aus ihrer Alltagserfahrung heraus mit Bewegung, es fällt ihnen jedoch schwer, zu verstehen, dass ein (mechanisches) System, auch wenn es sich nicht bewegt, Energie besitzen kann (z.B. Watts, 1983; siehe auch Trumper, 1993). Dies trifft insbesondere auf die potentielle Energie der Lage, oder kurz Lageenergie, zu. Sie ist nicht erkennbar mit einem Prozess wie die kinetische Energie verbunden, und scheint Schülerinnen und Schülern daher wenig real (Hecht, 2003). In der Folge neigen Schülerinnen und Schüler z.B. dazu, die Frage, ob ein ruhendes Buch Energie besitzt, mit „Nein“ zu beantworten (Watts, 1983). Darüber hinaus fällt es den Schülerinnen und Schülern schwer, potentielle Energie richtig zu lokalisieren (Lindsey et al., 2012). Sie tendieren dazu, die potentielle Energie dem betrachteten Objekt zuzuschreiben, statt einem System aus mindestens zwei Objekten. Diese inadäquate Zuschreibung äußert sich beispielsweise in Sätzen wie: „Der Ball hat potentielle Energie“<sup>1</sup> (Swackhamer, 2005).

Schülerinnen und Schüler haben weiterhin Schwierigkeiten mit der relativen Natur der Energie. Aus physikalischer Sicht ist die Zuschreibung potentieller Energie nur relativ zu einem oder mehreren anderen Objekten sinnvoll; insbesondere hängt die potentielle Energie von der konkreten Konfiguration der betrachteten Objekte ab. Im Allgemeinen ist es dabei nicht sinnvoll, die absolute potentielle Energie einer Konfiguration zu bestimmen (Quinn 2014). Stattdessen sollte die Änderung der potentiellen Energie im Vergleich zwischen zwei Konfigurationen betrachtet werden (Quinn, 2014). So ist es wenig zielführend, die absolute Lageenergie eines Balls zu bestimmen, sondern vielmehr nur die Lageenergie relativ zur Lageenergie in einem Bezugspunkt. Wird der Ball z.B. im zweiten Stock auf den Fußboden fallen gelassen, ist der Bezugspunkt der Fußboden. Die potentielle Energie des Balles ergibt sich aus der Entfernung zwischen Ball und Fußboden. Wird der Ball jedoch im zweiten Stock aus dem Fenster fallen gelassen, so ist der Bezugspunkt der Erdboden. Die potentielle Energie ergibt sich aus dem Abstand zwischen Ball und Erdboden. Die potentielle Energie ist im zweiten Fall größer, obwohl der Ball in beiden Fällen aus der gleichen Position fallen gelassen wird. Die absolute potentielle Energie ist für beide Fälle gleich groß. Zur Bestimmung der potentiellen Energie des Systems Ball-Fußboden bzw. Ball-Erdboden ist jedoch jeweils die Höhenänderung entscheidend. Diese Begebenheit bereitet vielen Schülerinnen und Schülern Probleme.

### **Förderung des Verständnisses der potentiellen Energie durch Felder**

In der Literatur findet sich verschiedentlich der Vorschlag, den genannten Schwierigkeiten mit der potentiellen Energie mit einem Rückgriff auf das Feldkonzept zu begegnen: Swackhamer

---

<sup>1</sup> Eine Sprechweise, die im traditionellen Formenansatz gebräuchlich (vgl. z.B. Burzin et al. (2021)) und als Zwischenschritt zu einer fachsprachlich adäquateren Zuschreibung auch akzeptiert ist (vgl. z.B. Kaper und Goedhart (2002)).

(2005) regt z.B. an, potentielle Energie als in Feldern gespeichert einzuführen, und Quinn (2014) vermutet, dass die Nutzung des Feldkonzeptes ein besseres Verständnis der Schülerinnen und Schüler ermöglicht. Der Grund für die Vermutung, dass Felder bei der Bewältigung der Schwierigkeiten mit dem Verständnis der potentiellen Energie helfen könnten, liegt in der Definition der potentiellen Energie: Potentielle Energie ist definiert bzw. lässt sich definieren als die Energie, die in einem Feld zwischen zwei (oder mehr) über eine Distanz interagierenden Objekten gespeichert ist (NRC 2012; siehe auch Quinn 2014).

Durch den Rückgriff auf Felder wird eine vollständigere und physikalisch korrekte Beschreibung der potentiellen Energie erreicht: Anstatt die potentielle Energie (fälschlicherweise) einem Objekt zuzuschreiben, wird sie mithilfe von Feldern zur Eigenschaft eines Systems zweier (oder mehrerer) miteinander wechselwirkender Objekte und dem Feld zwischen ihnen. Die Lageenergie ist demnach die im Gravitationsfeld zwischen Ball und Erde gespeicherte Energie und nicht mehr die Lageenergie des Balls. Die Verwendung von Feldern führt also dazu, dass bei der Betrachtung entsprechender Phänomene immer (mindestens) zwei miteinander wechselwirkende Objekte sowie das Feld zwischen ihnen berücksichtigt werden müssen, um eine Aussage über die potentielle Energie tätigen zu können. Nur ein Objekt zu betrachten, ist bei der Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie nicht zielführend.

Felder können auch helfen, die Schwierigkeiten mit der für Schülerinnen und Schülern häufig unzureichenden Beobachtbarkeit zu beheben: Die potentielle Energie kann dem Feld zugeordnet werden (Swackhamer, 2005). Sie ist an das Feld als physikalisches System gebunden, auch wenn sich nichts bewegt. Im Fall der potentiellen Energie des Magnetfeldes kann dessen Wirkung durch Eisenfeilspäne sichtbar gemacht werden. Die Struktur und die Intensität des Magnetfeldes hängen von der darin gespeicherten Energie ab. Die Schülerinnen und Schüler können lernen, die potentielle Energie anhand der Wirkungen des Magnetfeldes auf Eisenfeilspäne zu erkennen, so wie sie die kinetische Energie anhand von Bewegung erkennen können. Dadurch könnte erreicht werden, dass Schülerinnen und Schüler auch die potentielle Energie als real anerkennen.

Die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie sollte sich darüber hinaus positiv auf die weitere Entwicklung des Verständnisses von Energie auswirken. Als eine von zwei fundamentalen Energieformen spielt die potentielle Energie beim Verständnis der Umwandlung, und damit mittelbar auch der Erhaltung, eine wichtige Rolle. Bei vielen Phänomenen findet eine Umwandlung von kinetischer in potentielle Energie oder umgekehrt statt. Ein besseres Verständnis der potentiellen Energie würde das Verständnis der entsprechenden Umwandlungsprozesse erleichtern. Ein quantitatives Verständnis der Energieerhaltung im fortgeführten Lernen über Energie setzt die angemessene Quantifizierung aller beteiligten Energieformen voraus. Das Verständnis, insbesondere der relativen Natur der potentiellen Energie, würde helfen, die jeweiligen Formen potentieller Energie korrekt zu quantifizieren, und in der Folge die Entwicklung des Verständnisses der

Energieerhaltung fördern. Das heißt, über ein besseres Verständnis der potentiellen Energie hinaus könnten Felder auch dazu beitragen, ein fundierteres Verständnis des Energiekonzeptes insgesamt zu erreichen (Doménech et al., 2007; Lindsey et al., 2012).

### **Verständnis und Verständnisschwierigkeiten beim Lernen über Felder**

Felder sind wie die Energie ein wichtiges Konzept der Physik. Fundamentale Erkenntnisse der Physik, wie zum Beispiel die Bestimmung der Elementarladung im Millikan-Versuch oder der Hall-Effekt, beruhen auf einem Verständnis von Feldern. Bereits in der Mittelstufe spielen (Magnet-) Felder eine wichtige Rolle beim Verständnis des Verhaltens einer Vielzahl von Alltagsphänomenen (z.B. dem Kompass). Insbesondere aber in der Oberstufe nehmen Felder eine wichtige Rolle ein (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2016); z.B. bei der Erklärung des Kondensators, der Gravitation oder etwa der Induktion. Das Verständnis von Feldern ist deswegen auch losgelöst von seinem Nutzen für das Verständnis des Energiekonzeptes von großer Bedeutung für die Entwicklung physikalischer Kompetenz. Es erscheint daher sinnvoll, grundlegende Ideen über Felder bereits im Anfangsunterricht zu etablieren, um eine Grundlage für die sukzessive Entwicklung eines diesbezüglich tieferen Verständnisses zu legen. In der Sekundarstufe I wird das Magnetfeld oft bereits im Anfangsunterricht eingeführt. Seine Wirkung wird mithilfe von Eisenfeilspänen visualisiert und es wird genutzt, um Phänomene des Permanentmagnetismus zu erklären. Die Einführung des Magnetfeldes erfolgt dabei isoliert. Eine Verallgemeinerung auf das Feldkonzept als Ganzes findet nicht statt. Formal wird das Feld dann in der Oberstufe als mathematisches Konstrukt eingeführt, nämlich als Vektorfeld, das Betrag und Richtung einer Größe angibt. Diese Vorgehensweise verlangt von den Schülerinnen und Schülern, dass sie die mathematischen Grundlagen von (Vektor-)Feldern verstehen müssen, während sie gleichzeitig versuchen ein mentales Modell aufzubauen (Saarelainen et al., 2006). Diese Einführung des Feldes als mathematisches Konstrukt führt häufig zu einer Überforderung der Schülerinnen und Schüler und dürfte der Grund dafür sein, dass es ihnen nicht gelingt, ein mentales Modell von Feldern zu entwickeln (Greca & Moreira, 1997).

Studien zum Verständnis der Schülerinnen und Schüler sind hauptsächlich auf die Sekundarstufe II und die Universität fokussiert (Viennot & Rainson, 1992). Eine Ausnahme bilden die Untersuchungen von Bar et al. (2007), die Schülerinnen und Schüler verschiedener Altersgruppen untersucht haben, sowie Bradamante und Viennot (2007), die das Verständnis von Magnet- und Gravitationsfeldern bei Schülerinnen und Schülern zwischen 9 und 11 Jahren erfasst haben. Sämtliche einschlägigen Studien belegen, dass Schülerinnen und Schüler auch Schwierigkeiten mit dem Feldkonzept haben: Sie verwechseln Kraft und Feldstärke und halten Feldlinien für real (Guisasola et al., 2004; Pocoví, 2007; Schecker et al., 2018). Sie haben Schwierigkeiten, zu erkennen, dass Felder auch abstoßende und nicht immer anziehende Wirkung haben können (Bradamante & Viennot, 2007). Außerdem präferieren Schülerinnen und Schüler andere Konzepte, wie beispielsweise das Coulombsche Gesetz, anstelle des

Feldkonzeptes des elektrischen Feldes, um Phänomene zu erklären, die eine Betrachtung des elektrischen Feldes erfordern (Furió & Guisasola, 1998). Felder gelten in der Folge als zu komplex für jüngere oder leistungsschwächere Schülerinnen und Schüler, und eine zu frühe Einführung wird daher im Allgemeinen vermieden (Greca & Moreira, 1997). Einzelne Studien legen jedoch auch nahe, dass grundlegende Ideen zum Feldkonzept von jungen Schülerinnen und Schülern verstanden werden können. Bar et al. (2007) haben in ihrer Untersuchung gezeigt, dass Schülerinnen und Schüler Interaktionen auf Distanz in unterschiedlichen Kontexten wie Interaktion in Magnetfeldern und Interaktion im Gravitationsfeld miteinander in Verbindung setzen können; und Bradamante und Viennot (2007) fanden heraus, dass Schülerinnen und Schüler nachvollziehen können, dass Felder Objekte wie die Erde und Magnete umgeben und eine gewisse Gestalt annehmen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Forschung zum Verständnis des Feldkonzeptes für die Sekundarstufe I bisher eher rudimentär und wenig systematisch ist. Die wenigen vorliegenden Studien sind ambivalent. Sie legen nahe, dass Schülerinnen und Schüler Schwierigkeiten mit der abstrakten Natur des Feldkonzeptes, insbesondere wahrscheinlich mit dem formalen Feldbegriff, haben, denn jüngere Schülerinnen und Schüler können sehr wohl einzelne Aspekte des Feldkonzeptes verstehen. Um eventuellen Schwierigkeiten zu begegnen, wird in der Literatur vorgeschlagen, Felder als physikalische Entität einzuführen, die visualisiert werden kann (F. Herrmann, 1989; Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). Quinn (2014) zeigt sich zuversichtlich, dass Felder dann auch jüngeren Schülerinnen und Schülern zugänglich gemacht werden können. Im Kontrast zur bisher üblichen Einführung des Feldes als mathematisches Konstrukt im Kontext von Kräften werden Felder in der vorliegenden Studie als physikalische Entitäten im Kontext von Energie eingeführt. Das Feld als physikalische Entität bedeutet, dass das Feld real existiert, obwohl es nicht angefasst oder gesehen werden kann (vgl. auch Furió & Guisasola, 1998). Für das Energieverständnis werden nur wenige Aspekte des Feldkonzeptes benötigt, nämlich, dass sie um ein Objekt herum existieren, Interaktion auf Distanz ermöglichen und eine bestimmte Gestalt annehmen. Diese grundlegenden Ideen des Feldkonzeptes können auch junge Schülerinnen und Schüler verstehen (Bar et al., 2007; Bradamante & Viennot, 2007).

### **Ziel und Forschungsfragen**

Potentielle Energie ist ein schwieriges Konzept für Schülerinnen und Schüler. Sie scheinen häufig kein robustes Verständnis dieser Form von Energie zu entwickeln. Dies könnte daran liegen, dass sie sie nicht eindeutig lokalisieren und bestimmen können (vgl. z.B. Lindsey et al., 2012; Quinn, 2014). Das mangelnde Verständnis potentieller Energie behindert in der Folge den Aufbau eines fundierten Energieverständnisses (Lindsey, 2014). Felder könnten helfen, diese Schwierigkeiten zu adressieren, denn sie erlauben es, die potentielle Energie zu lokalisieren und als Interaktion (mindestens) zweier interagierender Objekte zu bestimmen (NRC, 2012; Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). Rückl (1991) hat ein Unterrichtskonzept

entwickelt, welches Energie als in Feldern gespeichert einführt. Er entwickelte dabei den neuen Begriff der Feldenergie als Synthese aus dem Energiekonzept, dem Teilchenkonzept und dem Feldkonzept, mithilfe dessen er Phänomene erklärte. Rückls Konzept ist jedoch derart elaboriert, dass es keinesfalls für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I geeignet wäre und selbst für heutige Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe II nur schwer verständlich wäre. Auch im Karlsruher Physikkurs (KPK, Friedrich Herrmann & Pohlig, 2016) wird die Energie im Gravitationsfeld gespeichert. Das Gravitationsfeld wird jedoch nur als ein möglicher Energiespeicher neben weiteren dargestellt. Das Feld als Energiespeicher wird somit nur für die potentielle Energie der Lage eingeführt. Eine konzeptionelle Einführung des Feldes als Speicher potentieller Energie findet nicht statt. Eine erste konsequente Umsetzung dieser Idee findet sich bei Nordine et al. (2018) und Fortus et al. (2019) im Rahmen des System-Transfer-Ansatzes. Dieser Ansatz verzichtet vollständig auf die Einführung von Energieformen und die Umwandlung zwischen Energieformen und fokussiert sich stattdessen auf den Transfer von Energie zwischen Systemen. Felder fungieren dabei als Systeme, in denen Energie (z.B. mit der Gravitationswirkung zwischen zwei Objekten assoziierte Energie) gespeichert ist. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass diese Konzeptualisierung den Schülerinnen und Schülern den Zugang zur Energie erleichtert und auch nicht zu komplex für leistungsschwächere Schülerinnen und Schüler ist (Fortus et al., 2019; Kubsch et al., 2019). Allerdings weicht der System-Transfer-Ansatz stark von dem in der Praxis des Physikunterrichts vorherrschenden, formenbasierten Unterrichtsansatz ab. Zudem ist der Effekt der Einführung von Feldern als „Energiespeichern“ nicht isoliert vom System-Transfer-Ansatz zu ermitteln. Obwohl es verschiedene Ansätze in der Literatur gibt, Felder einzubinden, liegen bisher keine eindeutigen Erkenntnisse vor, wie sich die Einführung von Feldern auf die Entwicklung des Verständnisses von Energie auswirkt; insbesondere nicht im Kontext des in der Praxis vorherrschenden, formenbasierten Ansatzes.

Ziel der vorliegenden Studie ist es, herauszufinden, inwieweit sich die Ergebnisse von Fortus et al. (2019) auch auf den in der Unterrichtspraxis vorherrschenden, formenbasierten Ansatz übertragen lassen. Insbesondere soll untersucht werden, ob die Einführung potentieller Energieformen als in einem entsprechenden Feld zwischen zwei (oder mehr) interagierenden Objekten gespeicherter Energie die Entwicklung des Energieverständnisses fördert. Die entsprechende Forschungsfrage lautet:

- 1. Inwieweit führt die Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie im Rahmen eines formenbasierten Unterrichtsansatzes zu einem im Vergleich zum herkömmlichen formenbasierten Unterrichtsansatz verbesserten Energieverständnis?*

Die Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie birgt dabei die Gefahr, dass man letztendlich nur versucht, ein abstraktes Konzept durch ein anderes abstraktes Konzept zu erklären, und dadurch das Verständnis der potentiellen Energie

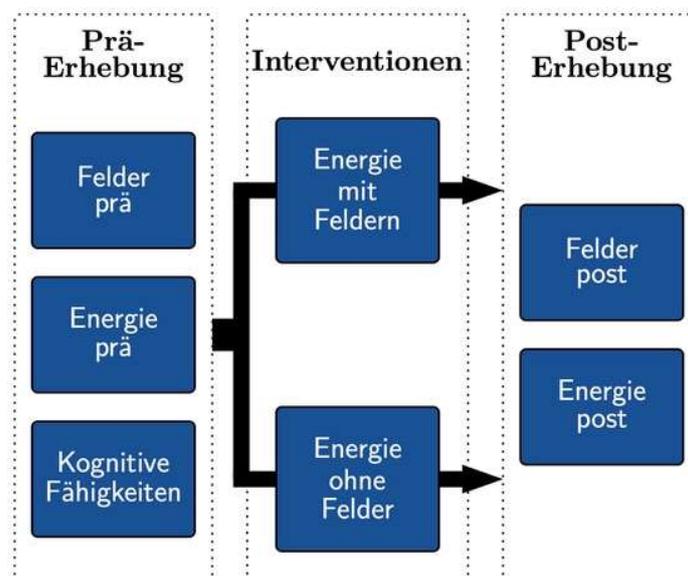
zusätzlich erschwert. Daher soll in einem weiteren Schritt untersucht werden, inwieweit der Effekt der Einführung letztendlich vom Verständnis von Feldern abhängt. Daraus ergibt sich als weitere Forschungsfrage:

2. *Inwieweit wird der Effekt der Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie im Rahmen eines formenbasierten Unterrichtsansatzes durch das Felderverständnis der Schülerinnen und Schüler moderiert?*

Dieser zweite Teil der Studie zielt im Sinne einer Exploration darauf ab, Erkenntnisse über die Mechanismen zu gewinnen, die den möglichen Effekten zugrunde liegen.

### Methode

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein quasi-experimentelles Prä-Post-Design mit zwei Interventionsgruppen eingesetzt (vgl. Abb. 1.1). Die eine Interventionsgruppe wurde nach dem formenbasierten Ansatz unterrichtet, die andere Interventionsgruppe wurde ebenfalls nach einem formenbasierten Ansatz unterrichtet, allerdings wurde hier die potentielle Energie explizit als in Feldern gespeichert eingeführt. Diese Gruppe wird im Folgenden als Felder-Gruppe, die andere Gruppe als Nicht-Felder-Gruppe bezeichnet.



**Abb. 1.1** Studiendesign als quasi-experimentelles Prä-Post- Design mit zwei Interventionsgruppen (Felder und Nicht-Felder) und Erhebungen vor und nach den Interventionen

Vor Beginn und direkt im Anschluss an die jeweilige Unterrichtseinheit wurde das Verständnis von Energie und von Feldern erhoben. Als Kontrollvariable wurden die kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler vor Beginn der Intervention erfasst. Die Erhebung der kognitiven Fähigkeiten erfüllte zwei Funktionen: Sie diente der Prüfung, inwieweit die Gruppen als

vergleichbar angesehen werden können, und als Kovariate des Effekts der Einführung von Feldern auf die Entwicklung des Energieverständnisses.

### **Stichprobe**

An der Studie haben vier 6. Klassen mit insgesamt 90 Schülerinnen und Schülern eines Gymnasiums in Schleswig-Holstein teilgenommen. Die Stichprobe ist mit Schülerinnen und Schülern der 6. Klasse eher jung. Die Studie von Tobin et al. (2018) legt jedoch nahe, dass grundlegende Aspekte des Energiekonzeptes (wie z.B. Energieformen) auch schon für sehr junge Schülerinnen und Schüler der Grundschule zugänglich sind. Die Fachanforderungen in Schleswig-Holstein (2016) fordern explizit eine einführende Einheit zur Energie im Anfangsunterricht. Die vier Klassen der vorliegenden Studie wurden zufällig der Felder-Gruppe ( $N = 47$ ) bzw. Nicht-Felder-Gruppe ( $N = 43$ ) zugeordnet. Sie wurden von zwei Lehrkräften unterrichtet. Jede Lehrkraft unterrichtete eine Klasse der Felder- und eine Klasse der Nicht-Felder-Gruppe, um den Einfluss der Lehrperson auf die Ergebnisse zu minimieren. Um die Vergleichbarkeit der Gruppen zu prüfen, wurden die Felder-Gruppe und die Nicht-Felder-Gruppe zum Prätest-Zeitpunkt in Bezug auf ihre kognitiven Fähigkeiten und ihre Vorkenntnisse über Felder und Energie verglichen. Der Kognitive Fähigkeitstest (KFT) (Heller & Perleth, 2000) zeigte bei vernachlässigbarem Effekt keine signifikanten Gruppenunterschiede in Bezug auf die kognitiven Fähigkeiten mit ( $t(88) = -0,9, p = 0,37, d = 0,19$ ). Auch beim Verständnis über Felder ( $t(88) = -0,6, p = 0,53, d = 0,13$ ) und über Energie ( $t(88) = -0,4, p = 0,66, d = 0,09$ ) zeigte sich bei vernachlässigbaren Effekten kein signifikanter Gruppenunterschied. Die Einordnung der Effektstärken orientiert sich an Cohen (2013).

### **Interventionen<sup>2</sup>**

Beide Unterrichtseinheiten basierten auf denselben didaktischen Grundprinzipien, behandelten die gleichen Energieformen und Experimente und nahmen die gleiche Unterrichtszeit ein. Sie unterschieden sich aber darin, dass, während die Nicht-Felder-Gruppe eine typische Unterrichtseinheit nach dem in der Unterrichtspraxis vorherrschenden Formenansatz erhielt, die Felder-Gruppe nach einer entsprechenden Unterrichtseinheit unterrichtet wurde, in der jedoch die potentielle Energie als in Feldern gespeichert konzeptualisiert wurde. Beide Unterrichtseinheiten wurden mit Blick auf die ökologische Validität in enger Zusammenarbeit mit erfahrenen Lehrkräften entwickelt. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass Ziele, Inhalte und (unterrichtliche) Aktivitäten der Interventionen dem schulischen Rahmen und der Stichprobe angemessen waren.

#### *Didaktische Prinzipien beider Gruppen*

Der Unterricht wurde so konzipiert, dass er den Kompetenzanforderungen der Bildungsstandards im Fach Physik (KMK, Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2005) genügt. Im Besonderen sollte er die Schülerinnen und Schüler durch Experimente aktivieren und ihre

---

<sup>2</sup> Die Lehr- und Lernmaterialien der Unterrichtseinheiten stehen als Open Educational Resources (OER) zur Verfügung.

naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen fördern und damit neben der Förderung des Fachwissens einen weiteren Schwerpunkt auf die Förderung der Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung legen. Im Zentrum beider Unterrichtseinheiten standen daher Experimente, die von den Schülerinnen und Schülern eigenständig durchgeführt, protokolliert und ausgewertet werden sollten.

Die innere Kohärenz der Einheiten wurde durch vier Phänomene und eine Leitfrage hergestellt, die im Einstieg in die Einheiten präsentiert wurden und die im Laufe der Einheiten von den Schülerinnen und Schülern beantwortet bzw. erklärt werden sollten. Dieses Vorgehen orientierte sich am Prinzip des *project-based learnings* (Krajcik, J. S., & Shin, N., 2014) und am Unterrichtsgang einer erprobten, lernförderlichen Unterrichtseinheit zum Thema Energie (Fortus et al., 2012). Die Implementation der Einheiten folgte den aus der Forschung abgeleiteten Designprinzipien, wie die Orientierung an Leitfragen, die Einbettung der Lerninhalte in alltagsrelevante Kontexte und die konsequente Ausrichtung der Materialien auf die Lernziele.

Den Rahmen der Einheiten bildete die Beantwortung der Leitfrage: „Was versetzt ein Objekt in Bewegung und wovon hängt es ab, wie schnell ein Objekt werden oder wie hoch ein Objekt kommen kann?“ Sie zielte damit inhaltlich auf die Indikatoren der verschiedenen Energieformen und die Umwandlung der Energieformen ineinander ab. Ziel der Unterrichtseinheiten war, dass die Schülerinnen und Schüler diese Leitfrage am Ende beantworten können sollten. Die Beantwortung erforderte eine Rekapitulation und Verallgemeinerung des zu einzelnen Energieformen Gelernten und erlaubte es der Lehrkraft zu überprüfen, ob die Schülerinnen und Schüler die Lernziele erreicht haben.

Bei den vier Phänomenen, die im Laufe der Einheit erarbeitet wurden, handelte es sich um ein Pendel, eine fallende Kugel, eine magnetische Ballerina, die sich dreht, wenn sich ein magnetischer Spiegel nähert, und einen Frosch oder eine Spinne auf einer Feder, die hochspringen, wenn man zuvor die Feder zusammengedrückt hat. Es wurde bei der Auswahl der Phänomene darauf geachtet, dass diese das Interesse der Schülerinnen und Schüler wecken sollten, und deswegen ein bewusst spielerischer Zugang gewählt. Die Phänomene wurden den Schülerinnen und Schülern in einer ersten Unterrichtsstunde im Einstieg in die Unterrichtseinheiten präsentiert. Die Schülerinnen und Schüler sollten in dieser Stunde frei experimentieren und Fragen zu den Phänomenen, welche auf einem großen Plakat (Fragenplakat genannt) festgehalten wurden, formulieren.

Auf diese erste Unterrichtsstunde folgten jeweils zwei Unterrichtsstunden, in denen die Energieformen Bewegungsenergie, Spannenergie, magnetische Energie und Lageenergie sowie deren Umwandlungen ineinander erarbeitet wurden. Die Energie wurde über die Bewegungsenergie eingeführt, da bei dieser Energieform die Schnittmenge zwischen Alltagsvorstellungen der Schülerinnen und Schüler und physikalischem Energiebegriff besonders groß ist (Quinn, 2014). Sowohl in der Alltagsvorstellung der Schülerinnen und

Schüler als auch im physikalischen Sinne geht Bewegung mit Energie und mehr Bewegung mit mehr Energie einher. Dies sollte den Schülerinnen und Schülern den Einstieg erleichtern.

Der Ablauf der zwei aufeinander folgenden Unterrichtsstunden zu den genannten Energieformen folgte jeweils einem festen Schema: Der Einstieg erfolgte über ein Phänomen in Form eines Demonstrationsexperiments, anhand dessen die Energieform eingeführt wurde. In der anschließenden Hinführung sollten die Schülerinnen und Schüler Hypothesen zu den Indikatoren der Energieform (vgl. Nordine, Fortus & Krajcik, 2010) aufstellen, die sie in der Erarbeitung in Gruppen im Experiment untersuchen sollten. Diese Untersuchung erfolgte halb-quantitativ, indem die Schülerinnen und Schüler angeben sollten, wie die Menge an einer Energieform mit einem bestimmten Indikator zu- oder abnimmt oder, dass immer, wenn die Menge an einer Energieform abnimmt, die Menge einer anderen Energieform zunehmen muss. Die Arbeitsblätter waren wie ein Versuchsprotokoll aufgebaut. Zur Förderung der Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung waren die Schülerinnen und Schüler angehalten, die Versuchsfrage zu formulieren und Hypothesen über die Abhängigkeit der behandelten Energieform von bestimmten Größen zu formulieren. Sie sollten jedoch keine Werte berechnen. Ein Beispiel eines typischen Arbeitsblattes (zur magnetischen Energie) findet sich in Anhang 1.1. Die Sicherung der Ergebnisse fand im Plenum statt. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass alle Schülerinnen und Schüler die richtigen Ergebnisse erhielten. Abschließend sollten die Schülerinnen und Schüler ihr Wissen in Aufgaben anwenden und darin fortschreiten, die Phänomene zu erklären, welche die Einheit begleiteten.

Ziel der beiden Stunden zu einer Energieform war, dass die Schülerinnen und Schüler eines der vier eingangs der Unterrichtseinheiten explorierten Phänomene erklären und damit einen Teil der von ihnen formulierten Fragen beantworten können sollten.

Da Neumann et al. (2013) gezeigt haben, dass Schülerinnen und Schüler im Anfangsunterricht primär in der Lage sind, ein Verständnis von Energieformen und ihrer Umwandlung ineinander zu entwickeln, wurde im Sinne einer didaktischen Reduktion und eines altersgerechten Zugangs zum Energiekonzept auf eine explizite Einführung der Entwertung und Erhaltung von Energie verzichtet. Im Rahmen der didaktischen Reduktion wurde auch auf die Einführung des Energietransports zugunsten einer vertieften Behandlung der Energieumwandlung verzichtet. Ein weiteres Plakat begleitete die Schülerinnen und Schüler durch die Einheit: ein Plakat, auf dem die physikalischen Prinzipien notiert wurden. Die Schülerinnen und Schüler sollten zu jedem behandelten Aspekt, sprich zu den verschiedenen Energieformen und der Energieumwandlung, einen Merksatz formulieren, der dann über die gesamte Einheit sichtbar im Klassenraum aufgehängt wurde. Das Plakat sollte eine schnelle Reaktivierung der Inhalte der vorangegangenen Stunden ermöglichen, was besonders in Anbetracht dessen, dass Physik häufig nur einmal wöchentlich unterrichtet wird, gewinnbringend war.

#### *Unterschiede zwischen den Unterrichtseinheiten*

Die Reihenfolge der Einführung der Energieformen in der für den formenbasierten Ansatz typischen Unterrichtseinheit (Nicht-Felder-Gruppe) orientierte sich an der erprobten

Unterrichtseinheit von Fortus et al. (2012) und sah nach der Einführung der Bewegungsenergie die Einführung der Lageenergie vor. Danach erfolgte die Erarbeitung der Spannenergie und abschließend der magnetischen Energie. Die Reihenfolge der Einführung der Energieformen in der formenbasierten Unterrichtseinheit, in der die potentielle Energie als in Feldern gespeichert konzeptualisiert wurde, folgte einer veränderten Reihenfolge, die sich aus den didaktischen Überlegungen ergab, wie die Einführung des Feldes am besten unterstützt werden kann. Die Reihenfolge der Einführung der Energieformen im Vergleich lässt sich Tab. 1.1 entnehmen.

**Tab. 1.1** Übersicht über die Lerninhalte der Unterrichtseinheiten

Unterrichtsstunde	Inhaltlicher Schwerpunkt	
	Nicht-Felder-Gruppe	Felder-Gruppe
1	Herleitung der Leitfrage „Was versetzt ein Objekt in Bewegung und wovon hängt es ab, wie schnell ein Objekt werden, oder wie hoch ein Objekt kommen kann?“ Einführung des Energiebegriffs	
2 + 3	Einführung der Bewegungsenergie und deren Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Masse eines Objektes	
4 + 5	Einführung der Lageenergie und deren Abhängigkeit vom Abstand zweier Objekte und der Masse des Objektes. Einführung der Energieumwandlung am Beispiel der Lage- und der Bewegungsenergie	Einführung der Spannenergie und deren Abhängigkeit von der Verformung und der Dicke des Drahtes. Einführung der Energieumwandlung am Beispiel der Spann- und der Bewegungsenergie
6 + 7	Einführung der Spannenergie und deren Abhängigkeit von der Verformung und der Dicke des Drahtes	Einführung des Feldes am Beispiel des Magnetfeldes Einführung der magnetischen Energie und deren Abhängigkeit vom Abstand der Magnete und der Stärke der Magneten
8 + 9	Einführung der magnetischen Energie und deren Abhängigkeit vom Abstand der Magnete und der Stärke der Magneten	Einführung der Lageenergie und deren Abhängigkeit vom Abstand zweier Objekte und der Masse des Objektes und Einführung des Gravitationsfeldes.

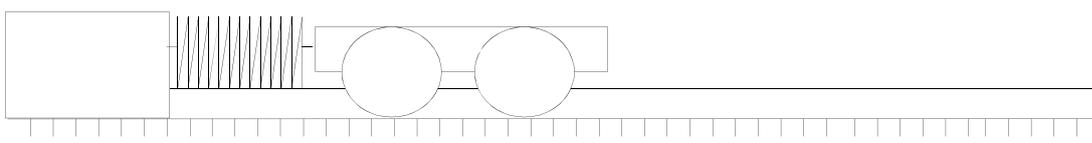
		Vergleich des Magnetfeldes und des Gravitationsfeldes
10	Beantwortung der Leitfrage und Ausblick auf die thermische Energie	

Die Einführung des Feldkonzepts folgte dem übergeordneten Ziel, den Schülerinnen und Schülern dadurch die Entwicklung eines Verständnisses der Energie zu erleichtern. Felder sind ein komplexes Konstrukt, und es ist zu befürchten, dass es besonders leistungsschwächeren Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten bereitet. Als ursächlich für die Schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler kann der mathematische Charakter des Feldes angesehen werden. In der vorliegenden Studie wurde das Feld deshalb nicht als mathematisches Konstrukt, sondern als physikalische Größe eingeführt. Das Feld wurde dabei auf zwei für das Energieverständnis und die Erklärung von Phänomenen wesentliche Aspekte reduziert, wie sie auch bei (Fortus et al., 2019) im Vordergrund standen und mit denen die Schülerinnen und Schüler dort keine Schwierigkeiten hatten.

1. Die Interaktion zwischen zwei Objekten, die sich nicht berühren, wird durch ein Feld vermittelt.
2. Felder speichern Energie. Mit dem Abstand zweier Objekte ändert sich die Form des Feldes und mit ihr die Menge an gespeicherter Energie.

Besonders herausfordernd war es, Phänomene zu finden, die den Schülerinnen und Schülern den Zugang zum Feldkonzept und damit die Entwicklung des Verständnisses der potentiellen Energie erleichtern sollten. Da besonders bei der Lageenergie Schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler zu erwarten waren, wurden mit dem Ziel einer langsamen Heranführung an die Lageenergie und das damit verbundene Gravitationsfeld zunächst die Spannenergie und die magnetische Energie eingeführt.

Der Einführung des Feldkonzepts wurde anhand der Spannenergie eingeleitet. Im Experiment der 4. und 5. Stunde wurde zu Beginn ein Wagen auf einer Fahrbahn gegen eine an einem Block befestigte Feder gedrückt (siehe Abb. 1.2 Versuchsaufbau zur Spannenergie), so dass diese verformt wurde, und dann losgelassen. Die Schülerinnen und Schüler erhielten die Aufgabe, zu erläutern, a) ob zu Beginn und ob nach dem Loslassen Bewegungsenergie vorhanden ist, b) wo die Energie herkommt bzw. wo sie vor dem Loslassen gespeichert ist und c) woran man das erkennen kann.

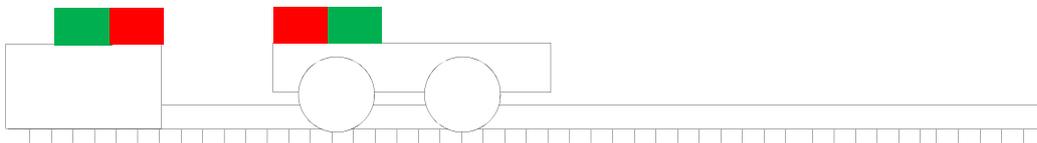


**Abb. 1.2** Versuchsaufbau zur Spannenergie

Die Schülerinnen und Schüler sollten erläutern, dass nur nach dem Loslassen Bewegungsenergie vorhanden war, da der Wagen sich mit einer gewissen Geschwindigkeit

bewegte, und dass diese Energie vorher in der Feder gespeichert wurde, was man daran erkennen konnte, dass sich diese verformte. Die Entscheidung, zunächst die Spannenergie einzuführen, lag darin begründet, dass die Verformung der Feder direkt von den Schülerinnen und Schülern beobachtet werden können sollte.<sup>3</sup>

Dieser Verformungsgedanke wurde in der 6. und 7. Stunde bei der Einführung der magnetischen Energie aufgegriffen. Denn auch das Magnetfeld verformt sich, wenn durch Abstandsänderung zweier Magnete Energie in ihm gespeichert oder aus ihm entnommen wurde. Der Verformungsgedanke sollte den Zugang zu der Idee vorbereiten, dass magnetische Energie in der Verformung des Magnetfeldes gespeichert ist. Der Versuchsaufbau war der gleiche wie in der Doppelstunde zur Spannenergie: ein Wagen auf einer Fahrbahn. Dieses Mal war auf dem Wagen und dem Block jeweils ein Magnet befestigt. Die Magnete waren so angebracht, dass sie sich abstießen (siehe Abb. 1.3 Versuchsaufbau zur magnetischen Energie).



**Abb. 1.3** Versuchsaufbau zur magnetischen Energie

Zu Beginn wurde der Magnet auf dem Wagen dem Magneten auf dem Block genähert und dann losgelassen. Erneut wurden die Schülerinnen und Schüler aufgefordert, die oben angeführten drei Fragen zu beantworten. Durch die Analogie zur Spannenergie sollte den Schülerinnen und Schülern klar werden, dass es etwas zwischen den Magneten geben muss, das Energie speichert: das Magnetfeld. Mithilfe von Magnetfeldplatten (Eisenfeilspäne in einem Fluid in einem durchsichtigen Quader) wurde veranschaulicht, dass sich das Magnetfeld, wie zuvor die Feder, verformte, wenn sich der Abstand der Magnete änderte. Das Magnetfeld, die Magnetfeldlinien und die Sichtbarmachung der Wirkung des Magnetfeldes durch Eisenfeilspäne sollten den Schülerinnen und Schülern bereits aus einer vorangegangenen Unterrichtseinheit zum Permanentmagnetismus bekannt sein. Die Einführung des Feldes und die Visualisierung der Wirkung des Feldes sollten dadurch vorbereitet worden sein. In der sich anschließenden halbquantitativen Untersuchung sollten die Schülerinnen und Schüler feststellen, dass die Menge an im Feld gespeicherter magnetischer Energie vom Abstand der Magnete abhing. In dieser Doppelstunde sollten die Schülerinnen und Schüler die zwei im Energiekontext entscheidenden Eigenschaften eines Feldes kennenlernen.

---

<sup>3</sup> Bei der Einführung der Spannenergie wurde zunächst darauf verzichtet, sie als potentielle Energie einzuführen, da es sich bei dem zugehörigen Feld um ein Feld zwischen mikroskopischen Partikeln handelt. Schülerinnen und Schüler scheinen jedoch Schwierigkeiten mit dem Wechsel auf die mikroskopische Ebene zu haben (Kubsch, Opitz et al. (2021)). Das Feld anhand der mikroskopischen Ebene einzuführen, hätte daher ein Lernhindernis darstellen können. Im Anschluss an die Einführung der magnetischen Energie und der Lageenergie wurde diese Zuordnung der Spannenergie zu den potentiellen Energieformen nachgeholt.

Der Abstand zwischen Objekten stellte das Bindeglied zur Einführung der Lageenergie in der 8. und 9. Stunde dar. Der Einstieg erfolgte über ein Video, das einen Magnetwagen zeigte, wie er sich zur Seite bewegte, langsamer wurde, stehen blieb und wieder in die andere Richtung beschleunigte. Die Schülerinnen und Schüler wurden aufgefordert, das Video zu beschreiben. Sie sollten benennen, warum die Bewegung des Wagens nur mit den im Video gezeigten Objekten nicht zu erklären ist. Die Schülerinnen und Schüler sollten schnell identifizieren, dass ein zweiter Magnet fehlte. Diese Vermutung wurde durch ein auflösendes Video bestätigt, das den zweiten Magneten zeigte. Anschließend wurde ein Video abgespielt, das einen Ball zeigt, der in die Luft geworfen wird. Dieses Video war jedoch um 90° gedreht, so dass es so aussah, als würde der Ball horizontal zur Seite fliegen, immer langsamer werden, stoppen und dann umdrehen. Der Ball führte die gleiche Bewegung aus wie zuvor der Magnetwagen. Auch hier sollten die Schülerinnen und Schüler benennen, dass ein zweiter Partner fehle, um diese Bewegung zu erklären. Die Auflösung erfolgte durch das Video in vertikaler Orientierung, auf dem auch der Fußboden zu sehen war. Anhand der bereits in den vorherigen Stunden verwendeten didaktischen Impulse sollten die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass erneut Energie in einem Feld, hier das Gravitationsfeld, gespeichert sein musste und dass die Menge an gespeicherter Energie vom Abstand der Objekte abhing. Diese bei der Erarbeitung des Magnetfelds erlernten Prinzipien sollten die Schülerinnen und Schüler nun auf das Gravitationsfeld übertragen können. Aus der Forschung ist bekannt, dass die Lageenergie der für die Schülerinnen und Schüler komplexeste Vertreter der potentiellen Energieformen ist. Die vorherige Einführung des Magnetfeldes sollte es möglich machen, den Schülerinnen und Schülern zu verdeutlichen, dass für die Bestimmung der Menge an einer potentiellen Energieform immer (mindestens) zwei Objekte berücksichtigt werden müssen. Bei Magneten entspricht dieser Zugang der Alltagsintuition der Schülerinnen und Schüler. Im Gegensatz zur Lageenergie sollte es für die Schülerinnen und Schüler bei magnetischer Energie leicht nachvollziehbar sein, dass zwei Magnete betrachtet werden müssen, um über magnetische Energie zu sprechen. Bei der Lageenergie scheint es aus den Alltagserfahrungen so, als ob nur ein Objekt beteiligt ist, da die Erde sich aus Schülerinnen- und Schülerperspektive nicht bewegt und somit häufig vergessen wird. Bei der Lageenergie vergessen die Schülerinnen und Schüler leicht die Notwendigkeit eines zweiten Objekts, da für sie die Präsenz der Erde selbstverständlich ist. Die Notwendigkeit einer Einbeziehung eines zweiten Objektes und damit die Wahl einer Referenzhöhe sollten in der Unterrichtseinheit deswegen durch die zuvor eingeführte magnetische Energie verdeutlicht werden. Darüber hinaus bewegt sich das Magnetfeld auf kleineren Skalen von einigen Zentimetern, während sich das Gravitationsfeld weit über die Erde hinaus erstreckt. Es wurde erwartet, dass das Verständnis der Lageenergie durch die Einführung der magnetischen Energie vorbereitet und somit erleichtert wird. Darüber hinaus sollte die Unterrichtseinheit eine Reaktivierung von Vorwissen und eine Anwendung des Gelernten ermöglichen. Bei der Einführung der Lageenergie in der 8. und 9. Stunde sollten die Schülerinnen und Schüler die beiden grundlegenden Ideen über Felder im

Zusammenhang mit Energie, die sie bei der magnetischen Energie in der 5. und 6. Stunde kennengelernt haben, reaktivieren und auf das neue Phänomen übertragen. In der abschließenden 10. Stunde sollten die Schülerinnen und Schüler die vier Phänomene abschließend erklären, welche die Einheit begleitet haben. Sie sollten das Gelernte anwenden. Diese Reaktivierung und Anwendung des Gelernten sollte der tiefergehenden kognitiven Auseinandersetzung der Schülerinnen und Schüler mit dem Lerngegenstand dienen und somit eine Erreichung der Lernziele auch in der kurzen Interventionszeit möglich machen.

### **Instrumente<sup>4</sup>**

Zur Erfassung des Energieverständnisses wurde ein Papier-und-Bleistift-Test aus etablierten Instrumenten zusammengestellt (u.a. Fortus et al., 2019, Kubsch et al., 2019, Michel & Neumann, 2016, Nordine, University of Michigan/2007, Swackhamer & Hestenes, 2005). Die Auswahl und Anpassung der einzelnen Aufgaben orientierte sich an den kognitiven Voraussetzungen der Schülerinnen und Schüler sowie den Inhalten der Unterrichtseinheiten. Dabei wurde sich – mit Blick auf die Inhalte der Interventionen – auf das Gebiet der Mechanik beschränkt<sup>5</sup> und es wurden keine Aufgaben zur Energieentwertung oder -erhaltung aufgenommen. Zudem wurde bei der Auswahl (und Anpassung) der Aufgaben darauf geachtet, dass diese nicht offensichtlich Schülerinnen und Schüler einer der beiden Gruppen begünstigen. Es kam eine Kombination aus Multiple-Choice- und offenen Aufgaben zum Einsatz. Der Prätest umfasste 15 Aufgaben, davon 9 Multiple-Choice- und 6 offene Aufgaben. Der Posttest umfasste 20 Aufgaben, davon 10 Multiple-Choice- und 10 offene Aufgaben. Der Prätest ist gegenüber dem Posttest um diejenigen Aufgaben gekürzt, von denen nicht zu erwarten war, dass die Schülerinnen und Schüler diese mit ihrem Vor- oder Alltagswissen lösen können. Eine Beispielaufgabe aus dem Energietest kann der Abb. 1.4 entnommen werden.

Der für diese Untersuchung neu entwickelte Feldertest unterschied sich nicht zwischen den Messzeitpunkten und umfasste 9 Aufgaben, davon 6 Multiple-Choice- und 3 offene Aufgaben. Inhaltlich zielte er vor allem auf die Eigenschaften ab, die für die Förderung des Energieverständnisses von Bedeutung sind (Interaktion über eine Distanz und Abhängigkeit der Menge an gespeicherter Energie vom Abstand der Objekte). Eine Beispielaufgabe aus dem Feldertest findet sich in Anhang 1.2. Der Energie- und der Feldertest wurden mit jeweils 10 Schülerinnen und Schülern der 8. Jahrgangsstufe pilotiert, um Verständnisschwierigkeiten im Vorfeld aufzudecken und zu beheben. Die Schülerinnen und Schüler wurden gebeten, die Aufgaben zu bearbeiten und unbekannte Begriffe oder unverständliche Formulierungen zu markieren. Sie wurden im Anschluss an die Tests dazu befragt, wie sie die Aufgabe verstanden haben und welche Aspekte ihnen Schwierigkeiten bereitet haben.

---

<sup>4</sup> Der Energietest und der Feldertest können für die eigene Forschung bei den Autoren angefordert werden.

<sup>5</sup> Die Beschränkung auf die Mechanik bezieht sich darauf, dass auch die Phänomene, die magnetische Energie beinhalten, so ausgewählt wurden, dass sie zu einer Bewegung führen.

5: Eine Achterbahn wird vom Boden aus beschleunigt und fährt eine senkrechte Schiene hoch (siehe Abbildung). Im obersten Punkt ist die Geschwindigkeit Null. Danach fährt sie rückwärts die Schiene wieder herunter.



a. Was passiert mit der Bewegungsenergie am höchsten Punkt?

- Die Energie existiert immer noch, ist aber nicht länger aktiv.
- Die Energie ist verschwunden und existiert nicht mehr.
- Die Energie existiert weiter in einer anderen Energieform.
- Die Energie wurde während der Fahrt in Reibung umgewandelt.

b. Begründe deine Antwort.

**Abb. 1.4** Beispielaufgabe aus dem Energietest

Die Auswertung der Papier-und-Bleistift-Tests erfolgte getrennt für den Multiple-Choice-Teil und die offenen Aufgaben. Die Multiple-Choice-Aufgaben boten jeweils vier Antwortmöglichkeiten, von denen eine richtig war. Die Wahl der falschen Antwortmöglichkeit wurde mit 0 kodiert, die der richtigen mit 1. Die offenen Aufgaben wurden auf der Basis eines speziell entwickelten Kodiermanuals ausgewertet. Dabei konnten jeweils 0, 1 oder 2 Punkte erreicht werden. Das Kodiermanual wurde so entwickelt, dass ein höherer Grad an Komplexität und Verknüpfung von Energieaspekten zu einer höheren Punktzahl führte: Die Schülerinnen und Schüler erhielten einen Punkt für die Darstellung von Fakten wie die Identifizierung von Energieformen. Sie erhielten zwei Punkte für die Verknüpfung der Ideen des Energiekonzeptes, indem sie z. B. die Abnahme einer Energieform mit einer Abnahme einer anderen Energieform in Verbindung brachten. Alle Tests zum Energie- bzw. Felderverständnis zum Prä- und zum Posttest-Zeitpunkt wurden doppelt kodiert. Die Interrater-Reliabilität für die offenen Aufgaben war mit einem Cohens Kappa von  $\kappa \geq 0,75$  für alle Aufgaben sehr gut (Wirtz & Caspar, 2002). Die Reliabilität, mit der das Energie- bzw. Felderverständnis gemessen wurde, wurde als interne Konsistenz der Tests bestimmt. Die interne Konsistenz des Energietests war zum Prätest-Zeitpunkt mit Cronbachs  $\alpha = 0,44$  gering und zum Posttest-Zeitpunkt mit  $\alpha = 0,75$  gut. Der neu entwickelte Felder-Test wies zum Prätest-Zeitpunkt mit  $\alpha = 0,47$  ebenfalls eine geringe und zum Posttest-Zeitpunkt mit  $\alpha = 0,68$  eine akzeptable Reliabilität auf. Die Einordnung der Reliabilitäten orientierte sich an Schecker (2014). Die geringen Reliabilitäten zum Prätest-Zeitpunkt waren erwartungskonform, da die Schülerinnen und Schüler zu diesem Zeitpunkt am Beginn ihres ersten Lernjahres Physik standen. Sie sind in gewisser Weise der Prätestung immanent (siehe auch Hadenfeldt et al., 2014). Die Reliabilitäten zum Posttest-Zeitpunkt sind ausreichend für Gruppenvergleiche (Lienert & Raatz, 1994, S. 14).

Die kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler wurden mit Hilfe der nonverbalen Subskala N1 des kognitiven Fähigkeitstests (KFT) erfasst (Heller & Perleth, 2000). Die Reliabilität der verwendeten Subskala war mit einem Cronbachs  $\alpha$  von 0,90 sehr gut.

Um die Vergleichbarkeit der Abläufe für beide Gruppen sicherzustellen, wurden bei der Ausgabe der Tests beiden Gruppen dieselben Informationen gegeben (z.B. wurde mit beiden Gruppen ein vorangestelltes Beispiel zur Aufgabenstellung des KFT gelesen und besprochen.) Die Lehrkraft hat während der Testdurchführung nicht korrigierend eingegriffen und auch keine Fragen beantwortet.

## Ergebnisse

Die deskriptiven Ergebnisse für alle erhobenen Maße sind in Tab. 1.2 dargestellt. Da sich die Anzahl an Items zwischen Prä- und Posttests unterschieden, werden die Maße zum Energieverständnis in Prozent angegeben. Die Maße zum Felderverständnis und den kognitiven Fähigkeiten sind in absoluten Punkten angegeben. Zu diesen Maßen ist (durch einen Schrägstrich getrennt) auch die jeweils maximal erreichbare Punktzahl angegeben.

**Tab. 1.2** Ergebnisse beider Gruppen für das Energie- und Felderverständnis und die kognitiven Fähigkeiten

	Felder-Gruppe (N= 44)		Nicht-Felder-Gruppe (N=23)	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Energieverständnis (prä) in %	18,04	10,12	17,2	8,01
Energieverständnis (post) in %	48,40	16,69	53,8	16,83
Zuwachs im Energieverständnis in Prozentpunkten	30,36	16,98	36,6	15,86
Felderverständnis (prä)	3,16/12	1,88	2,91/12	1,88
Felderverständnis (post)	5,61/12	2,53	3,09/12	1,42
Zuwachs im Felderverständnis	2,45	1,98	0,12	1,45
Kognitive Fähigkeiten	16,98/25	6,13	15,77/25	6,68

Der Vergleich der Maße zum Prätest-Zeitpunkt ergab zunächst keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf ihre kognitiven Fähigkeiten und die Gruppen unterschieden sich auch nicht in Bezug auf ihr Verständnis über Energie und über Felder.

Für jede Gruppe wurde anschließend untersucht, ob bzw. welche Lernzuwächse im Energie- und im Felderverständnis zwischen Prätest- und Posttest-Zeitpunkt zu verzeichnen sind. Mittels t-Test wurde für jede Gruppe der Zuwachs im Energieverständnis auf Signifikanz geprüft. Die t-Tests ergaben sowohl für die Felder-Gruppe ( $t(92) = 10,66, p < 0,001, d = 2,20$ ) als auch für die Nicht-Felder-Gruppe ( $t(84) = 12,88, p < 0,001, d = 2,78$ ) eine signifikante Zunahme im Energieverständnis, mit jeweils deutlichen (d.h. großen) Effekten. Während beide Gruppen Energieunterricht erhalten haben, wurde bei der Felder-Gruppe zusätzlich das Feldkonzept eingeführt. Die Felder-Gruppe sollte daher einen deutlichen Zuwachs im

Verständnis von Feldern aufweisen, die Nicht-Felder-Gruppe hingegen sollte keinen oder nur einen geringen Zuwachs im Verständnis von Feldern (bedingt z.B. durch implizite Lerngelegenheiten) aufweisen. Zur Prüfung der Bedeutsamkeit des Punktezuwachses im Felderverständnis wurden die Punktzahlen im Prä- und Posttest mittels t-Test auf einen signifikanten Unterschied untersucht. Der t-Test zeigte bei den Schülerinnen und Schülern der Felder-Gruppe einen signifikanten Zuwachs im Felderverständnis, mit einer großen Effektstärke ( $t(92) = 5,33, p < 0,001, d = 1,10$ ). Bei den Schülerinnen und Schülern der Nicht-Felder-Gruppe war (erwartungskonform) kein signifikanter Zuwachs zu verzeichnen, bei vernachlässigbarem Effekt ( $t(84) = 0,52, p = 0,61, d = 0,11$ ).

### Forschungsfrage 1: Vergleich des Energieverständnisses

Die deskriptiven Ergebnisse zum Posttest-Zeitpunkt deuten darauf hin, dass die Nicht-Felder-Gruppe ein besseres Energieverständnis entwickelt hat als die Felder-Gruppe. Der t-Test zeigt keinen signifikanten Unterschied im Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt mit einem kleinen Effekt ( $t(88) = 1,52, p = 0,13, d = 0,32$ ). Der t-Test ermöglicht jedoch nicht die Berücksichtigung der Einflüsse der kognitiven Fähigkeiten und des Energie- und Felderverständnisses zum Prätest-Zeitpunkt. Deshalb wurde zusätzlich eine Regressionsanalyse durchgeführt. Die Verwendung eines Regressionsmodells erlaubt außerdem die direkte Interpretation der Koeffizienten im Hinblick auf die Stärke der Effekte. In dieser Regressionsanalyse wurden das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt sowie die Gruppenzugehörigkeit als unabhängige Variablen und das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt als abhängige Variable verwendet. Zusätzlich haben wir für die kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler kontrolliert, da grundsätzlich davon auszugehen ist, dass die kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler beim Lernen, insbesondere abstrakter Konzepte, eine bedeutende Rolle spielen. Dies spiegelte sich auch in den Korrelationen zwischen den Maßen wieder. Diese können Tab. 1.3 entnommen werden.

**Tab. 1.3** Korrelationen zwischen allen Maßen

	Energieverständnis (Prätest)	Energieverständnis (Posttest)	Felderverständnis (Prätest)	Felderverständnis (Posttest)
Energieverständnis (Posttest)	0,29, $p = 0,005$			
Felderverständnis (Prätest)	0,36, $p = 0,001$	0,36, $p < 0,001$		
Felderverständnis (Posttest)	0,24, $p = 0,023$	0,33, $p = 0,002$	0,56, $p < 0,001$	
Kognitive Fähigkeiten	0,09, $p = 0,38$	0,34, $p = 0,001$	0,12, $p = 0,25$	0,23, $p = 0,027$

Die fehlende Korrelation zwischen den Maßen für kognitive Fähigkeiten und Vorwissen legen nahe, dass die Schülerinnen und Schüler wenig interventionsspezifisches Vorwissen aufwiesen und die Aufgaben der Prätests nicht alleine durch kognitive Fähigkeiten zu lösen waren.

Erwartungskonform korrelieren die Maße für das Energieverständnis zum Zeitpunkt des Prätests mit denen zum Zeitpunkt des Posttests. Aus diesem Grund haben wir in den folgenden Regressionsmodellen neben den kognitiven Fähigkeiten ebenfalls für das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt kontrolliert. Aufgrund der geringen Reliabilitäten der Maße zum Zeitpunkt des Prätests wurden in den Regressionsmodellen keine Punktezuwächse verwendet. Das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt ging aber als Kovariate ein.

**Tab. 1.4** Ergebnisse für das Energieverständnis (Posttest) in Abhängigkeit von der Gruppe, den kognitiven Fähigkeiten und dem Energieverständnis (Prätest)

Prädiktor für das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt (standardisierte Koeffizienten)	$\beta$	SE	t
Kognitive Fähigkeiten	0,337 ***	0,096	3,530
Energieverständnis (Prätest)	0,272 **	0,095	2,862
Gruppe (0 = Nicht-Felder-Gruppe, 1 = Felder-Gruppe)	-0,408 *	0,19	-2,155
Notizen. $N = 86$ ; $R^2 = 0,23$ *** $p < .001$ ; ** $p < .01$ ; * $p < .05$ ; . $p = 0.1$			

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse zeigt Tab. 1.4. Wie erwartet, haben die Prädiktoren der kognitiven Fähigkeiten und das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt einen signifikant positiven Einfluss auf das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt. Die Schülerinnen und Schüler, deren kognitive Fähigkeiten stärker ausgeprägt sind, verfügten demnach auch über ein höheres Energieverständnis nach der Intervention. Die Höhe des standardisierten Regressionskoeffizienten  $\beta$  entspricht einem mittleren Effekt. Auch das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt hat einen signifikanten Einfluss auf das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt. Der Effekt ist jedoch klein. Die Gruppenzugehörigkeit hat – unter Kontrolle des Energieverständnisses zum Prätest-Zeitpunkt und der kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler – einen signifikanten Effekt auf das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt. Konkret ist es so, dass die Zugehörigkeit zur Felder-Gruppe einen mittleren negativen Einfluss auf das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt hat. Damit bestätigt sich das bessere Energieverständnis der Nicht-Felder-Gruppe im Vergleich zur Felder-Gruppe. Die Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie im Rahmen eines formenbasierten Unterrichtsansatzes hat also erwartungswidrig nicht zu einem besseren Energieverständnis im Vergleich zum herkömmlichen formenbasierten Unterrichtsansatz geführt.

### **Forschungsfrage 2: Moderation des Effektes durch das Felderverständnis**

Aufgrund theoretischer Vorüberlegungen wurde angenommen, dass die Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie die Gefahr birgt, das Verständnis der potentiellen Energie zusätzlich zu erschweren, weil man versucht, ein abstraktes Konzept

durch ein anderes abstraktes Konzept zu erklären. Es war zu vermuten, dass die Integration des Feldkonzeptes nur dann einen Effekt auf die Entwicklung des Energieverständnisses hat, wenn Felder von den Schülerinnen und Schülern auch verstanden wurden. Der Effekt der Intervention sollte daher über das Feldverständnis moderiert werden. Um zu untersuchen, ob der Effekt der Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie durch das Feldverständnis der Schülerinnen und Schüler moderiert wird, wurde eine weitere Regressionsanalyse durchgeführt. Als abhängige Variable diente wiederum das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt und als unabhängige Variable die Interaktion aus der Gruppenzugehörigkeit und dem Feldverständnis zum Posttest-Zeitpunkt. Als Kovariaten dienten die kognitiven Fähigkeiten und das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt. Tab. 1.5 zeigt die Ergebnisse dieser Regressionsanalyse.

**Tab. 1.5** Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt in Abhängigkeit von der Interaktion zwischen dem Feldverständnis zum Posttest-Zeitpunkt und der Gruppenzugehörigkeit, dem Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt und den kognitiven Fähigkeiten

Prädiktor für das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt (standardisierte Koeffizienten)	$\beta$	SE	t
Kognitive Fähigkeiten	0,285 **	0,097	2,941
Energieverständnis (Prätest)	0,218 *	0,097	2,250
Interaktion Nicht-Felder-Gruppe und Feldverständnis (Posttest)	-0,072	0,200	-0,359
Interaktion Felder-Gruppe und Feldverständnis (Posttest)	0,336 **	0,124	2,717
Notizen. $N = 85$ ; $R^2 = 0,22$ *** $p < .001$ ; ** $p < .01$ ; * $p < .05$ ; $p = 0.1$			

Die Ergebnisse der Regression zeigen erwartungskonform zunächst einen positiven Einfluss der kognitiven Fähigkeiten und des Vorwissens der Schülerinnen und Schüler im Energieverständnis auf die abhängige Variable des Energieverständnisses zum Posttest-Zeitpunkt. Die Höhe der Regressionskoeffizienten entspricht für beide Maße einem kleinen Effekt. Der Effekt der Interaktion der Gruppenzugehörigkeit und dem Feldverständnis auf das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt differiert zwischen den Gruppen. In der Felder-Gruppe zeigt sich über das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt und die kognitiven Fähigkeiten hinaus ein signifikant positiver mittlerer Zusammenhang zwischen der Interaktion von Gruppenzugehörigkeit und Feldverständnis auf das Verständnis von Energie zum Posttest-Zeitpunkt. In der Nicht-Felder-Gruppe hingegen lässt sich (erwartungskonform) kein signifikanter Zusammenhang feststellen. Der signifikante Zusammenhang zwischen dem Feldverständnis und dem Energieverständnis in der Felder-Gruppe bedeutet, dass der Effekt der Einführung von Feldern durch das Feldverständnis moderiert ist. Dies wiederum legt nahe, dass die Konzeptualisierung der (potentiellen) Energie als in Feldern gespeicherter Energie nicht direkt lernwirksam ist, sondern davon abhängt, inwieweit die Schülerinnen und Schüler über ein Verständnis von Feldern verfügen.

## Diskussion

Das Verständnis von Energie ist Voraussetzung dafür, aktuellen naturwissenschaftlichen und technischen Problemen unserer Gesellschaft begegnen zu können. Um den Verständnisschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler besonders im Bereich der potentiellen Energie (Hecht, 2003; Lindsey et al., 2012; Stephanik et al., 2012) Rechnung zu tragen, wurde in der vorliegenden Studie ein Unterrichtsgang nach dem formenbasierten Ansatz entwickelt, der das Feldkonzept bei den potentiellen Energieformen integrierte. Neben dem Energiekonzept stellt jedoch auch das Feldkonzept ein Konstrukt dar, mit dem Schülerinnen und Schüler Schwierigkeiten haben (Bradamante & Viennot, 2007; Greca & Moreira, 1997; Guisasola et al., 2004). Ein abstraktes Konzept, nämlich Energie, mit Hilfe eines anderen abstrakten Konzepts, nämlich Felder, erklären zu wollen, mag gewagt erscheinen. Möglicherweise ist die Idee, Felder in den Energieunterricht zu integrieren, auch gerade deswegen bisher kaum untersucht. Ziel der Studie war es, diese Forschungslücke zu schließen, indem der Effekt der Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie untersucht wurde. Dabei wurde zum einen exploriert, ob die Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie zu einem im Vergleich zum herkömmlichen formenbasierten Unterrichtsansatz verbesserten Energieverständnis führt. Zum anderen wurde analysiert, inwiefern der Effekt der Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie im Rahmen eines formenbasierten Unterrichtsansatzes durch das Feldverständnis der Schülerinnen und Schüler moderiert wird.

Die Ergebnisse zeigten, dass beide Gruppen substantielle Zuwächse im Bereich des Verständnisses von Energie verzeichnen. Darüber hinaus wurde erwartet, dass Felder den Schülerinnen und Schülern dabei helfen, potentielle Energie als real existierende Energie zu erkennen und sie besser zu lokalisieren (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). Ein besseres Verständnis dieser einen von zwei fundamentalen Energieformen, sollte zu einem besseren Verständnis des Energiekonzeptes insgesamt führen (Doménech et al., 2007; Lindsey et al., 2012). Im Vergleich erwies sich der Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe allerdings als geringer als der der Nicht-Felder-Gruppe. Die Annahme, dass sich die Integration des Feldkonzeptes in den Energieunterricht positiv auf die Entwicklung des Energieverständnisses auswirken würde, konnte somit nicht bestätigt werden.

Felder sind ein zentrales Konzept der Physik. Ein Verständnis von Feldern ist deswegen auch losgelöst von seinem Nutzen für die Entwicklung des Energieverständnisses nützlich für den zukünftigen Physikunterricht (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2016). Die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe haben in der gleichen Zeit nicht nur etwas über ein komplexes Konzept, nämlich Energie, gelernt, sondern zusätzlich auch noch etwas über ein weiteres komplexes und abstraktes Konzept, nämlich Felder. Während der Intervention stand nur eine bestimmte Zeit zum Lernen zur Verfügung. Die Zeit, welche die Schülerinnen und Schüler sich mit einem Lerngegenstand beschäftigen, ist ein wesentlicher Prädiktor für den Lernerfolg (Weinstein et al., 2007). Das zusätzliche

Erlernen des Feldkonzeptes beanspruchte in der Felder-Gruppe einen Teil der zur Verfügung stehenden Lernzeit. Die Zeit zum Erlernen des Feldkonzeptes fehlte den Schülerinnen und Schülern möglicherweise für das Erlernen des Energiekonzeptes. Der zusätzliche Inhalt (Felder zusätzlich zur Energie) in gleicher Zeit könnte der Grund für den geringeren Zuwachs der Felder-Gruppe im Vergleich zur Nicht-Felder-Gruppe beim Verständnis von Energie sein. Unklar ist, ob das Felderverständnis der Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe sich als derart ausgeprägt erweist, dass es den geringeren Zuwachs im Energieverständnis aufwiegt. Der zusätzliche Erwerb eines Felderverständnisses stellt nur dann keinen bedeutenden zusätzlichen Lernaufwand dar, wenn sich Synergie-Effekte zwischen dem Lernen von Feldern und dem Lernen von Energie einstellen. Gelingt diese Synergie nicht, wird andersherum lediglich versucht, das abstrakte Konstrukt der Energie durch das ebenfalls abstrakte Konstrukt der Felder zu erklären. In diesem Fall könnte die Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie das Verständnis der potentiellen Energie erschweren. Damit könnte die Entwicklung eines Felderverständnisses als Moderator für den Effekt der Intervention auftreten. Die Ergebnisse belegten, dass die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe deutliche Zuwächse im Felderverständnis verzeichnen. Die Untersuchung des Moderationseffektes zeigte unter Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten und des Energieverständnisses vor Beginn der Einheit einen positiven Effekt der Interaktion zwischen der Gruppenzugehörigkeit zur Felder-Gruppe und dem Felderverständnis auf das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt. Losgelöst von ihren kognitiven Fähigkeiten konnten die Schülerinnen und Schüler, die Felder gut verstanden haben, von deren Verwendung profitieren. Die Annahme, dass der Effekt der Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie durch das Felderverständnis moderiert wird, konnte somit bestätigt werden.

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse dieser Studie darauf hin, dass das Verständnis von Feldern eine wesentliche Voraussetzung für die Wirksamkeit der Konzeptualisierung der (potentiellen) Energie als in Feldern gespeicherter Energie ist. Damit die Schülerinnen und Schüler von dem in dieser Studie erforschten Ansatz tatsächlich profitieren können, muss also möglicherweise darauf geachtet werden, inwieweit sie über ein ausreichendes Verständnis von Feldern verfügen bzw. ein solches Verständnis systematisch aufzubauen. Da das Feldkonzept als solches Schwierigkeiten mit sich bringt, muss Unterricht zu Energie, der sich des Feldkonzeptes bedient, in besonderem Maße darauf ausgerichtet sein, allen Schülerinnen und Schülern den Zugang zu einem Verständnis von Feldern zu ermöglichen. Dass dies durch einen phänomenorientierten Ansatz prinzipiell gelingen kann, zeigen Fortus et al. (2019). Offen bleibt, ob das Felderverständnis möglicherweise ein grundsätzlicher Prädiktor für das Energieverständnis ist. Sollte sich diese Hypothese bestätigen, müssten die leistungsstärksten Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe ein besseres Energieverständnis entwickeln als die leistungsstärksten Schülerinnen und Schüler der Nicht-Felder-Gruppe und gleichzeitig die leistungsschwächsten Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe ein schlechteres

Energieverständnis aufbauen als die entsprechende Subgruppe in der Nicht-Felder-Gruppe. Dieser Hypothese müsste in zukünftigen Studien nachgegangen werden.

### **Limitationen**

Die vorliegende Studie weist eine Reihe von Limitationen auf. Eine Limitation ist die Clusterung der Schülerinnen und Schüler. Die beobachteten Unterschiede könnten in der Folge auch durch andere Faktoren hervorgerufen worden sein, wie zum Beispiel ein unterschiedliches kognitives Fähigkeitsniveau der Schülerinnen und Schüler, ihr Geschlecht, ihr sozioökonomischer Status oder das durch äußere Faktoren bestimmte Lernklima. Der Test zu den kognitiven Fähigkeiten zeigte jedoch keine Unterschiede zwischen der Felder- und der Nicht-Felder-Gruppe. Um weitere Einflüsse möglichst identisch für die Klassen zu halten, wurden vier Parallelklassen einer Schule ausgewählt, und der Unterricht hat für alle vier Klassen am Vormittag stattgefunden, so dass das Lernklima als vergleichbar gut und auch der sozioökonomische Status als ähnlich angenommen werden konnten. Die Stichprobe umfasste mit Schülerinnen und Schülern der 6. Klasse vergleichsweise junge Schülerinnen und Schüler, die am Anfang ihres Physiklernens stehen. Dennoch empfehlen einige Bundesländer die Einführung des Energiekonzeptes bereits im Anfangsunterricht (siehe zum Beispiel Fachanforderungen SH (2016) oder den Kernlehrplan NRW (2008)). Insofern müsste, will man dem hier vorgestellten Ansatz folgen, die potentielle Energie auch bereits im Anfangsunterricht als in Feldern gespeichert eingeführt werden. So war die hier verwendete Unterrichtseinheit konzipiert. Inwiefern die Ergebnisse der Studie auf ältere Schülerinnen und Schüler übertragbar sind und damit auch für eine spätere Einführung des Energiekonzeptes gültig wären, lässt sich mit der vorliegenden Studie nicht beantworten. Die Stichprobe war mit insgesamt 90 Schülerinnen und Schülern nicht sehr groß, was die Belastbarkeit der Erkenntnisse zur Bedeutung des Verständnisses von Feldern einschränkt. Die Ergebnisse sind daher als vorläufig zu verstehen und benötigen weitere Substantiierung. Eine bedeutende Limitation der Studie liegt auch darin, dass die Studie mit nur zwei Lehrkräften durchgeführt wurde. Unterschiede in der Unterrichtsführung, insbesondere zwischen beiden Klassen, könnten die Ergebnisse verzerrt haben. Um dieser Gefahr zu begegnen unterrichtete jede Lehrkraft eine Klasse der Felder- und eine Klasse der Nicht-Felder-Gruppe, und der Unterrichtsgang wurde stark vorgegeben bis hin zu konkreten didaktischen Impulsen für jede Phase des Unterrichts. Dennoch ist, gegeben diese Limitationen, eine Erprobung mit einer größeren Stichprobe von Lehrkräften geboten, um die Ergebnisse abzusichern. Nicht zuletzt unterschied sich die Reihenfolge der eingeführten Energieformen zwischen den Gruppen. Neben der Integration von Feldern variierte somit ein weiterer Faktor zwischen den Gruppen. Die Beibehaltung einer typischen Reihenfolge in der Nicht-Felder-Gruppe lag darin begründet, dass diese Gruppe als Kontrollgruppe fungieren sollte. Der Unterrichtsgang sollte deswegen möglichst genau die Unterrichtspraxis abbilden. Außerdem lagen in der Studie keine qualitativen Daten vor. Allein aus den Antworten in den Tests ist nicht erkennbar gewesen,

wo die Lernschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler gelegen haben könnten. Es wäre interessant zu untersuchen, wie die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe die Konzepte Energie und Felder miteinander verknüpfen. Die zukünftige Forschung zur Integration des Feldkonzeptes in den Energieunterricht sollte auch qualitative Daten erheben. Eine weitere Begrenzung der Studie liegt darin, dass wir das Verständnis der Schülerinnen und Schüler über potentielle Energie nicht weiter untersuchen konnten. Der untersuchte Ansatz zielt vor allem auf ein tieferes Verstehen der potentiellen Energie ab, sodass diese Information wertvoll gewesen wäre, um die Befunde zu interpretieren. Die Subskala des Energietests, welche die Aufgaben zur potentiellen Energie umfasste, erwies sich allerdings als nicht reliabel. Es wären mithin mehr Informationen bzw. andere Informationen notwendig gewesen, um das Verständnis der potentiellen Energie auflösen zu können. Wie das gelingen kann, zeigen Kubsch et al. 2021. Folgestudien sollten diesen Aspekt aufgreifen. Schließlich beschränkte sich die Untersuchung in dieser Studie auf den Zeitraum einer ersten Unterrichtseinheit zur Energie. Langfristige Effekte der Integration des Feldkonzeptes konnten im Rahmen dieser Studie nicht abgesehen werden und müssten in zukünftigen Studien erforscht werden.

### **Fazit und Ausblick**

Die vorliegende Studie erforschte den Effekt einer Integration des Feldkonzeptes in den Energieunterricht. Untersucht wurde, ob sich diese Integration des Feldkonzeptes positiv auf das Lernen über Energie auswirkte und inwiefern sich das Verständnis des Feldkonzeptes moderierend auf den Effekt der Intervention auswirkte. Der Rückgriff auf das Feldkonzept bei der Einführung des Energiebegriffs ging zunächst zu Lasten des Energieverständnisses. Zugleich zeigte sich, dass diejenigen Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe, die ein Verständnis des Feldkonzeptes entwickelten, auch ein besseres Energieverständnis erreichen könnten. Die Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass, so lange die Schülerinnen und Schüler ein Verständnis für Felder entwickeln, ihnen dieses beim Erwerb des Verständnisses von Energie helfen kann.

Die Ergebnisse legen nahe, dass ein großer Teil der Schülerinnen und Schüler das Feldkonzept und den Nutzen des Feldkonzeptes für das Verständnis des Energiekonzeptes nicht ausreichend verstanden haben, damit das Feldkonzept ihnen dabei helfen könnte, Energie besser zu verstehen. Offen ist, mit Blick auf den im Gruppenvergleich geringeren Zuwachs im Energieverständnis der Felder-Gruppe, worin die Schwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler lagen. Erwartungskonform hatte eine Reihe von Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten mit dem Feldkonzept. Dennoch ergaben sich Hinweise darauf, dass Schülerinnen und Schüler der Unterstufe insgesamt sehr wohl in der Lage sind, ein Verständnis des Feldkonzeptes zu entwickeln. Die Unterrichtseinheit muss dahingehend verbessert werden, dass das Feldkonzept allen Schülerinnen und Schülern verständlich wird und der Zusammenhang zwischen Energie und Feldern deutlicher vermittelt wird. Offen ist ebenfalls, inwieweit der geringere Lernzuwachs der Felder-Gruppe längerfristig – aufgrund der

besonderen Konzeptualisierung der potentiellen Energie – kompensiert werden könnte. Neben einer Optimierung der Einheit im Hinblick auf eine bessere Förderung des Feldverständnisses und einer größeren Feldstudie zur Substantiierung der Ergebnisse wäre also auch die Untersuchung der längerfristigen Wirkung der Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie ein wichtiger nächster Schritt.

Arbeitsblatt 3.1 Datum: \_ \_ . \_ . 201\_

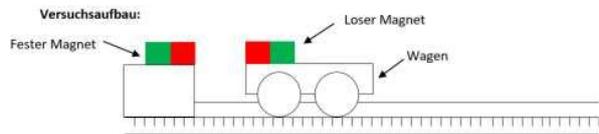
### Magnetische Energie

**Versuchsfrage:** \_\_\_\_\_

**Hypothesen:**  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Versuchsmaterial:**  
Fahrbahn, Rollwagen, 2 starke und 2 weniger starke Magnete, Maßband oder Lineal.

**Versuchsaufbau:**



**Durchführung:**

1. Stauche das Magnetfeld mithilfe des Wagens unterschiedlich stark.
2. Löse dann die Befestigung.
3. Miss die Distanz, die der Wagen zurücklegt.

**Aufgaben:**

1. Miss jeweils den Abstand der Magnete.
2. Führe den Versuch mit den schwächeren Magneten durch. Tausche dafür sowohl den losen als auch den festen Magneten durch die schwächeren aus.
3. Vervollständige die Messwertetabelle und beantworte die Versuchsfrage.

**Messwerte:**  
Magnetpaar 1: Stärkere Magnete (die kurzen)  
Magnetpaar 2: Schwächere Magnete (die längeren)

Magnetpaar	Abstand der Magnete	Zurückgelegte Distanz
1		
1		
1		
2		
2		
2		

**Auswertung:**  
Beantworte die Versuchsfrage.  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### Anhang 1.1 Arbeitsblatt zur magnetischen Energie

**1. Magnete sind von einem Magnetfeld umgeben. Die Erde hat auch ein Magnetfeld. Magnetfelder erkennt man zum Beispiel daran, dass ein anderer Magnet in dessen Nähe angezogen oder abgestoßen wird. Die Erde hat sogar ein Gravitationsfeld.**

**Woran, glaubst du kann man erkennen, dass das Gravitationsfeld der Erde auch ein Feld ist?**

- ... daran, dass sich die Erde einmal am Tag um ihre eigene Achse dreht.
- ... daran, dass die Erde Objekte anzieht, ohne sie zu berühren.
- ... daran, dass die Erde einen geographischen Nord- und Südpol hat.
- ... daran, dass die geografischen und magnetischen Pole der Erde nicht übereinstimmen.

#### Anhang 1.2 Beispielaufgabe aus dem Feldertest

## PUBLIKATION 2

### FIELDS IN MIDDLE SCHOOL ENERGY INSTRUCTION TO SUPPORT CONTINUED LEARNING OF ENERGY

#### Abstract

Science education research has repeatedly revealed students' problems with understanding the energy concept, in particular their understanding of potential energy. Newer research suggests that teaching students fields as a means to store potential energy may promote a more consistent understanding of the energy concept. Yet, it is presently unknown if the helpfulness of fields is limited to particular manifestations of potential energy or if the conceptualization of potential energy as energy stored in fields may constitute a coherent approach that supports students' continued learning on energy. To address this issue, we carried out a quasi-experimental pre-post-test study with  $N = 64$  students from grade 6, with students being assigned to one of two conditions (fields-based vs. non-fields-based approach to energy instruction). We also compared students continued learning in a subsequent unit on electric energy. Our findings suggest that students in the fields-approach not only outperformed students in the non-fields-approach. They were in particular able to use their understanding of potential energy to make better sense of electric energy, a form of energy previously unknown to them. The results of our study imply that fields can help students develop a deeper understanding of energy, in particular potential energy, and support continued learning about energy; that is, the learning about additional forms of energy.

Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K., & Nordine, J. (2023). Fields in middle school energy instruction to support continued learning of energy. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 010122.

## **Introduction**

An understanding of energy is important to address the most pressing issues societies are facing in the 21<sup>st</sup> century such as modern societies growing hunger for energy. Understanding the difficulties associated with storing energy generated by wind or solar power plants, for example, requires understanding the issues associated with the transport of (electrical) energy over longer distances (e.g. how electrical energy dissipates in its transport). Accordingly, policy documents such as the Framework for K-12 Education (NRC, 2012) and the PISA Framework (OECD, 2019) identify energy as a core idea in science.

Science education research has repeatedly found that students have difficulty understanding energy (Driver & Warrington, 1985; Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013; Park & Liu, 2016; Solomon, 1983), in particular potential energy. Students often refer to potential energy as a kind of label for a certain range of phenomena but fail to understand what potential energy really is (Hecht, 2003; Lindsey et al., 2012). Additionally, students often struggle with assigning potential energy to a location. Researchers have suggested that conceptualizing potential energy as stored in fields may help to address this issue (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). More specifically, fields are expected to provide potential energy with a location and thus can help students to productively use potential energy to explain phenomena.

Recent findings confirm that teaching students fields as a means to store potential energy in an introductory unit on energy may promote a better understanding of potential energy and the energy concept as a whole (Fiedler et al., 2022). Yet, it is presently not clear whether the inclusion of fields is limited to support learning about different manifestations of potential energy or if it sets the stage for students to develop a conceptual understanding of potential energy. Such conceptual understanding of potential energy should help students in their continued learning about energy. In this paper, we describe a study in which we explored whether incorporating fields into an introductory middle school energy unit supports continued learning about energy in a subsequent unit on electricity, which was enacted several months later. By comparing students learning in fields- and non-fields-based energy instruction, this study aims to empirically investigate the longer-term effects on students' learning when fields are included into energy learning.

## **Theoretical background**

### **Learning about energy**

There is broad consensus that students need to learn about five aspects in order to develop an understanding of energy: (1) energy manifests itself in different forms, (2) energy can be transformed from one form into another, (3) energy can be transferred from one place to another, (4) whenever energy is transformed or transferred a part of the energy is dissipated and no longer available for further use, and (5) that the total amount of energy is conserved

(for an overview see Chen et al., 2014). Several large-scale studies have investigated how students build an understanding of these five energy aspects over time. Namely, students seem to progress in their understanding by first mastering the idea that energy is manifest in different forms, then progress in their understanding that energy can be transformed and/or transferred; the ideas of energy dissipation and conservation come later, and many students fail to demonstrate a deep understanding of these ideas by the end of secondary school (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013). It is important to note that these studies provide information regarding students' ideas about energy in the course of "typical" energy instruction.

Energy is typically introduced using a forms-based approach. In this approach, energy is introduced as a quantity that manifests itself in different forms such as gravitational, kinetic, elastic, and electric energy. This approach has been taken up by many curriculum researchers (Fortus et al., 2012; Nordine et al., 2011; Papadouris & Constantinou, 2016) and is de facto standard in school physics instruction today (e.g. Alboteanu et al., 2016). Findings suggest that while forms-based approaches are successful in fostering an understanding of how energy manifests itself in different forms and how different forms of energy are transformed from one into another, students still commonly struggle to develop a conceptual understanding of the energy concept as a whole (Fortus et al., 2015; Nordine et al., 2011; Papadouris & Constantinou, 2016). Researchers have suggested that this is due to the forms-based approach emphasizing the use of forms as labels instead of fostering a deeper understanding of what energy forms truly are (e.g. Swackhamer, 2005) and that this may in fact be a hindrance for continued learning (i.e., students developing a complete understanding of energy through K12 as defined by the learning progression (e.g. (Neumann et al., 2013)) about energy (Kaper & Goedhart, 2002).

Energy can manifest itself in the real world in two fundamentally different forms: kinetic energy and potential energy. Kinetic energy is the energy of motion. It is stored in the motion of objects. Students readily accept this (e.g. (Watts, 1983)). Potential energy manifests itself in different forms such as gravitational, magnetic, elastic and electric potential energy. It is the energy of fields and the energy is stored in the field between objects that interact at a distance (Lopez, 2014). Potential energy, however, is difficult for students because they struggle with the idea that non-moving systems have energy (Lacy et al., 2014). For students, potential energy becomes apparent only when transformed into kinetic energy. Potential energy seems not to be real (Daane et al., 2015; Hecht, 2003), but potential energy is every bit as real as kinetic energy. Furthermore, students often (incorrectly) associate potential energy to a single physical entity instead of a system of interacting objects (Doménech et al., 2007; Lindsey et al., 2012). Traditional approaches are typically silent about the location in that potential energy is stored until it is transformed to kinetic energy leading students to the wrong idea that it is stored in a single object (Hecht, 2003; Kaper & Goedhart, 2002; Nordine et al., 2011; Quinn, 2014). Due to the lack of a location to that potential energy can be

assigned, students make up their own choice. As students assign kinetic energy to a single object, they often also wrongly say that a single object 'has' potential energy. This language is common practice by scientists and in students' text books and is accepted as an intermediate step towards a more technically adequate wording (Kaper & Goedhart, 2002). Yet this wording entails problems. Experts use this wording as a shortcut. When saying that an object 'has' potential energy they are inherently aware that this assignment always refers to a system, namely the system of interacting objects. The system is just not made explicit. With novice students, however, this is different. When students say that a single object 'has' potential energy, they often do not think about the system that underlies this assignment. But potential energy is fundamentally connected to systems since one always has to consider the relative position of an object in a force field or the configuration of that object in relation to other objects. Disregarding the system to which potential energy is related leads to students' misconceptions of potential energy.

As one of two fundamental forms of energy, the understanding of potential energy plays a crucial role in the understanding of the energy concept as a whole. In the course of instruction, potential gravitational energy is typically introduced after kinetic energy as the first manifestation of potential energy. If students do not understand this form of potential energy correctly, other difficulties in understanding can quickly arise at the beginning of the energy instruction. These difficulties may continue in the learning of other, new forms of potential energy leading to students exhibiting little progress in building a coherent understanding of the energy concept, i.e. well-connected ideas of the energy concept (diSessa & Wagner, 2005; Lee & Liu, 2010). The reason may be that students fail to conceptualize potential energy productively throughout energy instruction. However, this conceptualization is fundamental to build coherence and to successfully continue learning about potential energy. In typical energy instruction, students seem to only acquire isolated knowledge about one form of potential energy (Nordine et al., 2011) and to fail to recognize that potential energy is a concept on its own. When students do not recognize the underlying principles of the concept of potential energy, it may be that each new form of potential energy appears to be an entirely new form for them. Students may only label the new energy forms, but may not be able to identify the underlying ideas that connect all forms of potential energy and that could help them to understand other forms of potential energy better. Students' problems with conceptualizing potential energy appropriately may therefore cause problems in learning energy as a whole (Doménech et al., 2007; Lindsey et al., 2012) and hinder learning about energy over time (Kaper & Goedhart, 2002).

### **Promoting continued learning about energy with fields**

Introducing fields into energy instruction may help address the problems students have with potential energy and better support their continued learning about energy as a whole. Fields and potential energy are closely related: potential energy can be conceptualized as stored in

a field between at least two objects that interact at a distance. This perspective is consistent with the recommendation of the Framework for K-12 Science Education (NRC, 2012) that energy “can be modeled as either motions of particles or as stored in fields.” This language of energy stored in a field is commonly used in the research field (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005) and also Feynman used this wording in his lectures (Coopersmith, 2015). Introducing fields leads to a more complete and consistent view of potential energy. When introducing potential energy to students, connecting potential energy to fields may address students’ difficulties in assigning potential energy to a location. Assigning potential energy to the field between a system of interacting objects gives energy a home (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). With the help of fields students realize that potential energy is fundamentally connected to systems.

Nordine et al. (Nordine et al., 2018) developed an approach to middle school energy instruction where the fields and energy concepts are tightly connected. The so-called “systems-transfer approach” is focused on modeling energy transfer between systems. The authors introduced fields as a system. Energy can be transferred to the fields-system or energy can be transferred from the fields-system to another system. Investigation of the systems-transfer approach suggests that students can successfully relate energy and fields when explaining phenomena (Fortus et al., 2019; Kubsch et al., 2019; Kubsch, Opitz et al., 2021). Most of the researchers who advocate for the inclusion of fields into energy instruction at the same time advocate for a focus on energy transfer, while avoiding energy forms (see also Swackhamer, 2005). To explore whether the results reported by Fortus et al. (Fortus et al., 2019) also apply to a forms-based approach (the more common way of teaching energy) incorporating fields, we developed an approach to introductory energy instruction that introduces potential energy as stored in fields. The results show that students can learn fields in addition to energy during a forms-based energy unit. The students showed a significant gain in their understanding about energy as a result of forms-based instruction including fields ( $t(92) = 10,66, p < .001, d = 2.20$ ). The findings of this study suggest that the inclusion of fields could lead to a better understanding of energy (Fiedler et al., 2022), when students understand fields. Students in this study learned about potential energy through the examples of magnetic and gravitational energy. Using fields could help students learn about other forms of potential energy, such as electric energy. Once students have learned that gravitational energy is energy stored in the gravitational field between two objects with a mass, electrical energy may be effectively introduced as stored in the field between two charges (Lindsey, 2014). It is promising that the prior knowledge of potential energy may support learning about another, third manifestation of potential energy. Fields may provide a good explanation of particular forms of potential energy.

However, the impact of fields on students’ learning of energy might go far beyond a simple improvement of students’ knowledge of one or several manifestations of potential energy. The conceptualization of potential energy as stored in fields could promote a conceptual

understanding of potential energy and set the stage for continued learning about energy. The findings of Herrmann-Abell und DeBoer (2018), Neumann et al. (2013) and Liu und McKeough (2005) suggest that a conceptual understanding of how energy manifests itself in different forms is the foundation for developing an understanding of the other aspects of the energy concept (i.e. transformation and transfer, dissipation and degradation, as well as conservation). As one of two fundamental forms of energy, an understanding of potential energy is an essential part of fully understanding the energy concept and being able to use the energy concept to make sense of phenomena. Fields may play a key role in helping students to use potential energy not just as a label (Kaper & Goedhart, 2002), but to understand the underlying principles of potential energy, thus helping students to make connections between the various manifestations of potential energy. Fields represent a unifying underlying concept for all manifestations of potential energy as they provide conceptual simplicity and consistency. While potential energy manifests itself in various forms, the underlying principles are the same for every manifestation. For every manifestation of potential energy, students should learn that, in every phenomenon that involves potential energy, fields (1) mediate the interaction of objects at a distance, and (2) store potential energy with the amount stored depending on the distance between objects. Using the same set of underlying principles in learning about a range of potential energy manifestations may support students in developing a well-organized set of ideas about potential energy and thus a better understanding of potential energy (see Bransford et al., 2000). In this way, the conceptualization of potential energy as energy stored in fields may constitute a coherent approach that unifies the various manifestations of potential energy. Such a coherent approach provides learners with opportunities to use the same set of ideas in a variety of contexts, which sets the stage for continued domain-specific learning (e.g. Bransford & Schwartz, 1999; Fortus et al., 2015). DiSessa and Wagner (2005) argued that continued learning within a domain is enhanced when learners' knowledge is well-connected around a small set of central ideas. In an empirical investigation, Nordine et al. (2011) found that better-connected ideas about the energy concept promoted students' ability to make sense of other energy-related phenomena and to continue learning about energy over time. The conceptual consistency by conceptualizing potential energy as energy stored in fields may facilitate students' continued learning about new, yet unknown manifestations of potential energy. Accordingly, conceptualizing potential energy as stored in fields represents a promising approach to promote continued learning about energy – supporting evidence, however, has until now been largely lacking.

### **Research question**

The inclusion of fields can lead to a better knowledge of gravitational and magnetic potential energy when students understand fields (Fiedler et al., 2022), i.e., introducing fields can promote students' knowledge of potential energy in two of its manifestations. Building on this work, we hypothesize that fields may contribute to students' developing of a coherent

understanding about energy (e.g. Swackhamer, 2005) and thus support continued learning about energy (Nordine et al., 2011). To investigate to what extent this is the case, we ask the following research question:

*To what extent does the inclusion of the fields concept in a forms-based energy instruction support continued learning about energy in the context of electrical potential energy?*

## **Methods**

### **Research design and sample**

In order to answer our research question, we employed a repeated quasi-experimental pre-post design (see Fig. 2.1). After being introduced to energy in one of two conditions during an introductory unit on energy, students' continued learning about energy was investigated as a function of a subsequent unit on energy. During an introductory unit, students were taught in two conditions: one group learned about magnetic and gravitational potential energy with fields (the fields group), the other group learned about these two forms without fields (the non-fields group). Quantitative data on students learning have been collected by a respective test before (T1) and after the introductory unit (T2). In the subsequent unit, students' continued learning was assessed by their understanding about electric energy as another manifestation of potential energy. The introductory unit consisted of ten lessons of instruction across five weeks. After the introductory unit on energy, students received instruction on optics, which did not include any energy ideas. The subsequent unit on electric energy started four months after the introductory unit and constituted the next explicit learning opportunity about energy. Again, students were taught about energy in the two conditions, both following a forms-based approach. The fields group was taught using a forms-based approach that included fields, the non-fields group was taught using a forms-based approach without fields. Quantitative data have been collected by a test before the beginning (T3) and directly after the conclusion of the subsequent unit (T4).

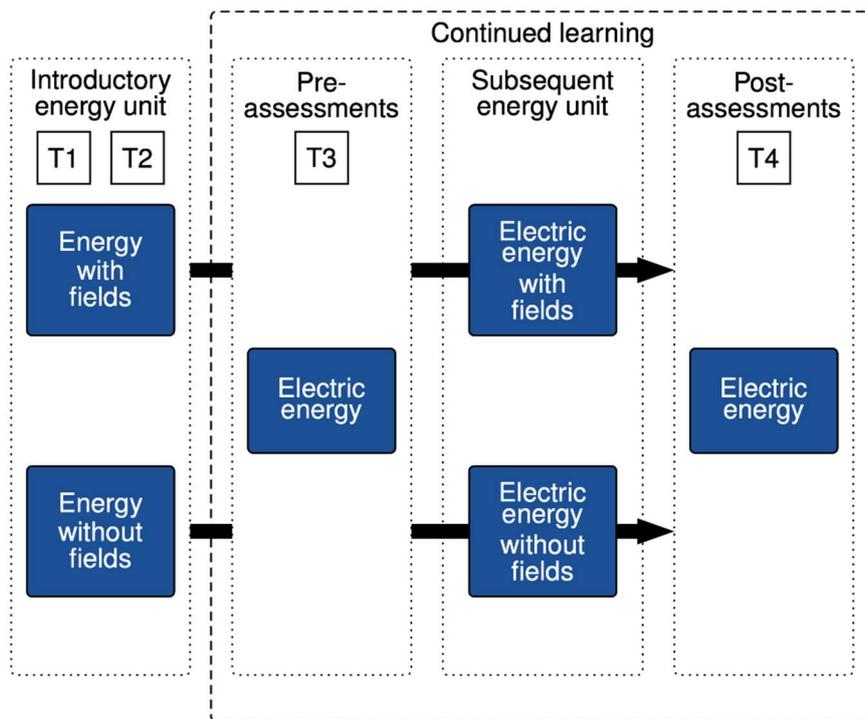


FIG. 2.1. Study design as a quasi-experimental pretest-posttest design with two intervention groups (fields and non-fields) and assessments before and after the interventions.

The study took place during April and May 2019 with  $N = 64$  students from a school in Northern Germany. The students were all in grade 6, and hence in their first year of learning physics. Students distributed to two fields groups ( $N_f = 46$ ) and one non-fields group ( $N_{nf} = 18$ ). Each fields group was taught by a different teacher. One of these teachers also taught the non-fields group. This design - that is, working with students from one school and having one teacher teach one of the fields groups and the non-fields groups, and one teacher teach another fields group - helped us control the influence of school level variables across intervention groups; and examine the effect of teacher level variables between fields groups, while controlling for these variables between (one of the) fields and non-fields groups; effectively mimicking a laboratory study design that allowed us to evaluate the actual potential of the fields approach for students learning before taking it to regular instruction. The school in which our study took place was a public school in Kiel, the capital city of Schleswig-Holstein, Germany's most northern state. Students attending the school come from various parts of the city and represent different social classes. Since we sampled all students from 6<sup>th</sup> grade, no specific selection bias was introduced. However, the school was a Gymnasium that is of the more academic of two school tracks in Schleswig-Holstein. Again, this helped us understand the principle potential of the fields approach for students' learning about energy. We acknowledge that we cannot make any claims about the extent to which our findings generalize to any students' learning about energy. We have, however, no reason to believe the school is not representative for a typical Gymnasium-level school in Germany.

In order to ensure comparability of the groups, we assessed students' cognitive abilities and prior knowledge about electric energy before instruction (i.e. at pretest time, T1). Students' cognitive abilities were assessed using the nonverbal cognitive abilities test by Heller and Perleth (2000). This test indicated no significant differences between groups,  $t(62) = -0.3$ ,  $p = .77$ ,  $d = 0.08$ . Students' prior knowledge about electric energy was assessed using the same test utilized to assess their learning about energy (see the 'Instruments' section for a detailed description). The comparison did not exhibit any significant group differences  $t(62) = -0.2$ ,  $p = .82$ ,  $d = 0.06$ . Note: Effects sizes, despite being negligible are provided in terms of Cohen's  $d$  (Cohen, 2013).

### The instructional units

The instructional units in this study built on the respective conceptualizations of energy students were introduced to in the introductory energy units. The introductory units introduced the energy forms of magnetic energy, gravitational energy, kinetic energy, elastic energy and the unit of the fields group included the magnetic field and the gravitational field into the energy forms of magnetic energy and gravitational energy. Energy transformation was also part of both units.

The subsequent units used in this study introduced electric, light, and thermal energy without investigating the latter two in-depth. Both units contained the same phenomena and energy forms and required the same time of instruction. Students received three lessons within two weeks. The distribution of topics among lessons, by group, can be seen in Table II.I. Both units were based on the same design principles to support knowledge-in-use. The units followed a guided inquiry. Students investigated phenomena by focusing on energy transformations between one energy form and another. They developed explanations of phenomena in a semi-quantitative way, by tracking energy increase and decrease in one form which was always connected to a decrease or increase in another form.

TABLE II.I. Overview of lesson contents during the units for both groups.

lesson	subject focus	
	fields group	non-fields group
1	Students explored the electric field as a store for electric energy and compared it to the gravitational and the magnetic field.	Students investigated phenomena that contained electric energy.
2 + 3	Students investigated the transformation of electric energy to light and thermal energy in a circuit. Students used a model representing a conveyor belt in order to explore electric energy transport.	

During the units, students generated an explanation of the phenomenon of a light bulb in a circuit by a transformation of electric energy, provided by the power supply, into light and thermal energy. Both groups used the model of a conveyor belt (see Fig. 2.2) in order to explain why a light bulb in a circuit glows. A conveyor belt transports plastic balls on a higher level. Through a connecting element, the plastic balls reach a ramp that is studded with nails at regular intervals. The plastic balls roll down the ramp and collide with the nails. Through a connecting element, they return to the conveyor belt. Students compared the processes in an electric circuit and electric energy to the processes of the conveyor belt and gravitational energy. The belt itself represented the power supply, the plastic balls the electrons, the ramp represented the light bulb, and the nails the atoms in the light bulb.

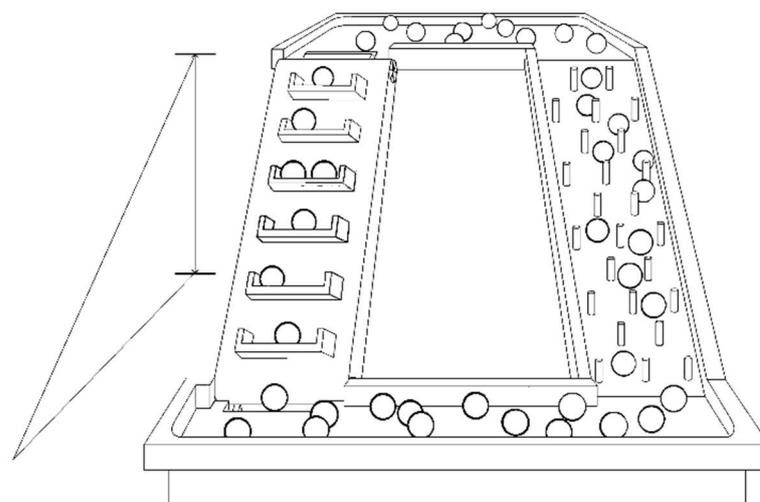


FIG. 2.2. Model of a conveyor belt used to establish an analogy between the transformation of gravitational energy in the conveyor belt circuit and the transformation of electric energy in an electric circuit.

The non-fields group was expected to develop the following explanation: Electrons are on a higher level of electric energy when leaving the power supply. While passing through the light bulb they are speeding up and this kinetic energy is transformed to thermal and light energy when they hit the atoms. Students in the fields group were expected to use the conveyor belt model and the model of the electric circuit in Fig. 2.3 to explain a glowing light bulb as such: in the power supply, electric energy is stored in the electric field as charges are in a high-energy configuration. In the light bulb, the electric energy of the electric field is transformed to kinetic energy of moving electrons that is transformed to light and thermal energy when the electrons hit the atoms. By using the electric field in their explanation of why a light bulb in a circuit glows, students in the fields group can use the same fields framework to conceptualize gravitational energy (in the analogy of the conveyor belt) and electric energy (in circuits). Fields serve as a conceptual bridge between the two manifestations of potential energy. In contrast, the explanation of students in the non-fields group is limited to the

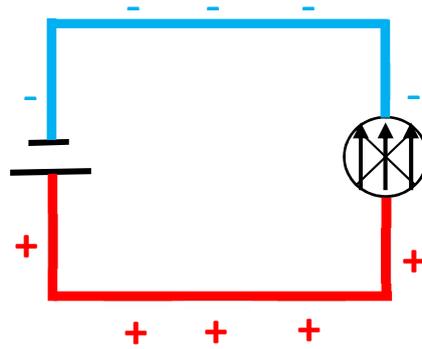


FIG. 2.3. Model of the electric circuit used in the fields groups to visualize the electric field in an electric circuit.

analogy to gravitational energy. They do not have the conceptual bridge between the two manifestations of potential energy.

Using the conveyor belt model in our approach comes with a cost. In the model electrons are speeding up and slowing down in the light bulb, while in a circuit the speed of the electrons and with it the current remains nearly the same. We recognize that there may be a risk to misrepresent current. This technically incorrect intermediate step is accepted in favor of avoiding the frequently developed misconception that energy is transported from the electrons through the wires to the bulb. Instead, we initiate the idea that the energy is transported from the battery to the lamp by a field. In higher grades, this idea can be taken up to teach students the transport of energy via electromagnetic fields. By using the conveyor belt model, we made a pedagogical choice. We would like to invite teachers to take up current in the following lessons in order to avoid misconceptions.

To construct the explanation of a glowing light bulb, students in the fields group should build on their knowledge from the introductory unit. There are especially two aspects from the introductory unit that are important to understand potential energy: (1) Fields mediate the interaction of objects at a distance, and (2) fields store potential energy with the amount stored depending on the configuration of objects. Students could use their knowledge to understand the new energy form: potential electric energy. In the case of electric energy, the electric field mediates between charges at a distance, it stores electric energy, and the amount of electric energy stored in the electric field depends on the configuration of the charges. To focus on and remind students of these underlying principles of the potential energy concept, the unit started with the electric phenomenon of a small stick containing a Van de Graaff generator that repelled figures made of aluminum. Students were asked to construct an explanation of the phenomenon. As they knew already that fields mediate action at a distance, they should be able to reactivate their knowledge by guessing that there must be a field between the generator and the figure. Students readily accept that this field is not the

magnetic field since no permanent magnets were involved.<sup>6</sup> It could not be the gravitational field either, because the figure was repelled by the stick and not attracted by the earth. That is how the electric field was introduced and with it electric energy. We tended to strengthen the analogies between the new form of potential energy, electric energy, and the already-known forms of magnetic and gravitational potential energy. To do so, students investigated the representations of the fields of all three forms and identified the two aspects of the fields concept that are important to understand potential energy for electric energy. With these activities, students were supported to use the same powerful ideas (fields as a store for potential energy with the amount depending on the configuration) across a range of contexts.

### **Instruments**

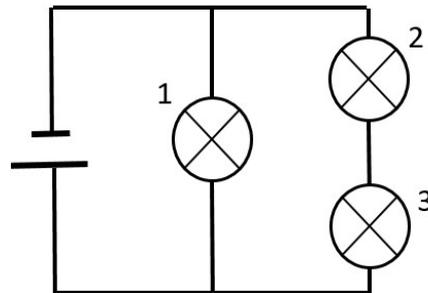
To assess students' understanding about energy and in particular electric energy during the subsequent units, we developed a written electric energy test. To be able to compare students' understanding of energy before and after the subsequent units, the test before and after the subsequent units were identical. To ensure sufficient psychometric quality of the test, we extensively drew on existing test instruments (Michel & Neumann, 2016; Nordine, University of Michigan/2007; Swackhamer & Hestenes, 2005). We selected tasks from these tests that focused on electric energy phenomena and adapted them to fit the content of the subsequent units where necessary. We also newly developed several tasks as needed. In developing the test, we have paid particular attention not to advantage either the fields or non-fields group. Students were not required to use fields to solve the tasks and the phenomena and models used in the test were equally part of the instruction in both groups. Overall our instrument contained seven multiple-choice and four open-ended tasks. The multiple-choice items of the test offered four answer options, one of which is correct. For choosing the correct answer option, the task was coded with one, otherwise with zero. The open-ended tasks were scored using partial credits based on a coding manual developed for the test. We carefully designed scoring rubrics so that they did not favor either instructional approach. Rubrics were designed in a way that a higher level of sophistication and connection of energy ideas led to a higher score. Responses were awarded one point for presenting facts like identifying energy forms. Two-point responses connected two or more ideas of the energy concept, for example, linking the decrease in one energy form to a decrease in another energy form. Three-points responses provided a complete explanation by both connecting two or more energy ideas and applying them correctly to the present phenomenon. Even though students in the fields group were able to show a more sophisticated understanding by explaining in more depth the processes occurring in the electric circuit by using fields, they did not gain more points than a student in the non-fields group who also gave a correct

---

<sup>6</sup> This logic is not technically correct since there is no permanent magnet needed to have a magnetic field. Still, it is acceptable at this grade level to allow students to eliminate the magnetic field based upon this criterion.

explanation. The test did therefore not favor students in the fields group. The test was coded independently by two raters at the pretest and posttest time points. Interrater reliability for the open-ended tasks was good, with a Cohen's kappa of  $\kappa \geq 0.98$ . An example item from the electric energy test is given in Fig. 2.4.

In the figure you can see a lamp (1) connected in parallel with a series connection of two lamps (2 and 3).



- a. What can you say about the brightness of the lamps?
  - Lamp 1 shines brighter than lamp 2 and 3, which are equally bright.
  - Lamp 1 shines the brightest, then lamp 2, then lamp 3.
  - All lamps shine equally bright.
  - Lamp 1 lights up, lamp two and three remain dark.
  
- b. Justify your answer using energy. (Hint: Consider the distance in the conveyor belt model).

FIG. 2.4. Example of an item in the electric energy test.

The reliability with which energy understanding was measured was assessed using Cronbach's alpha. The internal consistency of the electric energy test at pretest time (T3) was low with Cronbach's  $\alpha = 0.42$  and at posttest time (T4) acceptable with  $\alpha = 0.64$ . Because of the low reliability of the pretest, we did not consider it as a covariate in our analyses (see below). Reliabilities at posttest time were sufficient for group comparisons (Lienert & Raatz, 1994), p. 14.

### Data Analysis

To investigate the extent to which the inclusion of the fields concept supports continued learning about energy in the context of electric potential energy, we compared the fields and the non-fields group in terms of their understanding of electric energy. Students' understanding of electric energy was measured before (T3) and after the subsequent units (T4) using the electric energy tests. For an initial overview of students' understanding in both groups, we wanted to obtain an overview of group differences in students' understanding of electric energy over time. For this purpose, a paired t-test was calculated for each group with students' scores on the electric energy test at pretest time (T3) and posttest time (T4). We

furthermore compared students' understanding of electric energy at posttest time by calculating a Welch's two sample t-test (a generalized and even more robust version of the t-test, see e.g. Kubsch, Stamer et al., 2021) with students' scores on the electric energy test at posttest time. We then analyzed the group differences in greater depth.

Differences in students' performances in the electric energy test at posttest time (T4) may be influenced by two factors other than the group influence. Firstly, students may have a different understanding of the energy concept based upon whether fields were included in the introductory unit. Students in the fields group should conceptualize potential energy as energy stored in fields while students in the non-fields group learned potential energy in a traditional way without fields. These differences in the conceptualization of potential energy may affect students' continued learning about potential energy forms and therefore also about electric energy. We controlled for students' prior knowledge on energy using the data of students' energy understanding at posttest time (T2) of the introductory unit as a covariate. The energy posttest had a good reliability with Cronbach's  $\alpha = 0.74$ . Secondly, students' performance in the electric energy test at posttest time (T4) may also depend on their cognitive abilities. Students' cognitive abilities were measured at the pretest time (T1) of the introductory unit. Students' cognitive abilities were assessed using the N1 nonverbal subscale of the cognitive ability test (KFT) (Heller & Perleth, 2000). The reliability of the subscale used was good with a Cronbach's  $\alpha$  of 0.90. To control for the influence of these two factors, prior knowledge about energy (T2), and cognitive abilities, we conducted an ANCOVA, using the electric energy scores at posttest time (T4) as the dependent variable and the group factor, prior knowledge about energy (T2), and cognitive abilities as the independent variables. The statistical methods that we used in our study are considered robust against small sample sizes (Winter, 2013). Further, the diagnostics of the ANCOVA showed no reasons for concern, e.g., residuals of the ANCOVA were normally distributed.

## Results

A descriptive overview of students' scores on the electric energy test before the unit (i.e. at pre time, T3) and after the subsequent units (i.e. at post time, T4) is provided in Table II.II. Students' score in the energy test after the introductory unit (i.e. at post time, T2) is shown in percent because the number of tasks differed between pre time (T1) and post time (T2). All other measures are given in absolute points. For those measures (separated by a slash), the maximum achievable score is also given. Students' cognitive abilities test scores were assessed before the introductory unit (i.e. at pre time, T1). The correlations between students' total scores in all measures are provided in Table II.III. Students' scores in the electric energy test after the subsequent units (T4) correlate with their scores in the cognitive abilities test and students' scores in the energy test after the introductory unit (T2). Students differed in neither

their cognitive abilities (T1) nor their prior understanding of electric energy before the subsequent units (T3).

TABLE II.II. Results of both groups in the tests on electric energy, energy from the introductory unit, and cognitive abilities.

Results	Time	fields group (N=46)		non-fields group (N=18)	
		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Cognitive abilities test score	T1	17.02/25	6.19	16.50/25	6.72
Energy score (post, introductory unit) in %	T2	48.56	16.84	53.19	16.41
Electric energy score (pre)	T3	5.88/18	2.28	5.75/18	1.54
Electric energy score (post)	T4	7.96/18	2.89	6.83/18	2.38
Gain in electric energy score		2.08	3.27	1.08	1.75

TABLE II.III. Correlations between all measures.

	Electric energy score (pre, T3)	Electric energy score (post, T4)	Energy score (post, T2)
Electric energy score (post, T4)	0.40, $p = .001$		
Energy score (post, T2)	0.22, $p = .076$	0.55, $p < .001$	
Cognitive abilities test score (T1)	0.37, $p = .002$	0.25, $p = .037$	0.38, $p = .002$

For each group, we examined students' progress in understanding electric energy as a result of the subsequent units. To do so, we compared their electric energy scores in the pre- and posttest. The results indicate that students in both groups progressed substantially in their understanding of electric energy. Students' scores in the fields group on the electric energy test increased significantly from pre to post time with a large effect size ( $t(45) = 4.30, p < .001, d = 0.80$ ). In the non-fields group students' scores also increased significantly from pre to post, this time with a medium effect size ( $t(17) = 2.63, p = .018, d = 0.54$ ). Comparison of students' scores on the posttest, reveals slightly higher scores on the electric energy test after the subsequent units (T4) for students in the fields group (see Fig. 2.5); a difference that is not statistically significant ( $t(37.49) = -1.59, p = .119, d = 0.41$ ). However, in our study, we were not exclusively interested in students' learning about electric energy, but more specifically their continued learning about energy in the context of - fields- or non-fields-based - instruction on electric energy.

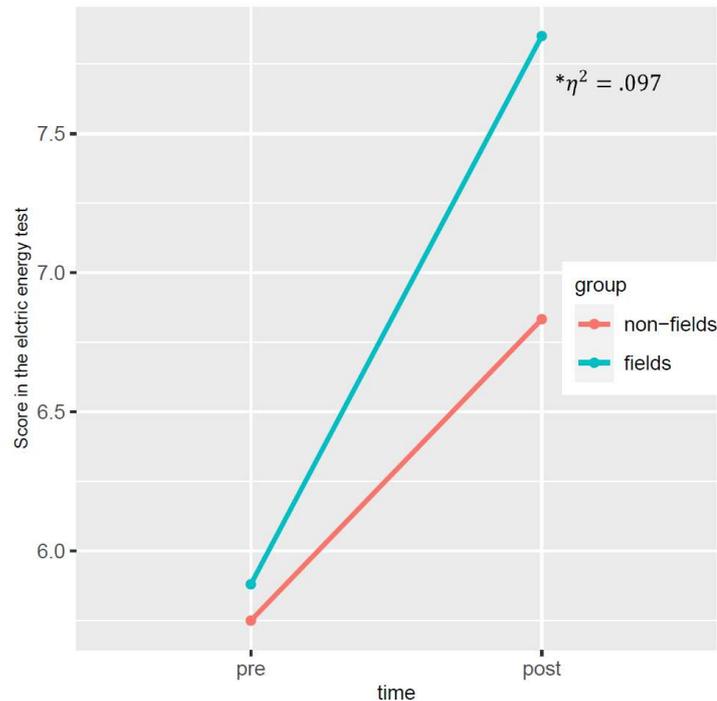


FIG. 2.5. Students mean scores on the electric energy test before (pre, T3) and after (post, T4) the subsequent unit for both groups.

In order to investigate students' continued learning about energy as a function of fields- and non-fields-based energy teaching, we conducted an ANCOVA. In this ANCOVA we examined students understanding of energy measured by the electrical energy test at posttest time (T4). We included the type of intervention group (i.e. fields vs. non-fields), adjusting for relevant covariates including students' prior understanding of energy measured by the energy test immediately post the introductory unit (T2). We further included students' cognitive ability as a covariate (see Table II.IV for an overview of the variables included in the ANCOVA). The results of the ANCOVA suggest that when controlling for cognitive ability scores (T1) and energy test scores post the introductory unit (T2) ( $F(1,60) = 6.4, p = .014, \text{partial } \eta^2 = .097$ ), students in the fields-group outperform students in the non-fields group; that is, students learning about energy in fields-based instruction showed better continued learning.

TABLE II.IV. Results of the ANCOVA with students' understanding of electric energy after the subsequent units (T4) as dependent variable.

Independent variable	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	Partial $\eta^2$
Cognitive abilities test score (T1)	3.03	1	3.027	4.701	.034	.001
Energy score (post, T2)	17.19	1	17.192	26.696	<.001	.334
Group (0 = non-fields group, 1 = fields group)	4.14	1	4.145	6.437	.014	.097

## Discussion

Our findings suggest that the inclusion of the fields concept in a forms-based energy instruction successfully supports continued learning about energy in the context of electric potential energy. After being introduced to energy in a first unit (with or without fields), students significantly improved in their understanding of electric energy in a subsequent unit (with or without fields). Moreover, accounting for prior knowledge and cognitive abilities students in the fields group demonstrated a better understanding than their counterparts in the non-fields group.

The inclusion of fields into energy instruction has long been recommended by scholars (NRC, 2012; Nordine et al., 2018; Quinn, 2014; Swackhamer, 2005) in order to give potential energy a location when not manifested in motion (Quinn, 2014). When potential energy is located in fields, students are less likely to perceive it as hidden or not real (Daane et al., 2015; Hecht, 2003). Before the students in the fields group learned about electric potential energy, they learned about other potential energy forms in an introductory energy unit. In this introductory unit, the potential energy forms of magnetic and gravitational energy were introduced as being stored in fields, with the amount of energy being stored depending on the configuration of two objects. After being introduced to energy students from the fields group did not exhibit a better understanding of energy. In fact, the fields group scored slightly worse on the energy test post the introductory unit compared to the non-fields group (see Fiedler et al., 2022). We argued that this is due to the fact that students were exposed to two complex constructs (energy and fields) at the same time, which could have been overwhelming for some students. However, when it comes to students' continued learning the fields group outperformed the non-fields group in terms of their energy understanding. We interpret this as a positive long-term effect of the fields approach. Fields no longer seemed to create an additional load but, on the contrary, seemed to help students learn about energy in a different area of physics, electricity.

Bransford, Brown and Cocking (2000) argue that the foundation of competence in a domain is well-connected knowledge organized around central concepts of that domain. Including fields into the concept of potential energy could promote conceptual understanding because the underlying principles of the concept are the same: For every manifestation of potential energy, fields mediate interaction at a distance and store different amounts of energy based upon the configuration of objects that interact via fields. Fields could therefore help students to better understand and connect the underlying principles of the potential energy concept that promotes a more coherent understanding of energy. DiSessa and Wagner (2005) argue that well-connected (coherent) ideas of a concept promote students' ability to apply their prior understanding to understand other contexts. Presenting the same set of ideas of a concept in a variety of contexts promotes students' likeliness to apply their prior understanding to other contexts (Bransford & Schwartz, 1999). In the subsequent energy unit

on electric energy in the present study students in the fields group learned about electric energy as the third manifestation of potential energy. Once again, electric energy has been introduced as stored in a field, i.e. the electric field, with the amount of energy stored depending on the configuration of charges. With electric energy, students got another learning opportunity to learn about potential energy and fields that helped them to understand the underlying principles of the concept of potential energy. Students could use fields as a unifying underlying concept for all manifestations of potential energy that sets the stage for continued learning about energy.

Our findings support our hypothesis that students in the fields group would more successfully build a more coherent understanding of potential energy. Students seemed to be able to use their prior understanding on potential energy and fields to understand another manifestation of potential energy. Therefore, learning about the electric field seemed to support learning about electric energy. We argue that students were able to make the connection between potential energy and fields after having experienced them in several of its manifestations. Using the same set of powerful ideas in several manifestations of potential energy seemed to promote students' continued learning.

There is much discussion in the literature about whether the inclusion of fields in energy instruction can help students better understand energy (Fortus et al., 2019; Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). By testing this idea in class with students, we wanted to contribute to this discussion, which has so far been rather theoretical. Our findings provide a small-scale demonstration that fields can promote continued learning about energy and that it has merit to further investigate the role of fields in energy instruction. In our future research we aim to substantiate the findings of this study with a greater sample. A greater number of students and teachers is needed to minimize effects that are due to factors such as the teachers' teaching style or the socio-economic status of the students. The results in the present study should therefore be interpreted as first evidence of potential benefits of the inclusion of fields into introductory energy instruction. While the study occurred in a specific context and involved a relatively small sample size, our findings nonetheless point to a clear benefit of connecting fields to potential forms of energy as a part of students' first encounter with energy ideas. Contrary to the assumption that including fields in introductory energy instruction may unnecessarily complicate students' learning about an already abstract concept (energy), we found that students who began to conceptualize potential forms of energy in terms of fields developed better-connected ideas that seemed to set the stage for continued learning.

### **Acknowledgments**

Funded by the German Research Foundation (DFG) – Project number: 458465679.

## **PUBLIKATION 3**

### **SUPPORTING LEARNING ABOUT ENERGY WITH FIELDS EVIDENCE FROM A MIXED-METHODS STUDY**

#### **Abstract**

Energy is an important concept in physics, but science education research has repeatedly shown that students struggle to develop a full understanding of energy. Potential energy is especially challenging for students. Students are overwhelmed by the great number of potential energy forms, not being able to make connections between them. Thus, they fail to develop a conceptual understanding of potential energy, resulting in difficulties in learning about energy in general and their continued learning about energy. To address this issue, scholars have proposed to include fields into energy instruction. Through fields, the various forms of potential energy can be connected and synthesized into two simple underlying principles. A number of studies have provided evidence that including fields in energy instruction is feasible and suggests that including fields supports learning. However, evidence for students actually connecting energy and fields as suggested in the literature is still lacking because the implemented quantitative methods are not suitable to reveal the evidence needed. In response to this research gap, we developed a unit on energy with fields and a comparable unit without fields and compared students' learning on energy in these two units. In a mixed-methods approach, we examined students learning on energy during an introductory and a continued learning unit on energy with  $N = 67$  students from grade 7. Our findings suggest that students who learned about energy with fields outperformed students that learned about energy without fields. Furthermore, fields seem to provide students with well-connected knowledge networks that reflect conceptual understanding of energy. Our findings imply that inclusion of fields into energy instruction could help students to better understand energy and to better continue learning about energy.

Keywords: energy, fields, conceptual understanding, knowledge networks

Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K., & Nordine, J. (2023). Supporting Learning About Energy With Fields – Evidence From a Mixed-Methods Study. Manuskript eingereicht zur Publikation.

## Introduction

Many global challenges that affect students' current and future lives (e.g., global warming) involve societal decisions about how energy resources are accessed and utilized. An understanding of energy is one important part of comprehending these global challenges and being active participants in designing and/or implementing solutions. Furthermore, an understanding of energy is a crucial tool to navigate the discourses around societal transformations such as the transition from fossil to renewable energy sources, e.g., to evaluate the sustainability of different energy sources one needs to model the involved flows of energy. This importance of an energy understanding is reflected in educational policy documents like the Framework for K-12 education (NRC, 2012) or the PISA framework (OECD, 2019) that classify energy as a core concept in science.

Science education research suggests that only few students develop a full understanding of the energy concept (Driver & Warrington, 1985; Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013; Park & Liu, 2016; Solomon, 1983). Potential energy is particularly difficult for students, e.g., they often ignore to identify the relevant components of the system under consideration (Lindsey et al., 2012). Students rarely make connections between the different manifestations of potential energy such as gravitational potential energy or electric potential energy, i.e., students are struggling to develop a conceptual understanding of potential energy. In the literature, it has been suggested that incorporating fields into energy instruction may address the difficulties with potential energy because they support system thinking and a conceptual understanding of potential energy (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005).

Recent empirical investigations have shown that approaches that connect energy and fields are comprehensible for middle school students and may even deepen their learning (Becker & Hopf, 2021; Fiedler et al., 2022, 2023; Fortus et al., 2019; OpenSciEd, 2022, 2023). However, these studies lack clear evidence that students truly connect ideas about fields and ideas about energy and that this connection leads to students' better understanding of energy. In this paper, we address this gap as we describe a study in which we examined the inclusion of fields on students' understanding of energy by comparing students learning in a fields and a non-fields condition and analyzed the role of fields in students thinking when explaining phenomena. The aim of this study is to present evidence that connecting the concepts of fields and energy provides students with well-connected knowledge networks to successfully use the energy concept to explain phenomena and supports continued learning about energy.

## Theoretical background

### Understanding potential energy

Students' understanding of energy can be described relative to five key ideas about energy that are needed to make sense of phenomena: (1) energy manifests itself in different forms, (2) one form of energy can be transformed to another form of energy and vice versa, (3) energy can be transferred from one place to another, (4) whenever energy is transformed or transferred, a part is degraded, and (5) the total amount of energy in a system is conserved (for an overview see Chen et al., 2014). The common way to teach energy to students is the so-called forms-based approach (Fortus et al., 2012; Nordine et al., 2011; Papadouris & Constantinou, 2016). This approach is driven by the idea that energy is manifest in different forms such as kinetic, gravitational, magnetic, electric and thermal energy. Research about students learning in forms-based energy instruction has repeatedly demonstrated students' difficulties in understanding energy (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013). This may be because students are overwhelmed by the great number of forms. But in fact, there are only two fundamentally different forms of energy: kinetic and potential energy. Kinetic energy is the energy of motion. Students easily recognize kinetic energy in phenomena because it is always associated with motion (Watts, 1983). Potential energy is the energy of a system made of a field and objects that interact at a distance via the field (NRC, 2012). Potential energy, however, is difficult for students to recognize as it is not as easily observable as kinetic energy.

Students often struggle to localize potential energy correctly, which entails two difficulties: First, for students, potential energy seems to exist only when transformed to kinetic energy (Lacy et al., 2014). Further, it seems to disappear when objects stop moving (Chabalengula et al., 2012). For example, when a ball is thrown up vertically and comes to a rest before speeding up in the opposite direction, students often incorrectly say that the energy is gone at this point. A form of energy that pops up at some point and disappears at another seems not to be real for students (Hecht, 2003). Second, students often fail to think of potential energy as a part of a system (Cooper & Klymkowsky, 2013; Lindsey et al., 2012). They often incorrectly conceptualize potential energy as being stored in a single object (Doménech et al., 2007; Hirça et al., 2008) which becomes apparent when they, for example say that an object 'has' potential energy. While this way to talk about potential energy is a common shortcut that is also used in students' textbooks, it nevertheless leads to the false assumption that a single object – instead of a system of at least two objects – has potential energy. Reasoning about phenomena that involve potential energy is inseparably connected to systems thinking (Heron et al., 2009). The amount of potential energy depends on the configuration of the objects that make up the system. In the example of a suitcase that I store on a cupboard in my flat on the fourth floor, one must take into account the configuration of that suitcase in relation to the reference point to correctly account for the amount of potential energy. The amount of

potential energy is greater when the suitcase is considered to be held above the ground instead of the cupboard. When experts use this shortcut that the suitcase ‘has’ potential energy they always have in mind that they must consider the distance to the second partner or the reference point in order to account for the amount of potential energy. They are inherently aware that potential energy is always part of a system. Students, however, fail to quantify potential energy correctly when they do not identify the right reference point (Kurnaz & Sağlam Arslan, 2011).

As one of two fundamental forms of energy, potential energy is crucial to understand the energy concept as a whole (Doménech et al., 2007; Lindsey et al., 2012), because every phenomenon involves the transformation from potential energy to kinetic energy or vice versa. Potential energy is foundational to the definition of the energy concept, as energy could not be conserved without potential energy. Potential energy is manifest in different forms such as gravitational, electric, chemical, and magnetic energy. They are all grouped together under the concept of potential energy because they rely on the same underlying principles. There are several unifying aspects to potential energy, for example that potential energy is a part of a system, depends on the configuration of objects and involves interaction at a distance. In traditional forms-based approaches students typically learn the manifestations one after another without making connections between them (e.g., Burzin et al., 2021) or only making connections between them late in the unit and related to forces (e.g., Fortus et al., 2012). They often do not realize that they are all instances of potential energy. Teachers typically avoid covering the unifying aspects of potential energy because they are often considered as too complex for students. Without understanding the underlying principle of potential energy, students are confronted with a great number of manifestations that seem to be isolated from another. Consequently, students are not developing a conceptual understanding of potential energy. But an understanding of potential energy is important to analyze energy processes in systems. Understanding and addressing global challenges requires analyzing energy flows in and out of systems, e.g., understanding climate change requires balancing energy flows in and out of our atmosphere. Therefore, an understanding of potential energy and energy as a whole would enable students to understand and collaborate on solutions to global challenges.

### **Promoting understanding of (potential) energy with fields**

#### *Physical perspective: Localization and system thinking*

Potential energy and fields are inextricably linked - every type of potential energy is connected to a force between objects that interact at a distance via a field. Potential energy can be conceptualized as stored in a field between objects that interact at a distance. This conceptualization is in line with the recommendation in the *Framework for K-12 Science Education* that energy “can be modeled as either motions of particles or as stored in force fields (electric, magnetic, gravitational) that mediate interactions between particles” (NRC,

2012). This wording of energy stored in a field is commonly used in research (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005), and has been used by Richard Feynman in his lectures as well (Coopersmith, 2015).

The inclusion of fields into energy instruction can help address the two difficulties that students have with potential energy. First, fields can help students localize potential energy correctly. It is no longer disembodied but stored in a field (Kubsch, Opitz et al., 2021; Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). Assigning potential energy to a field helps students realize that potential energy does not disappear when objects stop moving. With fields, potential energy does not disappear at the highest point of a vertically thrown ball but is stored in the gravitational field. Fields can help students identify potential energy in phenomena. In the approach of Nordine et al. (2011) students identify energy forms in a phenomenon by an observable variable, called indicator (for example speed as an indicator for kinetic energy). Fields could become a sort of indicator for potential energy as fields mediate interaction at a distance. Interaction at a distance is easily observable for students for example when two charged objects repel or attract each other. When students are familiar with the idea that fields mediate interaction at a distance, they can conclude from this observation that a manifestation of potential energy is involved in this phenomenon. In that way, fields become an indicator by that students can recognize potential energy in phenomena. Potential energy becomes observable for students through the interaction at a distance like kinetic energy through motion, it becomes as real as kinetic energy. Second, fields can enhance students' system thinking. The Framework for K-12 Science Education describes potential energy as "energy stored in fields within a system" (NRC, 2012). Making sense of phenomena that involve potential energy therefore requires thinking in systems. Fields can help students to think of potential energy as a part of a system, because potential energy is energy stored in a field that is localized to a system which includes the interacting objects and the field. By thinking of potential energy in terms of fields that mediate interactions between two or more objects, students are prompted to consider the system to which potential energy is associated. When students consider the system as they explain phenomena, they may be more successful in using energy ideas to make sense of the behavior of systems. In the example of a falling ball, students that learned that fields mediate interaction at a distance may be more likely to take the reference point into account when they determine the amount of energy.

*Learning theory perspective: Conceptual understanding*

Fields can help support students in developing an understanding of individual manifestations of potential energy, and they can further support students' conceptual understanding of potential energy. By conceptual understanding, we mean that students recognize the unifying aspects of potential energy (potential energy is a part of a system, depends on the configuration of objects and involves interaction at a distance). In order to support conceptual understanding of potential energy it is necessary to stress these connecting elements between its manifestations. Lindsey (2014) found that an understanding of gravitational potential

energy could be used as a bridge to understand electric potential energy better. This may be because both problems include two objects that interact at a distance. Fields may constitute such a connecting element not only between gravitational and electric potential energy, but between all manifestations of potential energy such as gravitational, magnetic, electric, and chemical energy. Despite these various forms of potential energy, the underlying principles are the same for each manifestation. For all manifestations of potential energy: (1) fields mediate interaction at a distance and (2) the energy is stored in a field with the amount of energy depending on the configuration of the objects. In that way, fields connect all manifestations of potential energy. They serve as a unifying concept to help students recognize that numerous forms of energy are actually instances of potential energy. Introducing students to potential energy in conjunction with fields can help students to reduce the great number of its manifestations to these two simple principles. When fields constitute a unifying underlying concept between the different forms of potential energy, students should have better-connected ideas about energy and especially potential energy. Therefore, fields should promote knowledge integration processes. The knowledge integration perspective (Lee & Liu, 2010; Linn, 2006) emphasizes that students' learning is more successful when they build knowledge networks that are well organized around central ideas. Fields can help students organize their ideas by reducing the number and strengthening the connection between the ideas needed to successfully use the energy concept to explain phenomena. With fields the different manifestations of potential energy do not remain isolated from one another in students' knowledge networks but are well-connected via fields ideas. A conceptual understanding of potential energy should therefore result in well-connected knowledge networks about the energy concept as a whole.

*Promoting continued learning of energy through combining both perspectives*

Conceptual understanding of energy should support students continued learning about energy. When connecting fields and energy, two central concepts of physics are combined. In the U.S. Next Generation Science Standards (NGSS Lead States, 2013), energy appears as both a core idea in physical science as part of a crosscutting concept focused on conserved quantities. But fields are also a central concept in physics as they connect different core ideas and are useful in various topics and contexts (diSessa & Sherin, 1998). In the performance expectations of the NGSS fields are not only part of the core idea and crosscutting concept 'energy' but also part of the core idea 'forces and interaction' and the core idea 'waves'. In the German Educational Standards in the Subject of Physics (KMK, 2020) fields represent one of three central concepts (besides waves and quanta) on that physics instructions relies on in high school. In these grades, fields are used in various topics and contexts to explain phenomena such as capacity of a capacitor in electricity, the hall effect in magnetism or to explore Newton's law of gravitation in mechanics. Bransford et al. (2000) emphasize that an understanding in a domain is developed when ideas are structured around central concepts

in that domain that are interconnected. In the domain of physics, the combination of energy and fields as central concepts may constitute a fruitful tool to explain a wide range of phenomena in nearly every topic of physics. Using the same fields and energy ideas in a variety of topics can help students to use their prior knowledge to better understand new phenomena (Bransford & Schwartz, 1999; diSessa & Wagner, 2005). When students get the possibility to explore various manifestations of potential energy and are invited to make the connections between them they should develop conceptual understanding. Such conceptual understanding provides the basis for applying their knowledge to unknown phenomena in continued learning sets about energy.

### **Research questions**

Learning about energy is difficult for students, and they struggle in particular with potential energy. Existing studies lack evidence that students actually use fields in connection to energy to explain phenomena, even when such connections are made explicit during instruction. We therefore ask the following research questions:

**RQ1:** *To what extent does the inclusion of the fields concept lead to: a) better understanding of energy in an introductory unit about energy, and b) continued learning about energy in a continued learning unit in the context of electric potential energy?*

**RQ2:** *How do students in a fields approach use fields in conjunction with potential energy to make sense of phenomena?*

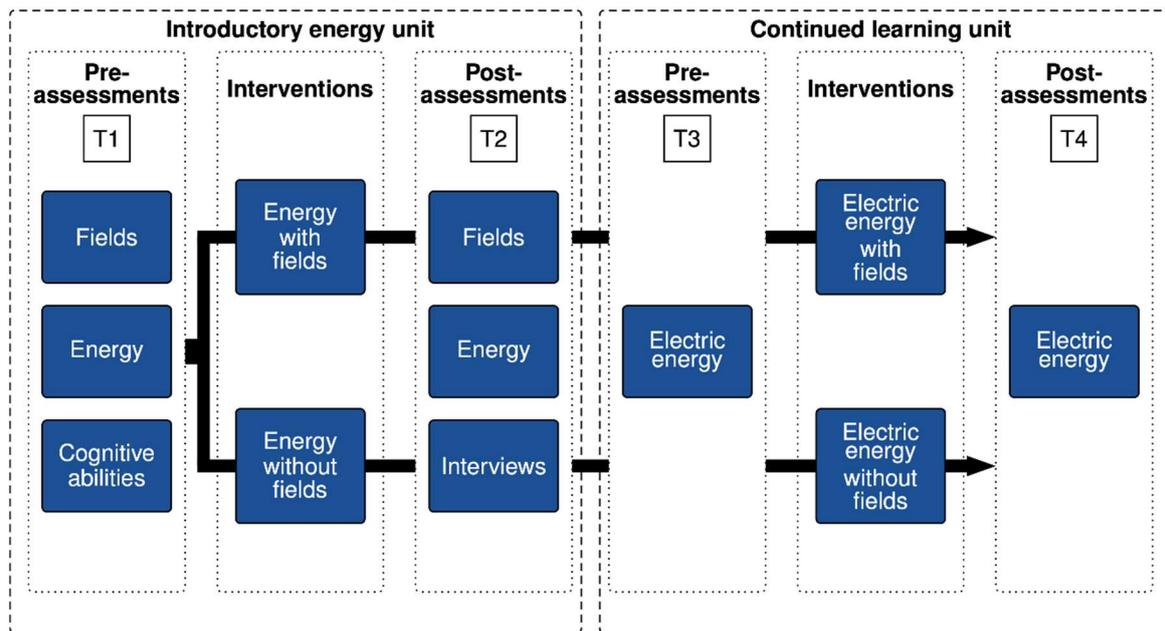
### **Methods**

To answer our research questions, we employed a mixed-methods design (Figure 3.1). The study was divided into two parts: an introductory and a continued learning unit. In both parts of instruction students were assigned to one of two conditions: a fields group and a non-fields group. Throughout both parts of instruction, students remained in their condition. Instruction in both parts and groups followed a forms-based approach. The introductory unit introduced the energy forms of kinetic, gravitational and magnetic energy and their transformation into one another. The continued learning unit focused on electric energy. The fields and non-fields group learned about the potential energy forms of gravitational, magnetic and electric energy. In the fields-group, students learned about these energy forms in conjunction with fields while the non-fields group learned about these energy forms without fields. The units in both conditions - fields or non-fields - required approximately the same time of instruction. In the non-field group, we used the instruction time in which the fields group learned about fields to focus on the learning difficulties related to potential energy (for example: the right choice of a reference point). The introductory unit took place during September and November 2020

and consisted of eight lessons (45 minutes each) of instruction across four weeks. The continued learning unit took place during May and June 2021 and consisted of three lessons (45 minutes each) of instruction across two weeks. Between the two parts of the study, students followed instruction on optics and electricity that did not include energy ideas.

**FIGURE 3.1**

*Study Design as a Quasi-Experimental Pretest-Posttest Design Divided Into Two Parts (Introductory and Continued Learning Unit) With Two Intervention Groups (Fields and Non-Fields)*



Quantitative data on students learning on energy and fields were collected using written tests before and after the introductory unit (T1 and T2) and the continued learning unit (T3 and T4). The fields test was used to ensure that students in the fields group learned substantially about fields. We assessed students' cognitive abilities by a nonverbal cognitive abilities test before instruction (T1). The measurement of students' cognitive abilities aimed to achieve two purposes: First, it served as a covariate to assess the effect of the inclusion of fields. Second, we used the data to ensure comparability. We collected qualitative data by interviews after the introductory energy unit (T2).

### The instructional units

The introductory units for the fields group and the non-fields group used in this study were based on units developed and tested in a previous study (Fiedler et al., 2022). The continued learning units for both groups stem from the work of Fiedler et al. (2023) and have not been modified. All instructional units implemented an inquiry-based learning paradigm engaging students in the use of the scientific practices to construct new knowledge (Forbes et al., 2020; NRC, 2012). More specifically, we used a project-based storyline approach to design the units (Krajcik, J. S., & Shin, N., 2014). In terms of content the units followed the traditional forms-

based approach: The introductory unit introduced the energy forms of kinetic energy and the potential energy forms magnetic and gravitational energy. Energy transformation was also part of the introductory unit. The continued learning unit introduced electric energy and light and thermal energy. Students learn a semiquantitative approach to account for energy forms and their transformation in phenomena, i.e., they learn that a decrease in one energy form always comes with an increase in another energy form but do not calculate amounts of energy. For the present study, the introductory units for the fields and the non-fields group have been adapted in such way that they better meet our theory that fields support conceptual understanding of potential energy. In particular, we excluded elastic energy from our unit. In the study of Fiedler et al. (2022) we found that students in the field group scored slightly worse on the test on energy at posttest time than their counterparts in the non-fields group. Observations made in the classroom made us hypothesize that students in the fields group had difficulties to recognize that elastic energy is a manifestation of potential energy. The difference between elastic energy and the other manifestation of potential energy that were introduced during the units (gravitational, magnetic, electric potential energy) is that elastic energy can only be classified to potential energy when we consider the microscopic level. For young students this microscopic level is difficult to understand (Harrison & Treagust, 2002; Nordine et al., 2018). Students in the study of Fiedler et al. (2022) were probably not able to unify the three forms of potential energy that were presented to them in the introductory unit (elastic, magnetic and gravitational potential energy). Therefore, elastic energy seemed to present a hindrance for students' development of a conceptual understanding of potential energy. Consequently, we decided not to introduce students to elastic energy in the introductory unit. The instructional units of the fields group and the non-fields group covered the same phenomena and experiments and required the same time of instruction. The distribution of topics among lesson in the introductory units and in the continued learning units can be seen in Table 3.1.

**TABLE 3.1**

*Distribution of Topics Among Lesson for the Introductory and the Continued Learning Unit for Both Groups*

Lesson	Topic Focus	
Introductory Energy Unit		
	Group	
	Non-Fields Group	Fields Group
1 + 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of the driving question “What causes an object to move and upon what does it depend how fast an object can become or how high it can get?”</li> <li>• Introduction of the energy concept.</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction of kinetic energy and its dependence on mass and velocity.</li> </ul>	
3 - 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction of gravitational energy and its dependence on mass and the distance of objects.</li> <li>• Introduction of energy transformation in case of kinetic and gravitational energy.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction of the field by the magnetic field.</li> <li>• Introduction of magnetic energy and its dependence on the strength and the distance of the magnets.</li> <li>• Introduction of energy transformation in case of magnetic and kinetic energy.</li> </ul>
6 + 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction of magnetic energy and its dependence on the strength and the distance of the magnets.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introduction of gravitational energy and its dependence on mass and the distance of objects.</li> <li>• Introduction of the gravitational field and comparison of the fields.</li> </ul>
8	Answering the driving question and preview of the topic of the continued learning unit.	
<b>Continued Learning Unit</b>		
1	Students investigated phenomena that contained electric energy.	Students explored the electric field as a store for electric energy and compared it to the gravitational and the magnetic field.
2 + 3	Students investigated the transformation of electric energy to light and thermal energy in a circuit. Students used a model representing a conveyor belt in order to explore electric energy transport.	

For the fields group, we payed special attention to stress the connection between energy and fields. Throughout the introductory and the continued learning unit the underlying principles of potential energy and thus the fact that all forms of potential energy are connected by fields are made explicit and this was repeatedly done. Both underlying principles – (1) fields mediate interaction at a distance and (2) the energy is stored in a field with the amount of energy depending on the configuration of the objects – are first introduced to the students with the introduction of magnetic energy. A cart with a magnet is approached to another magnet in that way that they repel each other. Students are asked to explain how the magnet on the cart “knows” that there is another magnet even though the two magnets are not touching.

Students intuitively assume that it is the magnetic field that mediates this interaction at a distance, and this assumption likely arises from the widespread use of these terms in everyday experiences. Following this introduction to the first principle (fields mediate interaction at a distance) students vary the distance between the magnets in an experiment. They are measuring the amount of stored magnetic energy by a nail that is dipping deeper into a piece of dough, the more magnetic energy was stored. By this investigation students learn that magnetic energy is stored in the magnetic field and that the amount of magnetic energy depends on the distance of the magnets. Through the example of magnetic energy students were introduced to the second principle. During instruction, both principles are applied to each new form of potential energy. The first principle (fields mediate interaction at a distance) becomes a sort of indicator for potential energy. In the phenomenon of a falling ball there is an interaction at a distance between the ball and the earth. Hence, there must be a field that mediates this interaction at a distance between objects with a mass, that is the gravitational field. In the phenomenon of a handheld electrostatic generator that repels objects made of aluminum, there is an interaction at a distance between the generator and the objects. There must be a field that mediates this interaction at a distance between charges, that is the electric field. In an investigation of the respective potential energy forms of gravitational and electric energy, students explore the second principle in an experiment. They vary the distance of the ball and the earth (or more precisely the reference point) and discover the importance of the distance between charges by a model of the electric circuit when accounting for stored potential energy. With every manifestation of potential energy, students could transfer their prior knowledge about the underlying principles of potential energy to the new form of potential energy. In that way, fields constitute the connecting element between the various manifestations of potential energy.

In order not to disadvantage the students in the non-fields group, we highlighted throughout the units that with potential energy one always must account for a reference point or that always two objects and their distance must be considered when determining the amount of potential energy in a phenomenon.

### **Instruments**

#### *Students' understanding of energy and fields*

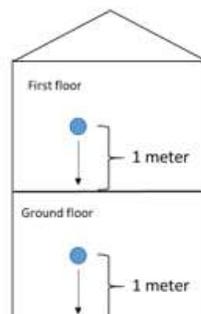
We used written tests to assess students understanding of energy and fields in the introductory unit and electric energy in the continued learning unit. To develop these tests, we relied on established energy assessment instruments (Fortus et al., 2019; Kubsch et al., 2019; Michel & Neumann, 2016; Nordine, University of Michigan/2007; Swackhamer & Hestenes, 2005). We adapted the tests in that way that they meet the content (mechanics and electricity) and the aspects of the energy concept (forms and transformation) that we drew on in our units. We also developed some new tasks that focused more on potential energy. Importantly, and in order to ensure that the tests were equally feasible for both conditions,

assessment tasks did not require fields, and we designed scoring rubrics such that students' responses could achieve full credit whether they used fields ideas or not. In total the energy test for the introductory unit consisted of 7 multiple choice and 2 open-ended tasks at pretest time (T1) and 12 multiple choice and 9 open-ended tasks at posttest time (T2). We decided to reduce the pretest to those tasks that could be solvable for the students through everyday knowledge to not overwhelm them. An example task from the energy test can be seen in Figure 3.2.

### FIGURE 3.2

*Example of a Task From the Energy Test at Pretest (T1) and Posttest (T2) Time From the Introductory Unit*

A ball is lifted and dropped once on the ground floor of a house and once on the first floor of a house. In both cases, the ball is dropped from a distance of one meter from the floor (see illustration). How much kinetic energy does the ball have just before it hits the floor in both cases?



- In both cases, the ball has approximately the same amount of kinetic energy.
- On the first floor the ball has more kinetic energy.
- On the ground floor, the ball has more kinetic energy.
- The kinetic energy is about twice as great on the first floor as on the ground floor.

Our instrument to measure students understanding of fields has been taken up from an existing instrument (Fiedler et al., 2022) and slightly been adapted. We in particular modified the tasks to ensure that they reflect students understanding of the role of fields for potential energy. The test should measure if students understand that (1) fields mediate interaction at a distance and (2) store potential energy. The test was identical at pretest (T1) and posttest time (T2). It was composed of 6 multiple choice and 4 open-ended tasks. An example task of the fields-test is available in the supplementary material as Figure 3.S1. For the electric energy test we took an existing instrument (Fiedler et al., 2023). The electric energy test was identical at pretest (T3) and posttest time (T4) and contained 8 multiple choice tasks and 4 open-ended tasks.

In the multiple-choice tasks of all three written tests (energy, fields, electric energy), students could choose from four answer options, one of which was the correct one. The right answer was coded with 1, the wrong answers with 0. To evaluate the open-ended tasks, we used partial credits. We coded from 0 to 2 points depending on the degree to which students were

able to bring energy ideas and connect these ideas. We coded 0 when the answer was wrong, 1 when students mentioned facts or one energy idea, 2 when students connected two or more ideas of the energy concept to explain the phenomenon. The open-ended tasks of the tests were coded by two raters. Inter-rater analysis showed a substantial strength of agreement with a Cohen's kappa of  $\kappa = .75$  (Landis & Koch, 1977).

The internal consistency of the tests was assessed by McDonald's Omega (McNeish, 2018). The reliability of the energy pretest (T1) was approaching acceptable levels with  $\omega = .64$  and acceptable at posttest time (T2) with  $\omega = .78$ . The reliability of the fields test was approaching acceptable levels with  $\omega = .62$  at pretest (T1) and  $\omega = .63$  at posttest time (T2) for the fields group. The reliability of the electric energy test was acceptable at pretest time (T3) with  $\omega = .72$  and at posttest time (T4) with  $\omega = .77$ . We measured students cognitive abilities with a nonverbal subscale of an existing instrument (Heller & Perleth, 2000). The cognitive abilities test had an excellent reliability with  $\omega = .93$ .

### *Interviews*

In order to look in more depth in students thinking about energy, we conducted semi-structured interviews about instances (Osborne & Gilbert, 1980). Students were exposed to short videos with 3 phenomena: (1) a pendulum (2) two magnets that attract each other and smash a cup of popcorn and (3) a roller coaster that goes up a vertical track, stops briefly and goes back down again. We chose these three phenomena because a full explanation requires system thinking and is facilitated when students have developed a conceptual understanding of potential energy. They should therefore allow us to track differences in students thinking in both conditions. Students were asked to explain the phenomenon with energy. After students answer, the interviewer asked clarifying questions to explore how students meant a statement. The interviewer only used ideas and terms that the student used already to make sure not to bring new ideas that could help students with the next phenomenon. The interviews were coded by two raters to ensure agreement. The inter-rater reliability analysis showed a substantial strength of agreement (Cohen's Kappa  $\kappa = .70$ ).

### **Participants**

The study took place with  $N = 67$  students from 7<sup>th</sup> grade in one school in Northern Germany. Students were in their first year of learning physics. Students were divided into a fields group ( $N = 44$ , two classes) and a non-fields group ( $N = 23$ , one class), representing all students from 7<sup>th</sup> grade. All groups were taught by one teacher. By choosing this design, that is to test our approach in one school and with one teacher, we tended to control for effects that are due to teachers teaching style or different school environments. The cognitive ability test showed a significant group difference with a medium effect in favor of the fields group ( $t(65) = -2.08$ ,  $p = .04$ ,  $d = 0.54$ ). Because of this difference between the groups, we took care to include the cognitive abilities into account as a covariate in our analysis. We also compared the groups in

terms of their prior knowledge on energy, fields and electric energy. There was no significant group difference in the energy test ( $t(65) = 0.44, p = .66, d = 0.11$ ) and the fields test ( $t(65) = 0.92, p = .36, d = 0.24$ ) and a borderline significance in the electric energy test ( $t(65) = -1.92, p = .06, d = 0.49$ ) (Cohen, 2013).

We interviewed twelve students, representing approximately 20% of the sample. We chose four students from each of the three classes resulting in eight students from the fields group and four students from the non-fields group. Students for the interviews were selected by their teacher. From those students that agreed to take part in an interview, the teacher chose four students in each class that should reflect the range of abilities in that class. Comparison of the interview students from the non-fields group with the non-fields group as a whole in terms of their score on the energy test at posttest time (T2) showed that the interview sample is representative for the non-fields group as a whole ( $t(21) = -0.004, p = .997, d = 0.002$ ). However, we found that our interview sample in the fields group could not be considered as representative for the fields-group as a whole because their mean score on the energy test at posttest time (T2) was higher than the mean score from the fields group as a whole ( $t(42) = 2.70, p = .01, d = 1.06$ ). This issue may have been occurred due to the way we sampled our interview sample. From both an ethical and practical perspective when working with young students, we required that students voluntarily agree to participate in an interview (i.e., rather than being compelled by their teacher). This non-randomized selection process may have systematically biased our interview sample. In our group comparison we paid particularly attention to not interpret data in favor of the fields group. That is why we compared students on an individual level with comparable scores on the energy test at posttest time (T2) (see below).

## **Data analysis**

### *Research question 1*

In the first part of our first research question (RQ 1a), we investigate the extent to which the inclusion of fields leads to a better understanding of energy in an introductory unit about energy. To address this, we drew on the quantitative data from the written assessments to compare students' understanding of energy in the fields and the non-fields group. Students understanding of energy was measured by the energy test before (T1) and after (T2) the introductory unit. To achieve a first impression of the differences between the fields and the non-fields group, we examined students' progress in understanding energy over time. For both groups we compared students' scores on the energy test pre (T1) and post (T2) the introductory unit with a paired t-test. For a first group comparison, we calculated a t-test with students' scores on the energy test at posttest time (T2). To analyze the group differences in more depth, we had to consider other influences on students' score on the energy posttest than belonging to the fields or the non-fields group. We conducted an analysis of covariance (ANCOVA) that allowed us to control for students' cognitive abilities and students' prior

knowledge on energy. In that ANCOVA we took students' scores on the energy test at posttest time (T2) as the dependent variable and students' scores on the cognitive abilities test at pretest time (T1) and their scores on the energy test at pretest time (T1) as covariates.

In the second part of our first research question (RQ1b) we wanted to investigate to what extent the inclusion of fields leads to a better continued learning about energy in a continued learning unit in the context of electric potential energy. To address this, we compared students' understanding of electric energy after a continued learning unit. We measured students' understanding of electric energy by the electric energy test at pretest time (T3) and posttest time (T4) of the continued learning unit. Our proceeding to investigate group differences is similar to RQ1a – for both groups we analyzed students' progress in understanding electric energy by calculating a paired t-test with students' scores on the electric energy test at pretest time (T3) and posttest time (T4). To explore group differences, we compared students' understanding of electric energy after the continued learning unit by calculating a t-test with students' scores on the electric energy test at posttest time (T4). In order to compare students' continued learning as a function of a fields- or non-fields-approach, it was particularly important to consider students' prior understanding of energy gained through the introductory unit. We expected students to have different conceptualizations of potential energy due to the connection of fields and energy in the introductory unit as differences in students' conceptualization of potential energy may affect students' continued learning. To test for this, we calculated an ANCOVA using students' scores on the electric energy test at posttest time (T4) served as the dependent variable. We took the group factor, students' scores on the cognitive abilities test at pretest time (T1), the electric energy test at pretest time (T3) and the energy test at posttest time (T2) as covariates in our ANCOVA.

### *Research question 2*

In our second research question (RQ2), we investigated how students in a fields approach use fields in conjunction with potential energy to make sense of phenomena. To address this, we drew primarily on the qualitative data from the interviews that were conducted post the introductory unit (T2). Before analyzing the interviews, we wanted to first establish that students in the fields group did indeed develop their understanding of fields. We therefore examined students' progress in understanding fields with a paired t-test with students' scores on the fields test at pretest time (T1) and posttest time (T2). To identify relevant energy ideas for the analysis of the interviews we referred to the literature and educational standards (Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, 2016). The energy ideas that were taught during the introductory unit were the energy forms of kinetic energy and gravitational energy and magnetic energy and energy transformation. We also coded energy conservation as it was implicitly part of the units when students learned that when there is a decrease in one energy form there is an increase in another form. We hypothesized

that fields promote students' system thinking and students conceptual understanding of energy. To investigate how students' linked potential energy with system thinking, we coded this idea when students figured out that to make sense of potential energy (1) we always have to consider two objects (2) the distance of (at least) two objects has to be considered and that (3) a point of reference has to be chosen. To investigate students conceptual understanding, we coded both underlying principles of potential energy separately. We wanted to find out if these two ideas were helpful when explaining phenomena and how these two principles are connected to other aspects of the energy concept. We therefore distinguished between students' use of fields to explain interaction at a distance and when students referred to potential energy as being stored in fields. Table 3.2 shows example codes from our analysis.

**TABLE 3.2**

*Extract of the Coding System Used for the Analysis of the Interviews*

<b>Variable</b>	<b>Definition</b>	<b>Anchor Example</b>	<b>Borderline Cases</b>
Gravitational energy	Student refers to the indicator height.	Gravitational energy can be recognized by the fact that an object is at a certain height.	...at its highest point. The higher, the more gravitational energy.
System thinking	Student accounts for potential energy by considering two objects and their configuration or by referring to a reference point.	The greater the distance between the roller coaster and the earth, the greater the gravitational energy.	The magnetic energy changes with the distance between the magnets. At the lowest point the gravitational energy is zero.
Fields interaction	Student uses fields to explain interaction at a distance.	Objects can interact via fields without touching each other.	The magnets know through the magnetic field that they must attract or repel each other.
Transformation	Student explains that one form of energy is transformed to another.	The kinetic energy is transformed into gravitational energy.	The kinetic energy decreases and the gravitational energy increases.

After the transcription of the interviews we conducted a network analysis (Fortus et al., 2019; Gombert et al., 2023; Kubsch et al., 2019) for both interview groups (fields vs. non-fields) in order to find out which ideas students in both conditions use to make sense of phenomena and how students connect these ideas. We analyzed students' knowledge networks in the

fields group and contrasted it to the knowledge network of the students in the non-fields group. Knowledge networks allow us to illustrate differences in students thinking about energy in both groups as they represent the connection of ideas. We assume that ideas that are used together in the explanation of one phenomenon are connected. We then aggregated all these ideas that are connected for all students in the fields group and for all students in the non-fields group. We then adjusted for different group sizes when generating the knowledge networks. In that way we obtained knowledge networks on a group level.

To reduce problems that could arise because of the different sample sizes between the fields and the non-fields group in our interviews, we compared knowledge networks on an individual student level as an addition to the group level networks. We matched students across conditions (fields vs. non-fields) in terms of similar scores on the energy test at posttest time (T2). We matched one student in the non-fields group with a posttest score of 43% with one student from the fields group with 43%. In addition, we matched another student from the non-fields group with a posttest score of 67% with one student from the fields group with 70%. For the other two students in the non-fields group with posttest scores of 7% and 20% we found no matching counterpart in the fields group.

## Results

In our study we aimed to investigate the inclusion of fields on students' understanding of energy in an introductory unit on energy and a continued learning unit on electric energy. We therefore measured students' understanding of energy, electric energy and fields as a function of students' scores on written tests. Table 3.3 shows a descriptive overview of students' scores on all measures.

**TABLE 3.3**

*Descriptive Overview of Students' Results on all Measures for Both Groups. As the Number of Tasks Between the Energy Test at Pretest Time (T1) and Posttest Time (T2) Differed, We Show Students' Scores in Percent and Students' Gain in Energy Understanding in Percentage Points. For All Other Measures We Indicate Absolute Points. We Added the Maximum Score Separated by a Slash.*

	Time	Fields Group (N= 44)		Non-Fields Group (N=23)	
Results		M	SD	M	SD
Energy understanding (pre) in %	T1	24.79	10.98	26.10	12.58
Energy understanding (post) in %	T2	47.84	17.64	34.13	20.74
Gain in energy understanding in percentage points	T1-T2	23.05	20.97	8.04	22.68

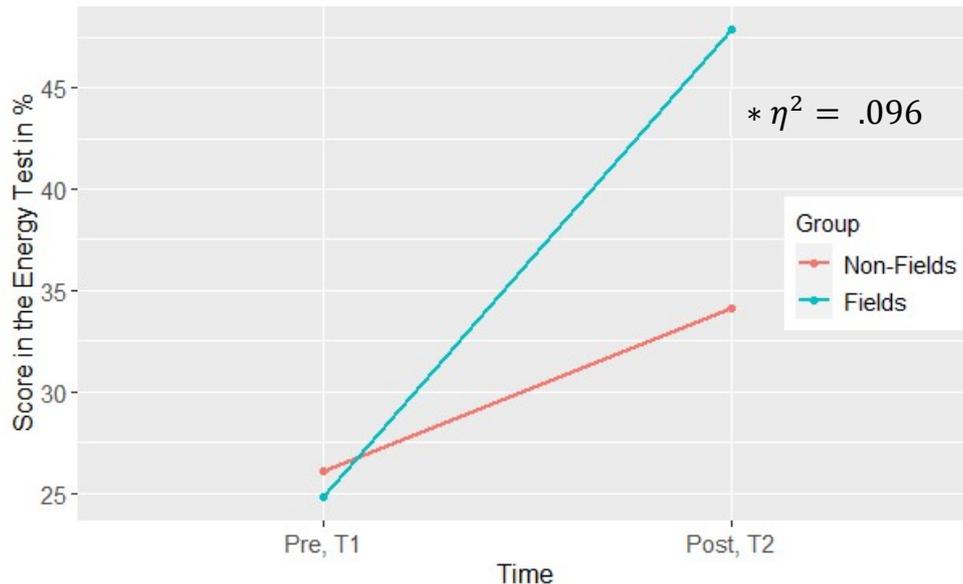
Fields understanding (pre)	T1	4.22/14	2.20	3.72/14	1.92
Fields understanding (post)	T1	7.10/14	2.00	3.15/14	1.57
Gain in fields understanding	T1-T2	2.89	2.65	-0.57	1.80
Cognitive abilities	T1	16.45/25	5.93	12.70/25	8.74
Electric energy understanding (pre)	T3	5.93/18	2.53	4.76/18	2.00
Electric energy understanding (post)	T4	9.25/18	3.28	6.22/18	3.14
Gain in electric energy understanding	T3-T4	3.32	3.03	1.46	2.78

**RQ1 a): Comparison of students’ understanding of energy in the introductory unit**

In the first part of our first research question we focused on the introductory unit. We aimed to investigate the extent to which the inclusion of fields leads to a better understanding of energy in the introductory energy unit. Students’ understanding of energy throughout the introductory unit was measured by students’ scores on the energy test. Figure 3.3 shows the groups means scores on the energy test at pretest time (T1) and posttest time (T2).

**FIGURE 3.3**

*Students Mean Scores on the Energy Test at Pretest (T1) and Posttest (T2) Time of the Introductory Unit for Both Groups*



To examine students’ progress across groups we compared students’ scores in the energy test at pretest time (T1) and posttest time (T2) for each group individually. In both groups, students progressed in their understanding of energy. In the fields group students’ scores increased significantly with a large effect size ( $t(43) = -7.29, p < .001, d = 1.57$ ). In the non-fields group students’ scores increased with a borderline significance and a small effect size ( $t(22) = -1.70, p = .10, d = 0.47$ ).

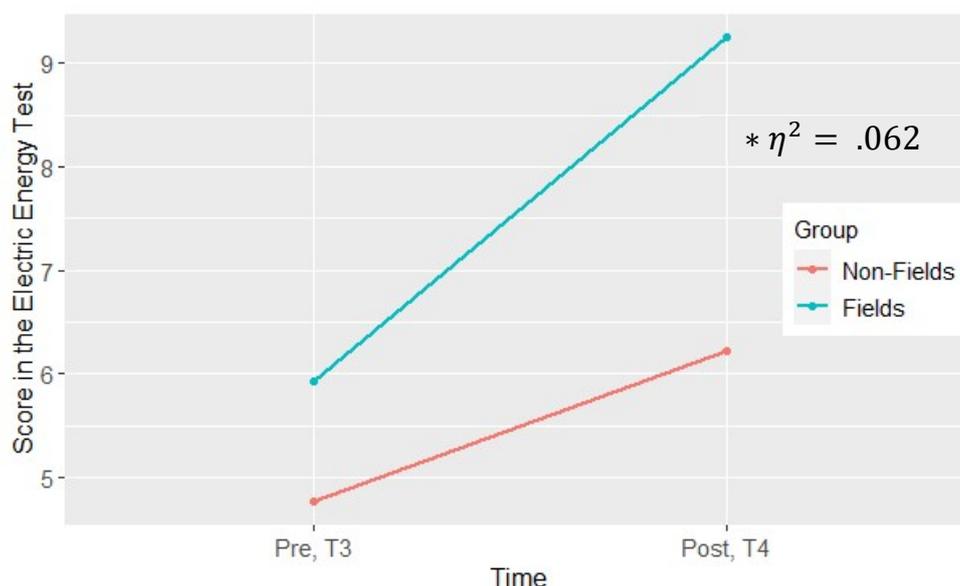
The group comparison of the fields and the non-fields group in terms of their scores on the energy test at posttest time (T2) shows that students in the fields group scored statistically higher than students in the non-fields group with a medium effect size ( $t(65) = -2.84, p = .006, d = 0.73$ ). As the fields group scored significantly higher on the cognitive abilities test, we conducted an ANCOVA to control for students' cognitive abilities scores. With this ANCOVA we compared students' understanding on energy measured by the energy test after the introductory unit at posttest time (T2). We added belonging to the fields or the non-fields group and took students cognitive abilities test (T1) and students' energy pretest scores (T1) as covariates. The results of the ANCOVA indicate that even after controlling for cognitive abilities and prior knowledge on energy ( $F(1,63) = 6.7, p = .012, \text{partial } \eta^2 = .096$ ), students differed statistically meaningful with a medium effect size. Students in the fields group outperformed students in the non-fields group during the introductory unit on energy.

#### **RQ1 b): Comparison of students' understanding of energy in the continued learning unit**

In the second part of our first research question we focused on the continued learning unit. We aimed to investigate the extent to which the inclusion of fields leads to a better continued learning about energy in the continued learning unit in the context of electric energy. Students' understanding on energy throughout the continued learning unit in the context of electric energy was measured by students' scores on the electric energy test. To evaluate students' progress in understanding electric energy, we compared students' scores on the electric energy test before (T3) and after (T4) the continued learning unit for each group. Figure 3.4 shows groups means scores on the electric energy test at pretest time (T3) and posttest time (T4).

**FIGURE 3.4**

*Students Mean Scores on the Electric Energy Test at Pretest (T3) and Posttest (T4) Time of the Continued Learning Unit for Both Groups*



Students in the fields group progressed substantially in their understanding on electric energy as their score on the electric energy test differed statistically between pretest time (T3) and posttest time (T4) with a large effect size ( $t(43) = -7.27, p < .001, d = 1.13$ ). Also, the students in the non-fields group progressed substantially in their understanding of electric energy as their score on the electric energy test increased significantly between pretest (T3) and posttest time (T4) with a medium effect size ( $t(22) = -2.51, p = .02, d = 0.55$ ).

We compared the groups understanding of electric energy by a comparison of their scores on the electric energy test at posttest time (T4). The results show that students in the fields group scored significantly higher on the electric energy test than their counterparts in the non-fields group with a large effect size ( $t(65) = -3.65, p = .001, d = .94$ ).

Students in the fields group should differ from the students in the non-fields group by a different conceptualization of potential energy that they built during the introductory unit. That is why we also considered students prior knowledge on energy. To identify important influences on students understanding of electric energy other than belonging to the fields group, we examined the correlations between all measures. The correlation matrix is given in the supplementary material as Table 3.S1. Based on this consideration of relevant covariates we conducted an ANCOVA to compare students understanding on electric energy. We added the belonging to one of the groups and took cognitive abilities (T1), prior understanding on electric energy (T3) and prior understanding on energy (T2) as covariates. The results of the ANCOVA indicate that after controlling for cognitive abilities and prior knowledge on electric energy and energy students in the fields group performed statistically better on the electric energy posttest with a medium effect size ( $F(1,62) = 4.1, p = .047, \eta^2 = .062$ ). Students in the fields group outperformed students in the non-fields group during the continued learning unit on electric energy.

Students' performances on the written assessments about energy differed substantially between the groups in the introductory and in the continued learning part of our study. With a qualitative analysis we aimed to better understand and explain this difference in students' scores and with them their different understanding of energy.

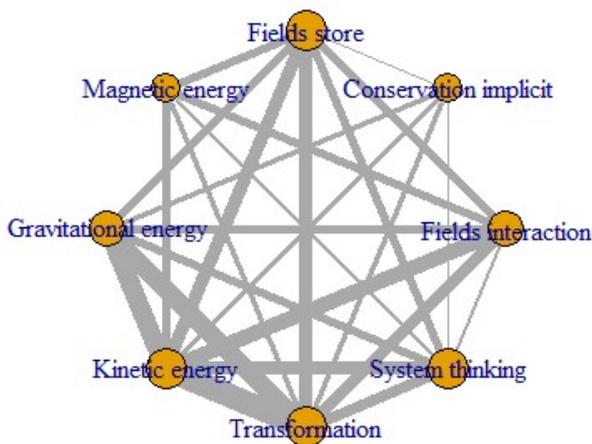
### **RQ2: Students' knowledge networks about energy**

We hypothesized that differences in students' performances in the energy tests are due to the inclusion of fields. Before we further investigated students' use of fields to explain phenomena, we ensured that students in the fields group actually progressed in their understanding of fields measured by the fields test at pretest (T1) and posttest time (T2). Students' scores on the fields test increased significantly from pretest to posttest time with a large effect size ( $t(43) = 7.23, p < .001, d = 1.37$ ) while the scores on the fields test in the non-fields group did not differ statistically with a small effect size according to expectations ( $t(22) = 1.50, p = .15, d = 0.32$ ). Students in the fields group progressed substantially in their understanding of fields.

To examine the role of fields in students' explanations of phenomena, we generated knowledge networks for both groups (Figure 3.5). Figure 3.5a represents the knowledge network for the fields group and Figure 3.5b shows the knowledge network for the non-fields group. The size of the circles increases with the number of connections of an idea with another idea. The thickness of the lines between two ideas increases with the number of cooccurrences of these two ideas in students' explanations. We therefore interpret the thickness of the lines as the strength of the connection between the two ideas.

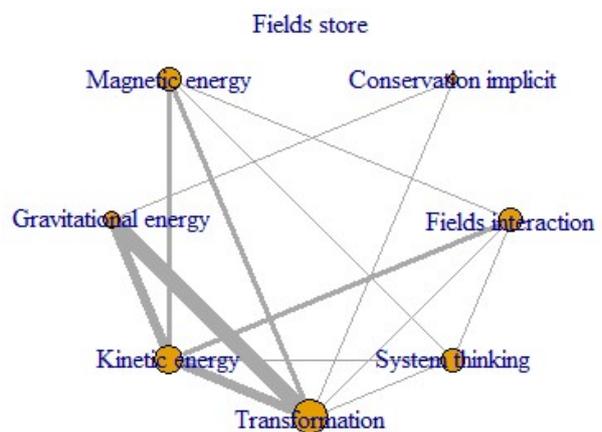
**FIGURE 3.5a**

*Knowledge Network of the Fields Group (8 Students) at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit*



**FIGURE 3.5b**

*Knowledge Networks of the Non-Fields Group (4 Students) at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit*



All interviewed students in both groups used the energy ideas that were necessary to explain the phenomena we presented to them. These ideas were the energy forms of kinetic, magnetic and gravitational energy and their transformation.

All students in the fields group used fields when explaining phenomena. They used both principles that were introduced during the unit: Fields as a store for potential energy (seven of eight students, 88% of the fields students; *"Because there is a magnetic field around every magnet and as long as the other object is also magnetic or made of a magnetic metal, there is energy between the two things."*<sup>7</sup>) and they used fields to explain interaction at a distance (100% of the fields students; *"the roller coaster is connected to the earth's gravitational field, which actually attracts everything."*). Both ideas that fields mediate interaction at a distance and store potential energy are strongly connected to nearly all the other ideas of the energy concept (transformation, the different forms, conservation).

Students in the fields group (seven of eight students, 88%) were more likely to recognize potential energy as a part of a system than students in the non-fields group (one of four

<sup>7</sup> Student answers presented in this manuscript were translated from German to English by the authors.

students, 25%). When making sense of phenomena that involve potential energy, 88% of the students accounted for at least two objects and their configuration (“...and the closer the magnets are to each other, the more magnetic energy there is.”, “that is, the further an object is from the earth or the ground, the greater the gravitational energy.”). They also involved a reference point in their explanation (“...when the pendulum is basically at the zero point where the gravitational energy was built up, then the kinetic energy transforms back into gravitational energy.”). They recognized the need to consider a system when making sense of phenomena that involve potential energy. System thinking seemed to be helpful when explaining phenomena. In the non-fields group only one student of four demonstrated this thinking of potential energy as part of a system (“...and the closer the magnets are to each other, the more magnetic energy there is.”).

Comparison of the knowledge networks for both groups shows that students differ in the way in that they activate and connect ideas. In the knowledge network of the fields group, we can see a great number of connections between the ideas and the connecting lines are thick. Therefore, students in the fields group activated the energy ideas often to explain phenomena and the ideas are strongly connected to each other, thus used often together. In contrast, the knowledge network of the non-fields group shows a smaller number of connecting lines between the ideas and these lines are also less thick than in the knowledge network of the fields group. Ideas are therefore less used together to explain phenomena.

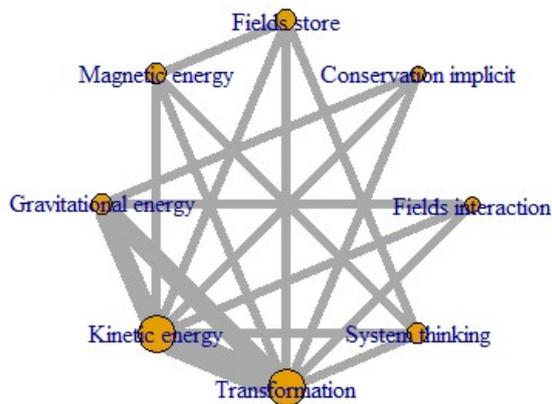
We included energy conservation as an idea in our analysis, as it was implicitly part of our unit. Energy conservation is identified in the literature as the aspect of the energy concept with that students struggle the most (Driver & Warrington, 1985; Duit, 1984; Liu & McKeough, 2005; Neumann et al., 2013). The knowledge networks show that students in the fields group were more likely to bring up the idea that energy is conserved than their counterparts in the non-fields group and the idea of conservation is also more connected to other ideas in the fields group than in the non-fields group. This might represent a hint that fields could also address students’ problems with energy conservation.

Our interview sample in the fields group scored higher on the energy test at posttest time (T2) than the fields group as a whole. We therefore generated knowledge networks on an individual level and compared the knowledge networks of students with similar scores on the energy test at posttest time (T2) (Figure 3.6). Figure 3.6a shows the knowledge network of a student from the fields group with a score of 43% on the energy test and Figure 3.6b shows

the knowledge network of a student from the non-fields group with the same score of 43% on the energy test.

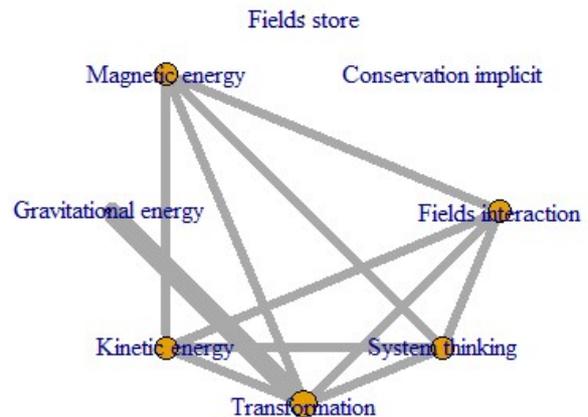
**FIGURE 3.6a**

*Knowledge Network of a Student in the Non-Fields Group With a Score of 43% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit*



**FIGURE 3.6b**

*Knowledge Network of a Student in the Non-Fields Group with a Score of 43% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit*

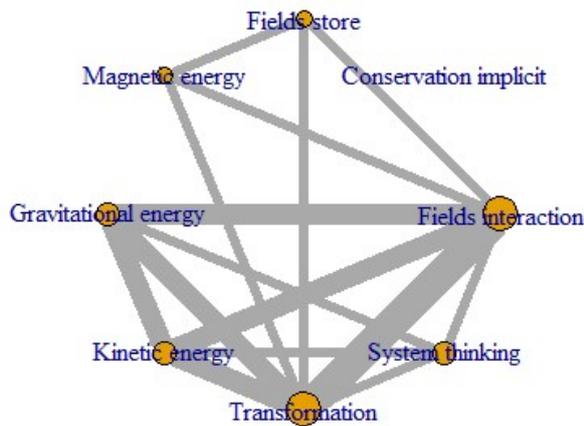


In line with the knowledge networks of either group, we can see that the students from the fields group activated more relevant ideas that were stronger interconnected to explain phenomena than the student in the non-fields group. A consideration of energy conservation was only found in the explanation of the student from the fields group. Interestingly the student from the non-fields group used fields to explain interaction at a distance in the phenomenon with the magnets (*"I think they interact through a field."*). This might be because students in both groups had instruction on magnets including the magnetic field prior to instruction on energy. This might show that the idea of mediation of interaction at a distance by a field and especially magnetic interaction via the magnetic field is a kind of intuitive idea for many students.

We additionally generated knowledge networks on an individual level for a student from the fields group with a score of 70% on the energy test (Figure 3.7a) and a student from the non-fields group with a score of 67% on the energy test (Figure 3.7b) to compare knowledge networks of students that have similar scores on the energy test at posttest time (T2).

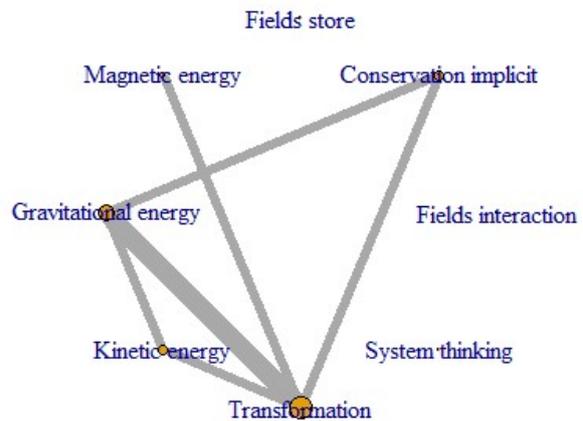
**FIGURE 3.7a**

*Knowledge Network of a Student in the Fields Group with a Score of 70% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit*



**FIGURE 3.7b**

*Knowledge Network of a Student in the Non-Group With a Score of 70% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit*



Once again, we observe a richer knowledge network with stronger connections between the ideas for the student in the fields group. Especially the idea of the role of fields to mediate interaction at a distance is strongly connected for example to gravitational energy, kinetic energy and transformation. The student used this idea of the mediation of interaction at a distance for the explanation in every phenomenon. In the knowledge network from the student in the non-fields group the ideas that belong to the fields concept are not activated according to expectations. The student did not show system thinking either but implicitly used the principle of energy conservation (*“in between there is half and half or quarter and three quarters”*). Overall, the knowledge networks on an individual student level reveal the same patterns of ideas than the knowledge networks of the groups as a whole.

## Discussion

Our findings suggest that the inclusion of fields into forms-based energy instruction can lead to a better understanding of energy in an introductory unit about energy and to a better continued learning about energy in a continued learning unit in the context of electric potential energy. The quantitative analysis shows that students who learned about energy with fields outperformed students that learned about energy in a traditional way without fields on all written tests. These results from the quantitative analysis are further supported by qualitative analysis of students’ explanations of phenomena. The network analysis supports the hypothesis that the differences in students’ performances on the written assessments are due to different ways of thinking about energy when students were taught about energy with or without fields.

Our results suggest that fields may support students in developing a deeper understanding of energy. Researchers have emphasized the importance of systems for the development of a deeper understanding of energy (Heron et al., 2009; Hirça et al., 2008). For a conceptual understanding of potential energy students need to understand that potential energy is a part of a system, depends on the configuration of objects and involves interaction at a distance. All these three central aspects can be addressed by the inclusion of fields. They were implemented in this study by the definition of the underlying principles of potential energy with fields: (1) fields mediate interaction at a distance and (2) fields store potential energy. Stressing connecting elements between different forms of potential energy can help students understand new forms of potential energy better (Lindsey, 2014).

Students' conceptual understanding is reflected in their knowledge networks. Students in the fields group activated more relevant ideas when explaining phenomena and these ideas were better interconnected. The underlying principles of potential energy were represented as codes in our network analysis. They are strongly connected to the other aspects of the energy concept (transformation, forms, conservation). Based on the knowledge integration perspective, such a well-organized knowledge network is helpful when explaining phenomena (Lee & Liu, 2010). The inclusion of fields seemed to be helpful in building strong connections between the aspects of the energy concept. In this way, the knowledge networks of the students in the fields group show patterns that represent conceptual understanding of energy. In contrast, the ideas of the non-fields group are not as strongly connected, not representing a robust knowledge network.

Bransford et al. (2000) argue that people learn when they organize ideas around central concepts. In our study fields seemed to help students to organize their energy ideas better, thus helping them to learn and helping them to continue learning about energy. The helpfulness of fields not only in an introductory but also in a continued learning unit emphasizes the importance of instructional coherence (Fortus et al., 2015). Fields ensure instructional coherence between the introductory and the continued learning unit as they connect all forms of potential energy. Fields served as a connecting element between gravitational and magnetic potential energy in the introductory unit and electric potential energy in the continued learning unit.

Our study is not without limitations. One limitation is that in our interview sample the students chosen from the fields group have higher scores on the energy test at posttest time (T2) than the fields group as a whole. Therefore, it may be that the knowledge network for the fields group is not representative for the fields group. Consequently, a comparison between the knowledge network of the fields group and the non-fields group could lead to misinterpretations in favor of the fields group. To address this issue, we conducted a case study on an individual student level. This allowed us to account for differences in the knowledge networks for students with comparable results. In that way, we could ensure that

the knowledge networks on an individual level still show the same structure than the networks of the interview groups as a whole.

A major limitation is the small sample size. That is why we cannot necessarily claim that our approach to include fields into energy instruction is helpful for all students. It might be that with other teachers with different teaching methods and students with another socioeconomic background the results would be different. To substantiate our results future research should investigate the role of fields with a greater number of students and teachers to be able to control for influences that are due to teachers teaching style or students' socioeconomic status. Still, the results of our study are consistent with others that have reported benefits of including fields into energy instruction (Fiedler et al., 2022, 2023; Fortus et al., 2019).

Theoretical energy education literature has repeatedly suggested to incorporate fields into energy instruction (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005), but only few studies contributed empirical results. Our findings confirm and extend previous results. In the systems-transfer approach of Fortus and colleagues it was indispensable to introduce fields as a system to which energy is transferred from objects or from which energy is transferred to objects. The investigation of the role of fields was not the focus of the study and the authors describe their introduction as a cost. Their findings indicate that fields support students learning about energy in an approach that avoids energy forms. But we had to investigate if the helpfulness of fields is limited to the systems-transfer approach or if the inclusion of fields could also help students to understand energy better in the typical approach of teaching energy that is the forms-based approach. Having included fields into a forms-based approach our findings contribute to the idea that the inclusion of fields into energy instruction can be beneficial irrespective of the adopted instructional approach. So far, the role of fields has been investigated based on quantitative data. Our findings add a qualitative argument as our knowledge network analysis provides insight into how students use fields in conjunction with energy to make sense of phenomena. Consequently, our results contribute to the idea that assigning potential energy to a field can help students to better understand the energy concept and use energy ideas to interpret phenomena. It has long been discussed in the literature to conceptualize potential energy differently with the help of fields. Our findings advocate for such a new conceptualization of potential energy, that is conceptualizing potential energy as energy stored in fields.

### **Acknowledgements**

This paper is funded by the German Research Foundation (DFG) - Project No. 458465679

**Supplementary Material**

Figure 3.S1

**FIGURE 3.S1**

*Example of a Task From the Fields Test at Pretest (T1) and Posttest (T2) Time From the Introductory Unit*

Two compass needles are placed at a small distance from each other (see illustration). Now one compass needle is turned. The other one also starts to turn.



How does the second compass needle know that the first one has turned?

Table 3.S1

**TABLE 3.S1**

*Correlations Between All Measures*

	Energy (pre, T1)	Energy (post, T2)	Fields (pre, T1)	Fields (post, T2)	Cognitive abilities (T1)	Electric energy (pre, T3)
Energy (post, T2)	0.098, $p = .4299$					
Fields (pre, T1)	0.17, $p = .172$	<b>0.39,</b> <b><math>p = .001</math></b>				
Fields (post, T2)	0.14, $p = .267$	<b>0.595,</b> <b><math>p &lt; .001</math></b>	<b>0.27,</b> <b><math>p = .025</math></b>			
Cognitive abilities (T1)	0.10, $p = .412$	0.15, $p = .222$	<b>0.27,</b> <b><math>p = .028</math></b>	<b>0.28,</b> <b><math>p = .024</math></b>		
Electric energy (pre, T3)	0.19, $p = .131$	<b>0.55,</b> <b><math>p &lt; .001</math></b>	<b>0.41,</b> <b><math>p = .001</math></b>	<b>0.33,</b> <b><math>p = .007</math></b>	0.08, $p = .538$	
Electric energy (post, T4)	<b>0.40,</b> <b><math>p = .001</math></b>	<b>0.58,</b> <b><math>p &lt; .001</math></b>	<b>0.27,</b> <b><math>p = .025</math></b>	<b>0.47,</b> <b><math>p &lt; .001</math></b>	0.24, $p = .055$	<b>0.52,</b> <b><math>p &lt; .001</math></b>



## **PUBLIKATION 4**

### **DER POTENTIELLEN ENERGIE EIN ZUHAUSE GEBEN EINE UNTERRICHTSEINHEIT ZUR EINFÜHRUNG DES ENERGIEKONZEPTES MIT FELDERN**

#### **Zusammenfassung**

Das Energiekonzept ist ein schwieriges Konzept für Schülerinnen und Schülern. Besonders die potentielle Energie bereitet den Schülerinnen und Schülern Schwierigkeiten. Wir stellen eine Unterrichtseinheit zur Einführung des Energiekonzeptes vor, die diesen Problemen mit der potentiellen Energie durch die Einbeziehung von Feldern begegnet.

Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K., & Nordine, J. (2022). Der potentiellen Energie ein Zuhause geben: Eine Unterrichtseinheit zur Einführung des Energiekonzeptes mit Feldern. *Plus Lucis*. Manuskript akzeptiert zur Publikation.

## **Einleitung**

Das Energiekonzept ist ein zentrales Konzept der Physik. Es kann nicht nur helfen, Phänomene innerhalb einzelner Sachgebiete (z.B. der Mechanik), sondern auch über Sachgebiete hinweg zu verstehen. Darüber hinaus hilft das Energiekonzept, zentrale Herausforderungen des 21. Jahrhunderts wie den Klimawandel zu verstehen und einen informierten Standpunkt dazu zu entwickeln. Die Bedeutung des Energiekonzeptes steht im Widerspruch zu den Schwierigkeiten, die Schüler\*innen mit dem Verständnis des Energiekonzeptes haben. Studien zeigen, dass Schüler\*innen selbst am Ende der Sekundarstufe I häufig nicht über ein ausreichendes Verständnis des Energiekonzeptes verfügen; insbesondere die Erhaltung der Energie scheint Schüler\*innen Probleme zu bereiten (Neumann et al., 2013). In der Literatur werden als mögliche Ursache Schwierigkeiten mit der potentiellen Energie angeführt (Lindsey et al., 2012). Neben der kinetischen Energie ist die potentielle Energie zentral für die Entwicklung des Verständnisses des Energiekonzeptes. Dies liegt darin begründet, dass sich die meisten Phänomene über die Umwandlung zwischen kinetischer und potentieller Energie beschreiben lassen. Ohne die potentielle Energie kann das Energiekonzept nicht sinnvoll zur Erklärung von Phänomenen genutzt werden. In diesem Beitrag wird ein Unterrichtsansatz vorgestellt, der darauf zielt, die Schwierigkeiten mit der potentiellen Energie zu beheben.

### **1. Verständnisschwierigkeiten mit der potentiellen Energie**

In der fachdidaktischen Literatur sind die Schwierigkeiten der Lernenden mit der potentiellen Energie gut dokumentiert: Die Schüler\*innen haben Schwierigkeiten mit der schlechten Beobachtbarkeit der potentiellen Energie. Während die Schüler\*innen kinetische Energie leicht daran erkennen können, dass sich ein Objekt bewegt, sieht man einem angehobenen Ball die Energie jedoch nicht an. Die potentielle Energie erscheint den Schüler\*innen versteckt. Am höchsten Punkt eines Pendels scheint die Energie für Schüler\*innen sogar ganz verschwunden, weil sich nichts mehr bewegt. Sie zeigt sich erst, wenn sie in kinetische Energie umgewandelt wird. Potentielle Energie erscheint den Schüler\*innen wegen ihrer schlechten Beobachtbarkeit wenig real (Hecht, 2003).

Nicht nur die schlechte Beobachtbarkeit der potentiellen Energie ist schwierig für Schüler\*innen, sondern auch ihre Lokalisierung. Die Lernenden schreiben Energie Objekten zu, die in der Lage sind, etwas zu tun; z.B. Magneten, die Objekte aus Eisen anziehen können. Aus dieser Zuschreibung der potentiellen Energie zu Objekten resultieren insbesondere zwei Schwierigkeiten: (1) Die Lernenden sehen die potentielle Energie häufig fälschlicherweise als in einem Objekt gespeichert an. (2) Deswegen haben sie Schwierigkeiten mit der Wahl des für die potentielle Energie besonders wichtigen richtigen Bezugspunktes. Für eine korrekte Quantifizierung der potentiellen Energie ist es notwendig, mindestens zwei Objekte und ihre Konfiguration zu betrachten. Es macht für die Quantifizierung der potentiellen Energie einen Unterschied, ob ich z.B. einen Ball aus dem zweiten Stock eines Hauses auf den Erdboden

fallen lasse, oder ob ich den Ball aus der gleichen Höhe auf den Fußboden des zweiten Stocks fallen lasse. Der Bezugspunkt ändert sich vom Erdboden zum Fußboden im zweiten Stock.

## **2. Potentielle Energie mithilfe von Feldern greifbar machen**

Eine Möglichkeit, diesen Problemen zu begegnen, ist die Integration von Feldern in den Energieunterricht. Mit Feldern kann die potentielle Energie als in Feldern zwischen interagierenden Objekten gespeicherte Energie konzeptualisiert werden. Felder helfen dabei, potentielle Energie für die Lernenden greifbarer zu machen, denn sie ist nicht länger versteckt, sondern in einem Feld gespeichert (Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). Wird beispielsweise ein Ball angehoben, wird Energie in Form von potentieller Energie im Gravitationsfeld zwischen Ball und Erde gespeichert. Das Stoppen eines Pendels am höchsten Punkt lässt sich mit Feldern folgendermaßen erklären: Auf dem Weg nach oben wird die kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt. Diese wird im Gravitationsfeld gespeichert. Bewegt sich das Pendel wieder nach unten, wird die potentielle Energie aus dem Gravitationsfeld genommen und in kinetische Energie umgewandelt. Felder können die Schüler\*innen damit dabei unterstützen, potentielle Energie adäquat zu lokalisieren, denn Felder geben der potentiellen Energie ein Zuhause.

Felder im Physikunterricht der Sekundarstufe I einzuführen, mag auf den ersten Blick gewagt erscheinen. Die Schwierigkeiten, die Schüler\*innen mit Feldern haben, sind gut belegt. Die Lernenden verwechseln Kraft und Feldstärke und halten Feldlinien für real (Guisasola et al., 2004; Pocoví, 2007). Felder werden in der Mittelstufe mit dem Magnetfeld eingeführt. Sie bleiben dort jedoch häufig nutzlos, da sie eher als Phänomen betrachtet werden, anstatt dass sie zur Erklärung von Phänomenen herangezogen werden. Formal-mathematisch werden Felder in der Oberstufe als Verteilung einer physikalischen Größe im Raum, d.h. als Vektorfeld eingeführt. Diese Einführung des Feldes als mathematisches Konstrukt könnte ein Grund für die Schwierigkeiten der Schüler\*innen mit Feldern sein (Greca & Moreira, 1997).

Um Felder für den Aufbau des Energieverständnisses nutzbar zu machen, wird diese formale Einführung als mathematisches Konstrukt jedoch nicht benötigt. Es genügen zwei einfache Prinzipien, die für alle Formen der potentiellen Energie gelten:

- (1) Felder vermitteln Wechselwirkungen zwischen interagierenden Objekten, die sich nicht berühren.
- (2) Felder speichern potentielle Energie. Die Menge an gespeicherter potentieller Energie hängt von der Konfiguration der Objekte ab.

Eine Formulierung in für Schüler\*innen angemessener Sprache zeigt Abbildung 4.1.

### Zentrale Ideen des Unterrichtsansatzes mit Feldern

Energie ist entweder in einem Objekt oder einem Feld gespeichert:

- Bewegungsenergie ist in einem Objekt gespeichert.
- Potentielle Energieformen sind in einem Feld zwischen zwei Objekten gespeichert.

Felder vermitteln zwischen interagierenden Objekten:

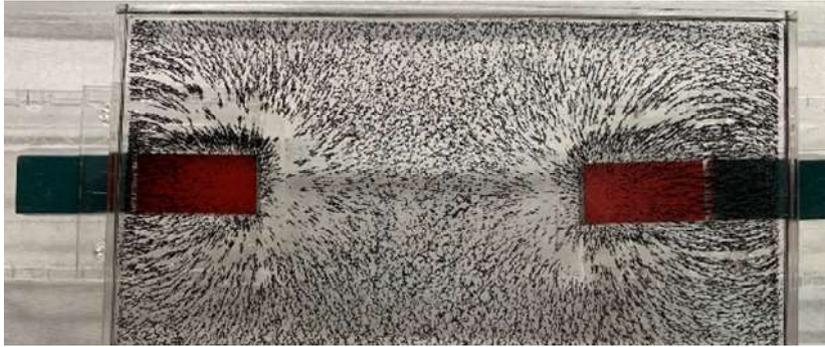
- Sie speichern Potentielle Energie.
- Die Menge an gespeicherter Energie hängt vom Abstand der Objekte ab.

**Abbildung 4.1:** Zentrale Ideen des Unterrichtsansatzes zur Energie mit Feldern in Schüler\*innen- gerechter Sprache

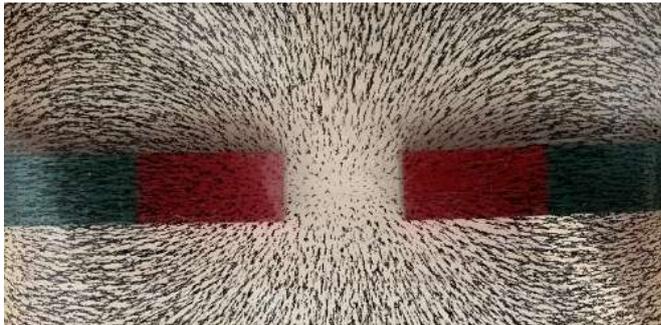
Aufbauend auf diese beiden Prinzipien wurde eine Unterrichtseinheit für den Anfangsunterricht zur Energie entwickelt, der Felder bei den potentiellen Energieformen integriert. Energie wird in der Einheit nicht explizit definiert, sondern über seine Eigenschaften eingeführt: Energie ist entweder in einem Objekt oder in einem Feld gespeichert (vgl. Abbildung 4.1). Implizit wird Energie als Fähigkeit, etwas bewirken zu können, konzeptualisiert. Bevor der Unterrichtsgang der erprobten Unterrichtseinheit in Gänze dargestellt wird, sollen zunächst zwei zentrale Phänomene der Unterrichtseinheit beschrieben werden. Diese Phänomene werden genutzt, um die Speicherung der potentiellen Energie in Feldern für Schüler\*innen sichtbar und fühlbar und damit potentielle Energie greifbar zu machen. Die Phänomene sollen die Schüler\*innen dabei unterstützen, die potentiellen Energieformen als ebenso real anzusehen wie kinetische Energie. Die beiden Phänomene stützen sich dabei exemplarisch auf das Magnetfeld. Das Magnetfeld wurde deswegen ausgewählt, da es Schüler\*innen häufig bereits aus der Grundschule oder dem Alltag bekannt ist und für Schüler\*innen besonders anschaulich ist.

#### 2.1 Die Wirkung der potentiellen Energie sichtbar machen

Nähert man zwei Magnete einander an oder entfernt man sie voneinander, ändert sich die im Magnetfeld gespeicherte Energie. Mit der gespeicherten Energie ändert sich auch das Feldlinienbild. Diese Änderung kann mithilfe von Eisenfeilspänen oder einem Ferrofluid sichtbar gemacht werden. In Abbildung 4.2a/b ist dargestellt, wie die Änderung des Feldlinienbildes mithilfe von Eisenspänen sichtbar gemacht werden kann. Sie zeigt einen mit einer zähflüssigen Flüssigkeit gefüllten Quader, in der Eisenfeilspäne schwimmen. Unter die Magnetfeldplatte sind Stabmagnete gelegt worden. Die Eisenfeilspäne haben sich im Magnetfeld ausgerichtet. In Abbildung 4.2a sind die beiden Magnete weit voneinander entfernt. In Abbildung 4.2b wurden die Magnete näher aneinandergeschoben. Das Feldlinienbild hat sich geändert. Die Änderung der potentiellen Energie kann mithilfe dieses Phänomens für die Schüler\*innen sichtbar gemacht werden.



**Abbildung 4.2a:** Zwei Magnete unter einer Magnetfeldplatte, die weit voneinander entfernt sind



**Abbildung 4.2b:** Zwei Magnete unter einer Magnetfeldplatte, die nah beieinander sind

Alternativ oder auch ergänzend kann auch ein Ferrofluid genutzt werden, um eine Änderung der potentiellen Energie sichtbar zu machen. Abbildung 4.3a/b zeigt eine Ferrofluidflasche. Sie besteht aus einem Quader, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, in der Nano-Eisenpartikel schwimmen. Die Ferrofluidflasche wird über einen Scheibenmagneten gehalten. Ein zweiter Scheibenmagnet wird über die Ferrofluidflasche gehalten. Die Eisenpartikel haben sich im Magnetfeld ausgerichtet. In Abbildung 3a sind die beiden Scheibenmagnete weit voneinander entfernt. Der obere Scheibenmagnet ist im Bild nicht zu sehen. In Abbildung 4.3b wurde der obere Scheibenmagnet dem unteren genähert. Das Ferrofluid ist im Vergleich zu Abbildung 4.3a gestaucht und breitet sich zu den Seiten aus. Das Feldlinienbild hat sich verändert.



**Abbildung 4.3a:** Ein Magnet unter einer Ferrofluidflasche und ein Magnet darüber mit großem Abstand (nicht sichtbar im Bild)



**Abbildung 4.3b:** Ein Magnet unter einer Ferrofluidflasche und ein Magnet darüber mit geringem Abstand

## 2.2 Die Wirkung der potentiellen Energie fühlbar machen

Die Speicherung der potentiellen Energie kann nicht nur sichtbar gemacht werden, sondern auch fühlbar. Die Aktivierung eines weiteren Sinnes kann dazu beitragen, dass potentielle Energie für Schüler\*innen noch greifbarer und somit real wird. In Abbildung 4.4 sind Ringmagnete auf einer Führung so zueinander ausgerichtet, dass sie sich abstoßen. Drückt man den oberen Magneten näher an den unteren, spürt man einen Widerstand. Die Wirkung der Änderung der potentiellen Energie im Feld zwischen den Magneten kann für die Schüler\*innen fühlbar gemacht werden.



**Abbildung 4.4:** Ringmagnete auf einer Führung

Im Folgenden soll die erprobte Unterrichtseinheit zur Einführung des Energiekonzeptes im Anfängerunterricht vorgestellt werden, die Felder bei den potentiellen Energieformen integriert.

## 3. Eine Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern

Die Unterrichtseinheit zielt darauf ab, die Schwierigkeiten der Schüler\*innen mit der potentiellen Energie mithilfe der Integration von Feldern bei diesen Energieformen zu adressieren. Die Unterrichtseinheit erstreckt sich über 8 Unterrichtsstunden und beinhaltet die Aspekte Energieformen (Bewegungsenergie, Magnetische Energie, Lageenergie) und Energieumwandlung. Sie ist geeignet für den Anfangsunterricht zur Energie ab der 7. Klasse. Mit Blick auf die Eignung der Einheit für den Anfangsunterricht werden anstelle der abstrakten Begriffe der kinetischen Energie und der potentiellen Energie der Begriff Bewegungsenergie und für die beiden Vertreter der potentiellen Energie die Begriffe magnetische Energie und Lageenergie verwendet. Eine Übersicht über die Inhalte der Unterrichtseinheit zeigt Tabelle 4.1.

Unterrichtsstunde	Inhaltlicher Schwerpunkt
1 + 2	Herleitung der Leitfrage „Was versetzt ein Objekt in Bewegung und wovon hängt es ab, wie schnell ein Objekt werden, oder wie hoch ein Objekt kommen kann?“ Einführung des Energiebegriffs Einführung der Bewegungsenergie sowie deren Abhängigkeit von der Masse und der Geschwindigkeit eines Objektes
3 - 5	Einführung des Feldes am Beispiel des Magnetfeldes Einführung der magnetischen Energie sowie deren Abhängigkeit vom Abstand der Magnete und der Stärke der Magneten Einführung der Energieumwandlung am Beispiel der magnetischen Energie und der Bewegungsenergie
6 + 7	Einführung der Lageenergie sowie deren Abhängigkeit vom Abstand zweier Objekte und der Masse des Objektes sowie Einführung des Gravitationsfeldes Vergleich des Magnetfeldes und des Gravitationsfeldes
8	Beantwortung der Leitfrage

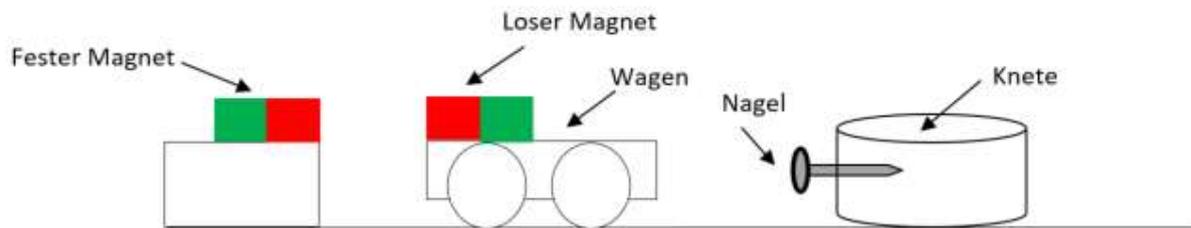
**Tabelle 4.1:** Übersicht über die Lerninhalte der Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern

Die übergeordnete Idee der Unterrichtseinheit lautet: *Energie ist entweder in einem Objekt oder in einem Feld gespeichert* (siehe Abbildung 4.1). Im Folgenden wird der Unterrichtsgang in Gänze vorgestellt. Es wird dabei auf die Beschreibung der Unterrichtsstunden 3-7 fokussiert. Diese beinhalten die Einführung des Feldes im Zusammenhang mit den Energieformen der magnetischen Energie und der Lageenergie. Die Unterrichtsmaterialien der gesamten Unterrichtseinheit können bei den Autoren angefordert werden.

### **3.1 Einführung der magnetischen Energie und des Magnetfeldes als Speicherort der magnetischen Energie**

In den ersten beiden Unterrichtsstunden wird die Leitfrage der Unterrichtseinheit entwickelt und die Bewegungsenergie als Energie bewegter Objekte eingeführt. Die Schüler\*innen untersuchen im Schüler\*innenexperiment halb-quantitativ die Abhängigkeit der Bewegungsenergie von der Masse und von der Geschwindigkeit. In der dritten bis fünften Unterrichtsstunde der Unterrichtseinheit wird das Phänomen eines im Magnetfeld beschleunigten Magnetwagens betrachtet. Ein Magnet ist auf einem festen Block befestigt. Ein weiterer Magnet befindet sich auf einem Rollwagen. Die Magnete sind so zueinander ausgerichtet, dass sie sich abstoßen. Zu Beginn der dritten Unterrichtsstunde wird der Magnet auf dem Rollwagen dem festen Magneten genähert und dann losgelassen, so dass er beschleunigt.

Die Schüler\*innen werden bei der Entwicklung einer Erklärung des Phänomens durch drei Fragen angeleitet: (a) ob zu Beginn und ob nach dem Loslassen Bewegungsenergie vorhanden ist, (b) wo die Energie herkommt bzw. wo sie vor dem Loslassen gespeichert ist und (c) woran



**Abbildung 4.5:** Versuchsaufbau zur magnetischen Energie mit sich abstoßenden Magneten

man dies jeweils erkennt. Die Schüler\*innen sollen erläutern, dass nur nach dem Loslassen Bewegungsenergie vorhanden ist, da der Wagen sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt. Bei der Frage, woher die Energie kommt, sind verschiedene Antworten der Lernenden denkbar. Eine (physikalisch falsche) Antwortmöglichkeit könnte sein, dass die Energie nur in einem der beiden Magnete gespeichert ist. Um dieser (falschen) Vorstellung zu begegnen, sollte den Lernenden aufgezeigt werden, dass ein einzelner Magnet, egal welcher, nicht ausreicht, damit sich der Wagen wegbewegt. Nur wenn beide Magnete vorhanden sind, bewegt sich der Wagen weg. Von magnetischer Energie zu sprechen macht folglich nur Sinn, wenn zwei Magnete interagieren. Um die Notwendigkeit der Betrachtung zweier magnetischer (oder magnetisierbarer) Objekte zu verdeutlichen, können weitere Phänomene wie z.B. sich abstoßende Ringmagnete auf einer Führung oder die Anziehung eisenhaltiger Objekte herangezogen werden. Zur Einführung des Magnetfeldes als Speicherort der magnetischen Energie wird die Aufmerksamkeit der Schüler\*innen auf die vermittelnde Wirkung des Magnetfeldes gelenkt. Fragen wie z.B. „die Magnete interagieren, obwohl sie sich gar nicht berühren. Wie ist das möglich?“ können in dieser Phase als Impulse dienen. Es muss etwas zwischen den Magneten geben, das zwischen ihnen vermittelt. Dort muss auch die Energie gespeichert sein. Aus ihrer Alltagserfahrung oder aus vorangegangenen Unterricht ist den Lernenden das Magnetfeld meistens schon bekannt, so dass sie es an dieser Stelle als Vermittler und Speicherort der Energie auch nennen. Sollte das nicht der Fall sein, kann das, was zwischen den Magneten ist, also das Magnetfeld, durch seine Wirkung auf Eisenfeilspäne sichtbar gemacht werden. Es schließen sich die in den Abbildungen 4.2a/b und 4.3a/b dargestellten und in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschriebenen Phänomene an, die darauf abzielen, potentielle Energie für Schüler\*innen greifbar zu machen.

Nach dieser Einführung des Magnetfeldes als Speicherort der magnetischen Energie im Unterrichtsgespräch soll das Phänomen des im Magnetfeld beschleunigten Magnetwagens experimentell untersucht werden. Die Lernenden untersuchen im Schüler\*innenexperiment die Abhängigkeit der magnetischen Energie von der Stärke der Magneten und vom Abstand der Magneten. Sie nutzen den in Abbildung 4.5 dargestellten Versuchsaufbau mit befestigtem Magneten auf einem Block und losem Magneten auf einem Rollwagen. Die Lernenden

variieren zum einen den Abstand des losen Magneten auf dem Rollwagen vom festen Magneten auf dem Block und zum anderen die Stärke der Magneten. Dafür werden die beiden Magnete im zweiten Versuchsdurchgang durch stärkere ausgetauscht. Der Wagen rollt nach dem Loslassen gegen einen Nagel und versenkt diesen in Knete. Die Eindringtiefe wird als Maß für die Menge an (magnetischer) Energie herangezogen. In der sich anschließenden vierten Unterrichtsstunde wird die Energieumwandlung von magnetischer Energie in Bewegungsenergie anhand von Momentaufnahmen des Experiments der Stunde mit festem Magneten auf einem Block und losem Magneten auf einem Rollwagen eingeführt. Dabei wird ein Schwerpunkt darauf gelegt, dass die Lernenden erkennen, dass, wenn die Energie in einer Form abnimmt, sie in einer anderen Form zunimmt. Bei dem Phänomen des im Magnetfeld beschleunigten Magnetwagens nimmt die Menge an magnetischer Energie ab und gleichzeitig die Menge an Bewegungsenergie zu. Das Phänomen des im Magnetfeld beschleunigten Magnetwagens lässt sich dann folgendermaßen erklären: Beim Nähern der Magnete wird magnetische Energie im Magnetfeld gespeichert. Beim Loslassen wird die magnetische Energie aus dem Magnetfeld in Bewegungsenergie umgewandelt. Da Magnete nicht nur eine anziehende, sondern auch eine abstoßende Wirkung haben, wird in der fünften Unterrichtsstunde der Versuchsaufbau aus Abbildung 5 mit festen Magneten auf einem Block und losem Magneten auf einem Rollwagen so aufgebaut, dass sich die Magnete anziehen. Die Schüler\*innen untersuchen im Schüler\*innenexperiment die Abhängigkeit der magnetischen Energie vom Abstand der Magnete, wenn diese sich anziehen. Am Ende der Unterrichtsstunden drei bis fünf zur magnetischen Energie sollen die Schüler\*innen gelernt haben, dass (1) das Magnetfeld zwischen Magneten vermittelt, (2) das Magnetfeld magnetische Energie speichert und die Menge an gespeicherter magnetischer Energie vom Abstand der Magnete und der Stärke der Magnete abhängt. Diese beiden Prinzipien, die Felder mit potentieller Energie am Beispiel der magnetischen Energie verknüpfen, werden bei der Einführung des Gravitationsfeldes als Speicherort der Lageenergie wieder aufgegriffen und auf die Lageenergie übertragen.

### **3.2 Einführung der Lageenergie und des Gravitationsfeldes als Speicherort der Lageenergie**

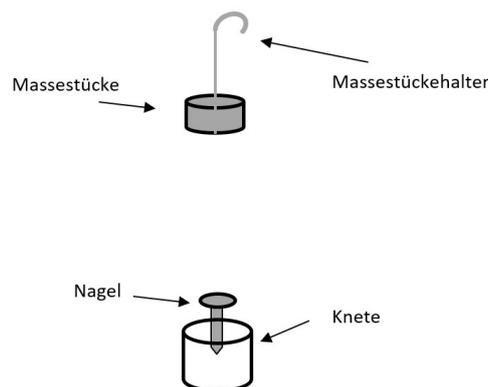
Zur Bestimmung der Lageenergie in einem Phänomen müssen immer zwei Objekte und deren Abstand betrachtet werden. Die Lageenergie ist für die Schüler\*innen ein besonders herausfordernder Vertreter der potentiellen Energieformen. Schüler\*innen übersehen leicht, dass ein zweites Objekt betrachtet werden muss. Dies könnte daran liegen, dass sie das Fallen von Objekten auf der Erde als zu selbstverständlich, zu alltäglich ansehen. Bei einem fallenden Ball zum Beispiel sehen die Lernenden häufig nicht die Notwendigkeit, ein zweites Objekt in die Erklärung miteinzubeziehen. Sie fokussieren bei der Erklärung des Phänomens auf den Ball allein. Darüber hinaus fällt es den Lernenden schwer, die Referenzhöhe für den Abstand zu identifizieren. Wird beispielsweise ein Ball aus dem zweiten Stock eines Hauses fallen gelassen, dann ist die Referenzhöhe der Erdboden. Wird der Ball im zweiten Stock des Hauses

jedoch auf den Fußboden im zweiten Stock fallengelassen, so ist die Referenzhöhe der Fußboden im zweiten Stock.

Um die Notwendigkeit der Betrachtung eines zweiten Objektes auch bei der Lageenergie zu verdeutlichen, wird in der Unterrichtseinheit die Analogie zwischen Lageenergie und magnetischer Energie genutzt. Bei der magnetischen Energie entspricht es der Intuition der Lernenden, dass zur Bestimmung der Menge an magnetischer Energie zwei Magnete und deren Abstand betrachtet werden müssen. Zu Beginn der sechsten Stunde werden deswegen zunächst grundlegende Ideen der magnetischen Energie und des Magnetfeldes als Speicherort der magnetischen Energie reaktiviert. Es wird ein Video abgespielt, das einen Magnetwagen zeigt, der gebremst wird, kurz stehenbleibt und dann wieder in die andere Richtung beschleunigt wird. Die Schüler\*innen werden gefragt, ob in dem Video etwas nicht gezeigt wird, das für die Erklärung des Bewegungsablaufes des Magnetwagens wichtig ist. Die Lernenden geben an, dass der zweite Magnet fehlt, um den Bewegungsablauf zu erklären. Ein zweites Video zeigt den gesamten Versuchsaufbau mit dem Magnetwagen und einem festen Magneten. Es schließt sich zur Vorbereitung der Analogiebetrachtung für die Lageenergie eine Wiederholung der wesentlichen Aspekte der magnetischen Energie und des Magnetfeldes an. Die Schüler\*innen können z.B. durch folgende Impulse bei der Reaktivierung ihres Vorwissens angeleitet werden: Erkläre, warum der zweite Magnet wichtig ist, um die Bewegung des Magnetwagens zu erklären (mögliche Antwort: Nur wenn zwei Magnete interagieren, kann man von magnetischer Energie sprechen); Erkläre, wohin die Bewegungsenergie geht, wenn der Wagen langsamer wird bzw. woher sie kommt, wenn der Wagen schneller wird (mögliche Antwort: Die Bewegungsenergie wandelt sich in magnetische Energie um, die im Magnetfeld gespeichert wird. Wenn der Wagen wieder schneller wird, wird die magnetische Energie wieder aus dem Magnetfeld genommen, um sich in Bewegungsenergie umzuwandeln).

Im nächsten Schritt soll die Lageenergie eingeführt werden und das Gravitationsfeld als Speicherort der Lageenergie motiviert werden. Dafür wird ein Video gezeigt, das einen ähnlichen Bewegungsablauf zeigt wie das Video mit dem Magnetwagen. In diesem Video wird eine Kugel gezeigt, die wie der Magnetwagen zunächst gebremst wird, kurz stehen bleibt und dann wieder in die andere Richtung beschleunigt wird. Es handelt sich dabei um eine nach oben geworfene Kugel. Dieses bleibt den Schüler\*innen jedoch zunächst verborgen, da das Video um 90° gedreht ist, so dass sich die Kugel zur Seite und nicht nach oben bewegt. Wie beim Magnetwagen werden die Schüler\*innen gefragt, ob das Video etwas nicht zeigt, das für die Erklärung des Bewegungsablaufes wichtig ist, bzw. ob an dem Video etwas merkwürdig ist. Die Schüler\*innen erkennen schnell, dass das Video gedreht ist, und aufgrund des zur magnetischen Energie analogen Bewegungsablaufes und des analogen Impulses zur Identifikation des zweiten Objektes gelingt es ihnen, die Erde als fehlendes Objekt zu identifizieren. Zur Auflösung wird ein weiteres Video gezeigt, das den Ball in senkrechter Bewegungsrichtung und mit Erdboden zeigt. Zur Einführung der Lageenergie und des Gravitationsfeldes als Speicherort der Lageenergie können folgende Fragen bzw. Impulse

verwendet werden: Erkläre, wie die Kugel und die Erde miteinander interagieren, ohne dass sie sich dabei berühren (mögliche Antwort: Da muss ein Feld zwischen Kugel und Erde sein, das zwischen den beiden vermittelt). Erkläre, wohin die Bewegungsenergie geht, wenn die Kugel langsamer wird bzw. woher sie kommt, wenn die Kugel schneller wird (mögliche Antwort: Die Energie wird in einem Feld gespeichert, wenn die Kugel langsamer wird, und sie wird aus diesem Feld entnommen, wenn die Kugel schneller wird). Nun kann die Lehrkraft die Lageenergie und das Gravitationsfeld folgendermaßen einführen: Die Energie ist im so genannten Gravitationsfeld zwischen Erde und Kugel gespeichert. Physiker\*innen sprechen von Lageenergie. Anschließend soll das Phänomen eines fallenden Objektes im Gravitationsfeld der Erde betrachtet werden. Dafür nutzen die Schüler\*innen den in Abbildung 6 dargestellten Versuchsaufbau. In Abbildung 4.6 sind Massestücke zu sehen, die fallen gelassen werden. Sie fallen auf einen Nagel, der zum Teil in Knete versenkt ist. Die Schüler\*innen untersuchen mit diesem Versuchsaufbau experimentell die Abhängigkeit der Lageenergie von der Masse des angehobenen Objektes und dem Abstand des Objektes von seiner Referenzhöhe.



**Abbildung 4.6:** Versuchsaufbau zur Lageenergie

Sie variieren das fallende Objekt bezüglich seiner Masse durch Erhöhung der Anzahl der Massestücke und den Abstand zwischen Massestücken und Messapparatur. Die Eindringtiefe des Nagels in die Knete dient als Maß für die Menge an Lageenergie. Das Phänomen eines fallenden Objektes im Gravitationsfeld der Erde lässt sich folgendermaßen erklären: Beim Anheben des Objektes wird Lageenergie im Gravitationsfeld gespeichert. Beim Loslassen des Objektes wird die Lageenergie aus dem Gravitationsfeld genommen und in Bewegungsenergie umgewandelt.

Am Ende der sechsten Unterrichtsstunde zur Lageenergie sollen die Schüler\*innen gelernt haben, dass (1) das Gravitationsfeld zwischen Objekten und der Erde vermittelt, (2) das Gravitationsfeld Lageenergie speichert und die Menge an gespeicherter Lageenergie vom Abstand des Objektes vom zweiten Objekt und von der Masse des angehobenen Objektes abhängt. Diese beiden Prinzipien, die Felder mit potentieller Energie am Beispiel der

Lageenergie verknüpfen, sollen im nächsten Unterrichtsschritt in der siebten Unterrichtsstunde verallgemeinert werden. Durch einen Vergleich der Phänomene zur magnetischen Energie und zur Lageenergie und einen Vergleich der zugehörigen Felder soll den Schüler\*innen verdeutlicht werden, dass magnetische Energie und Lageenergie Vertreter ein und derselben Energieform sind, nämlich potentieller Energie. Es soll den Lernenden bewusst gemacht werden, dass sie alle Formen der potentiellen Energie durch zwei grundlegende Prinzipien verstehen können:

- (1) Felder vermitteln zwischen interagierenden Objekten, die sich nicht berühren.
- (2) Felder speichern potentielle Energie. Die Menge an gespeicherter potentieller Energie hängt vom Abstand der Objekte ab.

Die achte Unterrichtsstunde rundet die Einheit mit der Beantwortung der Leitfrage der Unterrichtseinheit durch die Schüler\*innen ab. Die Beantwortung verlangt von den Lernenden eine Reaktivierung und Verknüpfung aller während der Einheit erlernten zentralen Ideen und Aspekte des Energiekonzeptes.

### **3.3 Evaluierung der Unterrichtseinheit in einer Vergleichsstudie mit dem traditionellen Unterricht**

Die Evaluierung der Unterrichtseinheit deutet darauf hin, dass die Integration von Feldern die Schüler\*innen dabei unterstützen kann, Energie besser zu verstehen (Fiedler et al., 2022). Dabei ist es besonders wichtig, die Verknüpfung der potentiellen Energie mit Feldern den Schüler\*innen wiederholt begreiflich zu machen. Die Einführung der potentiellen Energie mit Feldern bringt den Vorteil mit sich, dass die bei der Einführung der potentiellen Energie mit Feldern etablierten Prinzipien für alle Formen der potentiellen Energie anwendbar sind. Dies erleichtert den Schüler\*innen das Erlernen von ihnen bis dahin unbekanntem Vertretern der potentiellen Energie. Haben sie die grundlegenden Prinzipien der potentiellen Energie (D.h., sie ist in einem Feld gespeichert und die Menge an gespeicherter Energie hängt vom Abstand der Objekte ab.) verstanden, wird ihnen auch das fortgeführte Lernen über Energie erleichtert.

### **Danksagung**

Der hier vorgestellte Unterrichtsansatz wurde im Rahmen des Forschungsprojektes FiELdS entwickelt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (Projektnummer: 458465679) gefördert wird.

## **GESAMTDISKUSSION UND IMPLIKATIONEN**

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung des Einflusses der Einbeziehung von Feldern in den Anfangsunterricht zur Energie. Im Fokus standen dabei zum einen das Lernen der Schülerinnen und Schüler in einer einführenden Einheit zur Energie und zum anderen ihr Lernen in einer Einheit zum fortgeführten Lernen über Energie. Um die Lernwirksamkeit unter Einbeziehung von Feldern zu untersuchen, wurde das Energielernen von zwei Schülergruppen, der Felder- und der Nicht-Felder-Gruppe, miteinander verglichen: Der Unterricht der Felder-Gruppe bezog Felder bei den potentiellen Energieformen mit ein, der Unterricht der Nicht-Felder-Gruppe folgte einem traditionellen Unterrichtsgang ohne Felder.

### **Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse**

Studie 1 (dokumentiert in Publikation 1) untersuchte den Einfluss der Einbeziehung von Feldern in einer einführenden Einheit zur Energie im Schuljahr 2018/2019 mit Schülerinnen und Schülern der 6. Klasse. Es zeigte sich zunächst, dass die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe unter Kontrolle ihrer kognitiven Fähigkeiten und ihres Vorwissens über Energie wider Erwarten ein geringeres Energieverständnis besaßen als die Schülerinnen und Schüler der Nicht-Felder-Gruppe. In weiterführenden Analysen ergab sich jedoch, dass wiederum unter Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten und des Vorwissens über Energie das Felderverständnis einen positiven Einfluss auf das Energieverständnis am Ende der Einheit hatte. Die Ergebnisse der Studie 1 legen nahe, dass die Einbeziehung von Feldern nur dann dazu beitragen kann, dass Schülerinnen und Schüler Energie besser verstehen, wenn sie Felder verstehen.

Studie 2 (dokumentiert in Publikation 2) untersuchte den Einfluss der Einbeziehung von Feldern in einer Einheit zum fortgeführten Lernen über Energie mit denselben Schülerinnen und Schülern, die bereits im Rahmen der Studie 1 eine einführende Einheit zur Energie mit oder ohne Felder erhalten haben. Die Einheit zum fortgeführten Lernen fand ca. drei Monate nach der einführenden Einheit im Schuljahr 2018/2019 statt und war im Kontext der Elektrizitätslehre situiert. Das Energieverständnis am Ende der Einheit fiel für die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe unter Kontrolle ihrer kognitiven Fähigkeiten und ihres Vorwissens über Energie höher aus als das der Schülerinnen und Schüler der Nicht-Felder-Gruppe. Die Ergebnisse der Studie 2 lassen den Schluss zu, dass die Einbeziehung von Feldern in den Energieunterricht das fortgeführte Lernen über Energie fördern kann.

Studie 3 (dokumentiert in Publikation 3) untersuchte als Replikationsstudie den Einfluss der Einbeziehung von Feldern auf die Entwicklung des Energieverständnisses in einer einführenden und einer fortgeführten Einheit zur Energie im Schuljahr 2020/2021 mit Schülerinnen und Schülern der 7. Klasse. Im Fokus stand dabei herauszufinden, wie Schülerinnen und Schüler Energie und Felder miteinander verbinden, wenn sie Phänomene

erklären. Sowohl in der einführenden Einheit als auch in der Einheit zum fortgeführten Lernen zeigten die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe unter Kontrolle der kognitiven Fähigkeiten und des Vorwissens ein höheres Energieverständnis als die Schülerinnen und Schüler der Nicht-Felder-Gruppe. Gestützt werden diese Ergebnisse durch die Analyse der Wissensnetzwerke der Schülerinnen und Schüler. Die Wissensnetzwerke der Felder-Gruppe weisen mehr relevante Ideen auf, die auch stärker miteinander verknüpft sind als die Wissensnetzwerke der Nicht-Felder-Gruppe. Die Ergebnisse lassen annehmen, dass die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe ein stärker konzeptionelles Verständnis von Energie entwickeln konnten.

Entscheidend für den Aufbau eines konzeptionellen Verständnisses von Energie ist das Verständnis der Energieformen. Um das Verständnis der potentiellen Energie zu fördern, wird in der Literatur vorgeschlagen, Felder in den Energieunterricht einzubeziehen (NRC, 2012; Quinn, 2014; Swackhamer, 2005). Diese Empfehlung beruht auch darauf, dass eine Lokalisierung der potentiellen Energie diese zwingend mit Systemen verknüpft. Die Betrachtung von Systemen ist entscheidend für die Entwicklung eines tiefgehenden Verständnisses der potentiellen Energie (Lindsey et al., 2012; Scherr et al., 2012). Nur wenn Schülerinnen und Schüler alle Systemkomponenten und deren Konfiguration betrachten, wird potentielle Energie für die Erklärung von Phänomenen nützlich. Der in Studie 1 festgestellte Einfluss des Felderverständnisses auf die Entwicklung des Energieverständnisses und das in Studie 3 gefundene höhere Energieverständnis der Felder-Gruppe nach der einführenden Einheit lassen vermuten, dass Felder eine entscheidende Rolle dabei einnehmen, dass Schülerinnen und Schüler ein tiefergehendes Verständnis der potentiellen Energie entwickeln. Das Verständnis physikalischer Konzepte drückt sich in einem vernetzten, um zentrale Aspekte des Konzeptes organisierten Wissen aus (Bransford et al., 2000; Lee & Liu, 2010; Linn, 2006). Die Ergebnisse der drei in dieser Arbeit vorgestellten Studien deuten darauf hin, dass dies durch die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie gelingen kann. Felder reduzieren die große Anzahl an vermeintlich unterschiedlichen Energieformen auf wenige zentrale Aspekte, so dass sie alle unter dem Konzept der potentiellen Energie zusammengefasst werden können. Felder bieten eine kohärente Beschreibung der potentiellen Energie anhand von zwei zentralen Aspekten, den folgenden zugrunde liegenden Prinzipien: Felder vermitteln Interaktion auf Distanz, und Felder speichern potentielle Energie, deren Menge von der Konfiguration der Systemkomponenten abhängt. Die Wissensnetzwerke der Schülerinnen und Schüler in Studie 3 zeigen starke Verknüpfungen zwischen den zugrunde liegenden Prinzipien und den beiden in der einführenden Einheit eingeführten potentiellen Energieformen der magnetischen Energie und der Lageenergie. Wir können deswegen annehmen, dass der Aufbau eines konzeptionellen Verständnisses gelungen ist.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum fortgeführten Lernen in Studie 2 und in Studie 3 deuten darauf hin, dass dieses konzeptionelle Verständnis insbesondere auch das fortgeführte

Lernen fördern kann. Fortgeführtes Lernen ist erfolgreicher, wenn eine geringe Anzahl zentraler Aspekte in verschiedenen Kontexten angewendet werden kann (Bransford & Schwartz, 1999; diSessa & Wagner, 2005). Die Schülerinnen und Schüler in den Studien waren in der Lage, die zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie sowohl in der einführenden Einheit bei der magnetischen Energie und der Lageenergie als auch in der Einheit zum fortgeführten Lernen bei der elektrischen Energie zu erkennen. In beiden Jahren der Testungen zum fortgeführten Lernen (2019 und 2021) haben die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe ein höheres Energieverständnis als die Schülerinnen und Schüler der Nicht-Felder-Gruppe entwickelt. Das höhere Energieverständnis der Felder-Gruppe lässt darauf schließen, dass die Formulierung der zugrunde liegenden Prinzipien über Felder ihnen dabei geholfen hat, das neue Wissen über elektrische Energie in ihre Wissensbasis zur potentiellen Energie zu integrieren. Das Erlernen der neuen Energieform, anhand derer das fortgeführte Lernen untersucht wurde, wurde erleichtert. Die Einbeziehung von Feldern gleich im Anfangsunterricht zum Energiekonzept hat folglich einen kumulativen Aufbau von Kompetenz im Bereich der potentiellen Energie bewirkt. Kompetenzentwicklung erfordert Kohärenz zwischen den Unterrichtsstunden und zwischen Unterrichtseinheiten (Neumann & Nordine, 2022). Die zugrunde liegenden Prinzipien scheinen Kohärenz innerhalb der einführenden Einheit und auch zwischen den Einheiten der einführenden Einheit und der Einheit zum fortgeführten Lernen etabliert zu haben.

Die Einbeziehung des Feldkonzeptes hat im ersten Jahr der Testung 2018/2019 des Unterrichtsansatzes am Ende der einführenden Einheit noch nicht den gewünschten Erfolg erzielt. Die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe besaßen ein geringeres Energieverständnis als die Nicht-Felder-Gruppe. Die Testergebnisse am Ende der Einheit zum fortgeführten Lernen zeigen jedoch ein anderes Bild. Am Ende der Einheit zum fortgeführten Lernen besaß die Felder-Gruppe ein höheres Energieverständnis als die Nicht-Felder-Gruppe. Sie scheinen durch die Einheit zum fortgeführten Lernen nicht nur aufgeholt, sondern die Kontrollgruppe sogar überholt zu haben. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass sie zwar ein geringeres, aber dafür besser vernetztes, stärker konzeptionelles Energieverständnis entwickelt haben. Die Entwicklung eines tiefergehenden Verständnisses von zentralen Ideen findet über einen größeren Zeitraum statt (Alonzo & Gotwals, 2012). Ein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie verlangt von den Schülerinnen und Schülern, dass sie die grundlegenden Prinzipien der potentiellen Energie auch bei neuen, unbekannten Formen identifizieren. Mit elektrischer Energie als einer weiteren Form der potentiellen Energie hatten die Schülerinnen und Schüler dafür eine weitere Lerngelegenheit. Vielleicht haben sie erst mit dieser Form der potentiellen Energie die zugrunde liegenden Prinzipien verstanden. Für die Sinnhaftigkeit der Einbeziehung des Feldkonzeptes für den Aufbau des Energieverständnisses der Schülerinnen und Schüler ist es von zentraler Bedeutung, dass diese ein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie entwickeln. Da dies bei der ersten Testung der Einheit im Schuljahr 2018/2019 scheinbar erst im fortgeführten Lernen

erfolgreich war, wurde die einführende Unterrichtseinheit einer kritischen Prüfung hinsichtlich der Förderung des konzeptionellen Verständnisses unterzogen. Um ein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie zu entwickeln, müssen die Schülerinnen und Schüler die Formen der potentiellen Energie mittels Felder miteinander verknüpfen. Die Verknüpfung von Ideen braucht im Unterricht Lerngelegenheiten, die diese Verknüpfung fördern (Linn, 2006; Sikorski & Hammer, 2017). Die Auswahl der eingeführten Formen der potentiellen Energie in der einführenden Einheit wurde daher kritisch reflektiert. Die Energieformen müssen so gewählt werden, dass die zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie leicht an ihnen identifiziert werden können. Die Vermutung ist, dass das mit der Spannenergie im ersten Jahr der Testung 2018/2019 nicht gelungen ist. Die Spannenergie kann dann den beiden grundlegenden Prinzipien zugeordnet werden, wenn erkannt wird, dass (1) Felder auf mikroskopischer Ebene zwischen Partikeln die Interaktion auf Distanz vermitteln und (2) Felder die Spannenergie speichern, und die Menge an gespeicherter Spannenergie von der Konfiguration der Partikel abhängt. Für die Erkenntnis, dass es sich bei der Spannenergie um eine potentielle Energie handelt, muss folglich die mikroskopische Ebene betrachtet werden. Studien haben jedoch gezeigt, dass diese Ebene herausfordernd für die Schülerinnen und Schüler ist (Harrison & Treagust, 2002; Kubsch, Opitz et al., 2021; Nordine et al., 2018). Spannenergie dann als erste Form der potentiellen Energie einführen zu wollen, erschien deswegen nicht mehr sinnvoll. Bei der Testung im Schuljahr 2020/2021 wurde deswegen mit der magnetischen Energie als ersten Vertreter der potentiellen Energie begonnen. Die beiden zugrunde liegenden Prinzipien lassen sich am Beispiel der magnetischen Energie bedeutend einfacher identifizieren: (1) Das Magnetfeld vermittelt die Interaktion auf Distanz von Magneten, und (2) das Magnetfeld speichert die magnetische Energie, und die Menge an gespeicherter magnetischer Energie hängt von der Konfiguration der Magnete ab. Das höhere Energieverständnis der Felder-Gruppe in zweiten Jahr der Testung legt nahe, dass die Überarbeitungen erfolgreich waren und die Wahl der magnetischen Energie zur Einführung der zugrunde liegenden Prinzipien den Schülerinnen und Schülern dabei geholfen hat, ein konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie auch schon in der einführenden Einheit aufzubauen.

Bei der Testung im Schuljahr 2018/2019 besaß die Felder-Gruppe am Ende der einführenden Einheit ein geringeres Energieverständnis als die Nicht-Felder-Gruppe. Bei der Testung im Schuljahr 2020/2021 war es andersherum. Die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe besaßen nach der einführenden Einheit ein höheres Energieverständnis als die Nicht-Felder-Gruppe. Dieser Unterschied zwischen den Testjahren könnte neben der optimierten Unterrichtseinheit auch auf das Alter der Schülerinnen und Schüler zurückzuführen sein. Die Schülerinnen und Schüler aus der Testung von 2018/2019 waren in der 6. Klasse, während die Schülerinnen und Schüler aus der Testung von 2020/2021 in der 7. Klasse waren. Beide Male wurde die Unterrichtseinheit im Anfangsunterricht getestet, doch durch die Umstellung auf den neunjährigen gymnasialen Bildungsgang (Wechsel von G8 auf G9) ist der

Anfangsunterricht Physik von der 6. in die 7. Klassenstufe verschoben worden. Ein Jahr Altersunterschied kann in diesem Alter der Kinder einen Unterschied in Bezug auf die Entwicklung der kognitiven Fähigkeiten machen. Es ist möglich, dass es den Schülerinnen und Schülern der 7. Klasse aufgrund ihrer ausgeprägteren kognitiven Fähigkeiten leichter fiel, zwei Konzepte zur selben Zeit zu lernen und diese miteinander zu verbinden (siehe Liu & McKeough, 2005 oder auch Neumann et al., 2013). Die Ergebnisse der Studie 1 zeigen, dass sich das Felderverständnis positiv auf die Entwicklung des Energieverständnisses auswirkt. Felder können folglich die Entwicklung des Energieverständnisses fördern, wenn sie von den Schülerinnen und Schülern auch verstanden werden. Studien haben gezeigt, dass Felder für Schülerinnen und Schüler ein abstraktes Konzept sind und auch Studenten Schwierigkeiten bereiten (Greca & Moreira, 1997; Guisasola et al., 2004). Es ist möglich, dass es den älteren Schülerinnen und Schülern mit ausgeprägteren kognitiven Fähigkeiten leichter fiel, Felder zu verstehen. Möglicherweise begründet sich das bessere Abschneiden der Felder-Gruppe im zweiten Jahr der Testung auf dem fortgeschrittenen Alter der Schülerinnen und Schüler. Dem Einfluss der kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler auf die Entwicklung des Energieverständnisses konnte im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der kleinen Stichprobe nicht weiter nachgegangen werden.

Felder sind ein zentrales Konzept der Physik, das bislang in der Sekundarstufe I nur wenig Beachtung gefunden hat. Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen darauf hin, dass Felder im Zusammenhang mit der Energie bereits in der Sekundarstufe I zu einem erklärungs mächtigen Mittel werden können. Die in Studie 3 gefundenen starken Verbindungen der Feldideen (Felder vermitteln Interaktion auf Distanz, Felder speichern potentielle Energie) zu den Aspekten des Energiekonzeptes (Energieformen, Umwandlung, Erhaltung) in den Wissensnetzwerken der Schülerinnen und Schüler deuten darauf hin, dass Felder für sie nützlich waren, um die Phänomene zu erklären. Es ist möglich, dass damit der Grundstein für den Aufbau eines anschlussfähigen Felderverständnisses gelegt wurde, auf das die Schülerinnen und Schüler im fortgeführten Lernen über Felder zurückgreifen können und in das sie neues Wissen integrieren können.

Die Ergebnisse der Studie 3 belegen, dass Felder sowohl in der einführenden Einheit als auch beim fortgeführten Lernen dazu beigetragen haben, dass die Schülerinnen und Schüler in der Felder-Gruppe ein besseres Energieverständnis erworben haben als die Schülerinnen und Schüler der Nicht-Felder-Gruppe. Die Ergebnisse der Replikationsstudie tragen folglich zu einer Bestätigung der Ergebnisse der Studien 1 und 2 bei. Dieses Ergebnis des positiven Einflusses der Einbeziehung von Feldern auf die Entwicklung des Energieverständnisses wird auch dadurch gestützt, dass sich das Felderverständnis in jeder der drei Studien signifikant auf das Abschneiden im Energietest ausgewirkt hat. Wir erhalten durch die drei Studien starke Hinweise darauf, dass die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie die Schülerinnen und Schüler dabei unterstützt, ein tiefergehendes, konzeptionelles Energieverständnis zu entwickeln.

Im Zusammenhang mit dem Formenansatz wird häufig die Kritik angeführt, dass Schülerinnen und Schüler kein tiefgehendes Verständnis der Energieformen entwickeln und diese lediglich als eine Art Etikett für bestimmte Situationen verwenden (Nordine et al., 2018; Swackhamer, 2005). Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass unter Einbeziehung von Feldern in den Energieunterricht diese Kritik adressiert werden kann. Die Schülerinnen und Schüler in den Studien haben ein tiefgehendes, konzeptionelles Verständnis der potentiellen Energie entwickelt. Dies zeigte sich zum einen an ihren besseren Testergebnissen am Ende der einführenden Einheit und am Ende der Einheit zum fortgeführten Lernen. Zum anderen auch daran, dass sie gut strukturierte Wissensnetzwerke aufgebaut haben, in denen die zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie stark miteinander und mit den anderen Aspekten des Energiekonzeptes (andere Energieformen, Umwandlung, Erhaltung) verknüpft waren. Die Ergebnisse stützen die Annahme, dass der Formenansatz unter Einbeziehung von Feldern lernwirksam sein kann.

### **Implikationen für die Forschung**

Alle drei Studien basierten auf den Daten einer kleinen Stichprobe aus einer Schule mit jeweils unter 100 Probanden. Die Ergebnisse lassen sich deswegen nicht ohne Weiteres generalisieren. Dennoch bietet das in dieser Arbeit gewählte Design auch Vorteile. Durch die Fokussierung auf eine Schule konnte für Einflüsse kontrolliert werden, die sich aus unterschiedlichen Unterrichtskonzepten der Schulen oder aus unterschiedlicher Schülerschaft ergeben könnten. Die Schülerinnen und Schüler der Felder- und der Nicht-Felder-Gruppe können in Bezug auf ihren sozioökonomischen Hintergrund als weitgehend vergleichbar angesehen werden. Die Wahl, eine Lehrkraft beide Unterrichtsansätze unterrichten zu lassen, ermöglichte eine Kontrolle der Einflüsse unterschiedlicher Unterrichtsstile. Die Kontrolle dieser Einflussfaktoren schaffte annähernd Laborbedingungen, die es erlaubten, im Rahmen dieser Arbeit herauszufinden, ob die Einbeziehung von Feldern überhaupt die gewünschten Effekte erzielt. Dennoch sollte unbedingt im Rahmen einer Feldstudie untersucht werden, ob sich die positiven Effekte der Einbeziehung von Feldern, die in dieser Arbeit gefunden wurden, auch unabhängig von Faktoren wie der Lehrperson und ihren Unterrichtsmethoden, dem sozioökonomischen Status der Schülerinnen und Schüler und dem Standort der Schule einstellen. Mit einer größeren Stichprobe könnte auch der Frage nachgegangen werden, ob und inwieweit die kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler einen Einfluss darauf haben, wie erfolgreich sie ein Verständnis des Feldkonzeptes und insbesondere ein gleichzeitiges Verständnis des Energie- und des Feldkonzeptes entwickeln.

Die Energieerhaltung ist der wichtigste Aspekt des Energiekonzeptes, weil das Verhalten von Systemen mit ihr vorhergesagt werden kann (Coopersmith, 2015). In der Literatur ist jedoch gut dokumentiert, dass gerade die Energieerhaltung für Schülerinnen und Schüler schwierig ist (Daane et al., 2015; Nordine et al., 2011) und sie die Erhaltung als letzten Aspekt des Energiekonzeptes lernen (Herrmann-Abell & DeBoer, 2018; Liu & McKeough, 2005; Neumann

et al., 2013; Yao et al., 2017). In der naturwissenschaftsdidaktischen Literatur finden sich deswegen verschiedene Vorschläge, wie bei den Schülerinnen und Schülern das Verständnis von Energieerhaltung verbessert werden kann. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Unterrichtseinheiten behandeln die Energieerhaltung nur implizit; wenn davon ausgegangen wird, dass die Menge an einer Energieform zunehmen muss, wenn die Menge an einer anderen Energieform abnimmt. Die explizite Einführung der Energieerhaltung wird Teil des zukünftigen Lernens der Schülerinnen und Schülern sein. Die im Rahmen dieser Arbeit erprobte Einbeziehung von Feldern könnte sich positiv auf das zukünftige Lernen auch über Energieerhaltung auswirken. Die potentielle Energie ist in der Vorstellung der Schülerinnen und Schüler vermeintlich verschwunden, wenn Objekte stoppen. Wenn Schülerinnen und Schüler Schwierigkeiten damit haben zu verstehen, dass auch nicht bewegte Systeme Energie enthalten können, ist ein Verständnis der Energieerhaltung erschwert (Lopez, 2014). Mit Feldern ist die potentielle Energie jedoch nicht „verschwunden“, sondern in einem Feld lokalisiert. Energieerhaltung bedeutet, dass die potentielle Energie zunehmen muss, wenn die kinetische Energie in einem System abnimmt, oder umgekehrt. Wenn Felder bei den Schülerinnen und Schülern ein tiefergehendes Verständnis der potentiellen Energie fördern, wird dadurch auch ein Verständnis der Energieerhaltung erleichtert. Deswegen wäre als wichtiger nächster Schritt zu untersuchen, inwiefern die Einbeziehung von Feldern in den Energieunterricht die Schülerinnen und Schüler auf das zukünftige Lernen über Energie insbesondere in Bezug auf die Energieerhaltung vorbereitet.

Energie ist nicht nur ein zentrales Konzept der Physik, sondern findet auch in anderen Fächern und vor allem in den anderen Naturwissenschaften Anwendung. Schülerinnen und Schülern fällt es jedoch schwer, das in der Physik entwickelte Energieverständnis auf andere Naturwissenschaften zu übertragen (Chabalengula et al., 2012; Cooper & Klymkowsky, 2013). Die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie kann in zweierlei Hinsicht eine gute Möglichkeit sein, das Energiekonzept, wie es in der Physik verstanden wird, der Vorstellung von Energie in anderen Fächern anzunähern. Zunächst ist die energieformenbasierte Sprache sehr physikspezifisch. Die Zusammenfassung der zahlreichen Formen der potentiellen Energie zu der weiteren Energieform neben der kinetischen Energie trägt zu einer Reduzierung der Energieformen bei. Weiterhin steht in anderen Fächern der Transfer von Energie in und aus Systemen im Vordergrund (Eisenkraft et al., 2014). Durch Felder kann bei den Schülerinnen und Schülern das Verständnis dafür geschärft werden, dass potentielle Energie untrennbar mit Systemen verbunden ist. Die Bestimmung der Menge potentieller Energie anhand der Konfiguration aus mindestens zwei Objekten verlangt von den Schülerinnen und Schülern, dass sie stärker systemisch denken. Das Denken in Systemen ist für die Anwendung des Energiekonzeptes in anderen Fächern von Bedeutung. Felder selbst sind jedoch kaum außerhalb der Physik gebräuchlich (z.B. Fishedick, 2019; Weber et al., 2015-2016). Eine direkte Übertragung der Idee, Energie und Felder zu verbinden, wird deswegen vermutlich kaum gelingen. Dennoch könnten die Reduzierung der Energieformen und die

Anregung zum Denken in Systemen durch Felder dabei helfen, dass bei den Schülerinnen und Schülern ein einheitlicheres Konzept von Energie entwickelt wird, das in allen Naturwissenschaften zur Erklärung von Phänomenen beitragen kann. Zukünftige Forschung sollte die Übertragbarkeit des durch Felder entwickelten Energieverständnisses auf das Energielernen in anderen Fächern in den Blick nehmen.

Weiterhin bleibt offen, inwiefern durch die Einbeziehung von Feldern im Anfangsunterricht zur Energie auch ein anschlussfähiges Konzept des Feldkonzeptes angebahnt werden kann. Das Verständnis von Feldern wurde in dieser Arbeit durch einen entsprechenden Test vor Beginn und am Ende der einführenden Einheit gemessen. Sowohl bei der Testung im Schuljahr 2018/2019 als auch im Schuljahr 2020/2021 zeigten die Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe einen signifikanten Lernzuwachs zwischen dem Beginn und dem Ende der Einheit. Diese Ergebnisse deuten zwar darauf hin, dass die Schülerinnen und Schüler substantiell etwas über Felder gelernt haben, jedoch war die Untersuchung des Felderverständnisses nicht der Fokus dieser Arbeit. Zu klären bleibt, ob sich die von den Schülerinnen und Schülern in dieser Unterrichtseinheit gelernten Aspekte des Feldkonzeptes auch als anschlussfähig erweisen.

Studien zeigen, dass Schülerinnen und Schüler zur Erklärung von Phänomenen lieber auf andere Konzepte als das Energiekonzept zugreifen (Driver & Warrington, 1985; Lacy et al., 2014; Papadouris & Constantinou, 2016). Möglicherweise kann die Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherter Energie dazu beitragen, dass Schülerinnen und Schüler das Energiekonzept häufiger und auch noch Jahre nach der einführenden Einheit im Anfangsunterricht als Mittel der Wahl zur Erklärung von Phänomenen heranziehen. Die Lehrkräfte, die in den Studien die Einheit mit Feldern unterrichtet haben, haben zurückgemeldet, dass die Schülerinnen und Schüler, die mit Feldern unterrichtet wurden, auch in höheren Klassenstufen neue Phänomene häufig als erstes mit Hilfe des Energiekonzeptes erklären möchten. Es wäre spannend, diesem Hinweis nachzugehen und die Schülerinnen und Schüler, die im Anfangsunterricht Energie mit Feldern gelernt haben, weiter zu begleiten und die Entwicklung ihres Energieverständnisses weiter zu verfolgen. Wenn Schülerinnen und Schüler durch die Einbeziehung des Feldkonzeptes dazu angeregt werden, das Energiekonzept auch wirklich zu nutzen, wäre das ein starkes Argument für die didaktische Verbindung von Energie und Feldern.

Damit die Idee, Energie und Felder zu verbinden, auch in die Praxis umgesetzt wird, sollten die entwickelten Einheiten zur Einführung der Energie und zum fortgeführten Lernen von elektrischer Energie im nächsten Schritt den Lehrkräften vorgestellt werden. Dafür ist es wichtig zu wissen, was die Lehrkräfte benötigen, um die Einheit zu implementieren. Welche Unterrichtsmaterialien, welche experimentellen Materialien werden benötigt? Wie ausführlich sollte der Unterrichtsgang beschrieben werden? Auch Hintergrundinformationen für Lehrkräfte zur Kompetenzentwicklung der Schülerinnen und Schüler, den Präkonzepten der Schülerinnen und Schüler oder zum Sachgegenstand können von Bedeutung sein, damit die Einheit auch tatsächlich von den Lehrkräften umgesetzt wird (Roblin et al., 2018). Der

Einsatz von innovativen Unterrichtsmaterialien hängt von den Einstellungen der Lehrkräfte zu den Materialien ab (Breuer, 2021). Welche Möglichkeiten zur Anpassung der Materialien sollten den Lehrkräften geboten werden? Studien haben gezeigt, dass Lehrkräfte die Materialien leichter zu ihren eigenen machen, wenn sie die Materialien flexibel auswählen und anpassen können (Kirk & MacDonald, 2001). Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass die Kohärenz der Einheit und der Nutzen des Feldkonzeptes dadurch nicht verloren gehen. Wie die Anpassung durch Lehrkräfte unter gleichzeitiger Erhaltung der Kohärenz gelingen kann, zeigen die Unterrichtseinheiten von Fischer (2022) am Beispiel von Energieeinheiten in unterschiedlichen Sachgebieten der Physik.

### **Implikationen für die Praxis**

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen darauf hin, dass eine Einbeziehung von Feldern in den Energieunterricht im Anfangsunterricht den Schülerinnen und Schülern dabei helfen kann, Energie besser zu verstehen. Lehrkräfte sollten daher ermutigt werden, Felder in ihren Unterricht zur Energie einzubeziehen. Eine besondere Hürde für die Akzeptanz des Unterrichtsansatzes könnten die Felder sein. Lehrkräfte sind es gewohnt, Felder erst in der Sekundarstufe II formal einzuführen, und schätzen das Feldkonzept häufig als zu schwierig für Schülerinnen und Schüler der Mittelstufe ein (Greca & Moreira, 1997). Forschungsergebnisse scheinen dies zu bestätigen und zeigen, dass Felder auch für Oberstufenschülerinnen und -schüler sowie Studenten schwierig sind (Furió & Guisasola, 1998). Begründet mag die Sorge der Lehrkräfte darin liegen, dass die Einführung des Feldkonzeptes typischerweise als mathematisches Konstrukt erfolgt, nämlich als Vektorfeld. Diese Einführung als mathematisches Konstrukt würde für Schülerinnen und Schüler der Mittelstufe tatsächlich ein großes Hindernis darstellen. Für die hier entwickelte Einheit werden jedoch nur ganz grundlegende Aspekte des Feldkonzeptes benötigt, die, wie in Studien belegt, auch junge Schülerinnen und Schüler verstehen können (Bar et al., 2007; Bradamante & Viennot, 2007). Im Einklang mit diesen Ergebnissen zeigt der in allen drei Studien gefundene substantielle Zuwachs des Felderverständnisses der Schülerinnen und Schüler in der Felder-Gruppe, dass die in dieser Arbeit ausgewählten und erprobten Feldideen für sie verständlich waren. Für das Gelingen der Verbindung von Energie und Feldern im Anfangsunterricht sollten die Lehrkräfte folglich darauf achten, dass sie die Einführung von Feldern auf die grundlegenden Feldideen beschränken, die für ein Verständnis von Energie notwendig sind.

Das unterschiedlich stark ausgeprägte Energieverständnis der Schülerinnen und Schüler der Felder-Gruppe zwischen den Testjahren 2018/2019 und 2020/2021 verweist auf einen weiteren Aspekt, der bei der Umsetzung der Unterrichtseinheit von den Lehrkräften beachtet werden sollte: Für die Entwicklung eines konzeptionellen Verständnisses der potentiellen Energie ist es von Bedeutung, dass die Lehrkräfte den zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie im Unterricht Raum geben. Erst durch die in Studie 3 vorgenommene optimierte Auswahl von potentiellen Energieformen, die für die Schülerinnen und Schüler

leicht der potentiellen Energie zugeordnet werden konnten, gelang es den Schülerinnen und Schülern, ein höheres Energieverständnis zu entwickeln als die Schülerinnen und Schüler der Nicht-Felder-Gruppe. Für die Unterrichtspraxis lässt sich daraus folgern, dass die Lerngelegenheiten so gestaltet sein sollten, dass die zugrunde liegenden Prinzipien der potentiellen Energie den Schülerinnen und Schülern bewusst gemacht werden. Die Schülerinnen und Schüler sollten dazu angeregt werden, jede neue Form der potentiellen Energie anhand der über Felder formulierten zugrunde liegenden Prinzipien eigenständig als eine Form der potentiellen Energie zu erkennen. Diese von den Schülerinnen und Schülern bewusst vorgenommene Einordnung der neuen Energieform zur potentiellen Energie kann dazu beitragen, dass sich die große Anzahl an vermeintlich unterschiedlichen Energieformen auf zwei Hauptenergieformen – kinetische und potentielle Energie – reduziert, und sich die Verbindung von Energie und Feldern als lernwirksam erweist.

### **Conclusio**

Die Entwicklung naturwissenschaftlicher Kompetenz erfolgt über den Aufbau eines Verständnisses von zentralen Konzepten (National Research Council et al., 2005). In dieser Arbeit wurden zwei der zentralen Konzepte der Physik miteinander verknüpft: Energie und Felder. Sie miteinander zu verbinden, hat sich in besonderem Maße als lernwirksam erwiesen. Schülerinnen und Schüler, die Energie mit Feldern gelernt haben, konnten ein besseres Verständnis von Energie entwickeln als Schülerinnen und Schüler, die Energie ohne Felder gelernt haben. Dies äußerte sich in besseren Testergebnissen, aber insbesondere auch in besser organisierten Wissensnetzwerken. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstützen damit den in der Literatur geführten Vorschlag einer neuen Konzeptualisierung der potentiellen Energie als Energie, die in Feldern gespeichert ist. Ein derart verbessertes Verständnis von Energie versetzt die Schülerinnen und Schüler in die Lage, aktuelle globale Herausforderungen wie den Klimawandel, die Energiewende oder die Sicherstellung der Energieversorgung unter naturwissenschaftlicher Betrachtungsweise zu verstehen, und an Diskursen zu ihren Ursachen und Lösungsansätzen teilzuhaben.

## LITERATUR

- Alboteanu, A. M., Brand, R. & Buric, R. (2016). *Universum Physik* (Ausgabe A, [Gymnasium], 1. Auflage). Cornelsen.
- Alonzo, A. C. & Gotwals, A. W. (2012). *Learning progressions in science: Current challenges and future directions*. Springer Science & Business Media.
- Atkin, J. M. & Karplus, R. (1962). Discovery or invention? *The Science Teacher*, 29(5), 45–51.
- Backhaus, U. & Schlichting, H. J. (1979). Vom didaktischen Wert physikalischer Grundgrößen. *Physik und Didaktik*, 3, 218–225.
- Bar, V., Zinn, B. & Rubin, E. (2007). Children's ideas about action at a distance. *International Journal of Science Education*, 19(10), 1137–1157. <https://doi.org/10.1080/0950069970191003>
- Becker, M. & Hopf, M. (2021). Der Energie-Feld-Ansatz: Design-Forschung zur Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes für den Energieunterricht der Oberstufe. *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*.
- Bradamante, F. & Viennot, L. (2007). Mapping Gravitational and Magnetic Fields with Children 9–11: Relevance, difficulties and prospects. *International Journal of Science Education*, 29(3), 349–372. <https://doi.org/10.1080/09500690600718245>
- Bransford, J. D., Brown, A. L. & Cocking, R. R. (2000). *How people learn: Brain, mind, experience, and school* (Expanded ed., 7. print). National Academy Press. <http://dx.doi.org/10.17226/9853>
- Bransford, J. D. & Schwartz, D. L. (1999). Chapter 3: Rethinking Transfer: A Simple Proposal With Multiple Implications. *Review of Research in Education*, 24(1), 61–100. <https://doi.org/10.3102/0091732X024001061>
- Breuer, J. (2021). *Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen (Volume 314)*. Logos Verlag Berlin.
- Brewe, E. (2011). Energy as a substancelike quantity that flows: Theoretical considerations and pedagogical consequences. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 7(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.020106>
- Bruner, J. S. (1980). *Der Prozeß der Erziehung (Sprache und Lernen, Bd. 4)*. Pädagogischer Verlag, Berlin.
- Bundesregierung. (2023, 6. Juli). *Klimafreundlich Heizen: Neues Gebäudeenergiegesetz* [Pressemitteilung]. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/neues-gebaeudeenergiegesetz-2184942>
- Burzin, S., Jähnig, M., Kahnt, M., Lichtenberger, J., Mohr, P. & Uhlmann, S. (2021). *Fokus Physik 1* (1. Auflage). Cornelsen.
- Campos, E., Zavala, G., Zuza, K. & Guisasola, J [Jenaro] (2020). Students' understanding of the concept of the electric field through conversions of multiple representations. *Physical Review Physics Education Research*, 16(1), 10135.
- Chabalengula, V. M., Sanders, M. & Mumba, F. (2012). DIAGNOSING STUDENTS' UNDERSTANDING OF ENERGY AND ITS RELATED CONCEPTS IN BIOLOGICAL CONTEXT. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 10(2), 241–266. <https://doi.org/10.1007/s10763-011-9291-2>
- Chen, R. F., Eisenkraft, A., Fortus, D., Krajcik, J., Neumann, K., Nordine, J. & Scheff, A. (Hrsg.). (2014). *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1>
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic press.

- Constantinou, C. P [C. P.] & Papadouris, N [N.] (2012). Teaching and learning about energy in middle school: An argument for an epistemic approach. *Studies in Science Education*, 48(2), 161–186. <https://doi.org/10.1080/03057267.2012.726528>
- Cooper, M. M. & Klymkowsky, M. W. (2013). The trouble with chemical energy: why understanding bond energies requires an interdisciplinary systems approach. *CBE life sciences education*, 12(2), 306–312. <https://doi.org/10.1187/cbe.12-10-0170>
- Coopersmith, J. (2015). *Energy, the subtle concept: The discovery of Feynman's blocks from Leibniz to Einstein*. Oxford University Press, USA.
- Daane, A. R., McKagan, S. B., Vokos, S. & Scherr, R. E. (2015). Energy conservation in dissipative processes: Teacher expectations and strategies associated with imperceptible thermal energy. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 11(1), 415. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.010109>
- Demtröder, W. (2015). *Experimentalphysik 1*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46415-1>
- diSessa, A. A. & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155–1191. <https://doi.org/10.1080/0950069980201002>
- diSessa, A. A. & Wagner, J. F. (2005). What coordination has to say about transfer. *Transfer of learning from a modern multi-disciplinary perspective*, 121–154.
- Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras-Martí, A., Guisasola, J [Jenaro], Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., Trumper, R., Valdés, P. & Vilches, A. (2007). Teaching of Energy Issues: A Debate Proposal for a Global Reorientation. *Science & Education*, 16(1), 43–64. <https://doi.org/10.1007/s11191-005-5036-3>
- Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Martínez-Torregrosa, J., Gras, A., Guisasola, G. & Salinas, J. (2001). La enseñanza de la energía en la educación secundaria. Un análisis crítico. *Revista de Enseñanza de la Física*, 14(1), 45–60.
- Driver, R. (1994). *Making Sense of Secondary Science: Research Into Children's Ideas*. Routledge.
- Driver, R. & Millar, R. (1986). *Energy matters: Proceedings of an invited conference: Teaching about energy within the secondary science curriculum, University of Leeds, 1985*. University of Leeds Centre for Studies in Science and Mathematics Education.
- Driver, R. & Warrington, L. (1985). Students' use of the principle of energy conservation in problem situations. *Physic Education*, 20, 171–176.
- Duit, R. (1984). Learning the Energy Concept in School - Empirical Results from the Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19(2), 59–66.
- Duit, R. (1985). *Der Energiebegriff im Physikunterricht*. Inst. für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Duit, R. (1986). Energievorstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht-Physik/Chemie*, 34(13), 7–9.
- Duit, R. (2014). Teaching and Learning the Physics Energy Concept. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 67–85). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1_5)
- Eisenkraft, A., Nordine, J., Chen, R. F., Fortus, D., Krajcik, J., Neumann, K. & Scheff, A. (2014). Introduction: Why focus on energy instruction? *Teaching and learning of energy in K–12 education*, 1–11.
- Ellse, M. (1988). Transferring Not Transforming Energy. *School Science Review*, 69(248), 427–437.

- Falk, G., Herrmann, F [F.] & Schmid, G. B. (1983). Energy forms or energy carriers? *American Journal of Physics*, 51(12), 1074–1077. <https://doi.org/10.1119/1.13340>
- Faraday, M. (1852). LVIII. On the physical character of the lines of magnetic force. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 3(20), 401–428. <https://doi.org/10.1080/14786445208647033>
- Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K. & Nordine, J. (2022). Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 28(1), 1137. <https://doi.org/10.1007/s40573-022-00143-8>
- Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K. & Nordine, J. (2023). Fields in middle school energy instruction to support continued learning of energy. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010122>
- Fischedick, A. (2019). *Fokus Chemie: Sekundarstufe II, Gesamtband* (1. Aufl.). Cornelsen Verlag.
- Fischer, J. A. (2022). *Basiskonzepte konkretisieren: Entwicklung und Evaluation einer Interventionsmaßnahme zur Förderung kumulativen Lernens durch den Einsatz von Basiskonzepten*. [https://macau.uni-kiel.de/receive/macau\\_mods\\_00003358](https://macau.uni-kiel.de/receive/macau_mods_00003358)
- Forbes, C. T., Neumann, K. & Schiepe-Tiska, A. (2020). Patterns of inquiry-based science instruction and student science achievement in PISA 2015. *International Journal of Science Education*, 42(5), 783–806. <https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1730017>
- Fortus, D., Abdel-Kareem, H., Chen, J., Forsyth, B., Grueber, D., Nordine, J. & Weizmann, A. (2012). Why do some things stop while others keep going? Transfer, transformation, and conservation of energy. In J. S. Krajcik, B. J. Reiser, L. M. Sutherland & D. Fortus (Hrsg.), *Investigating and questioning our world through science and technology (IQWST)*. Active science.
- Fortus, D., Kubsch, M., Bielik, T., Krajcik, J., Lehavi, Y., Neumann, K., Nordine, J., Opitz, S. & Touitou, I. (2019). Systems, transfer, and fields: Evaluating a new approach to energy instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(3), 349. <https://doi.org/10.1002/tea.21556>
- Fortus, D., Sutherland Adams, L. M., Krajcik, J. & Reiser, B. (2015). Assessing the role of curriculum coherence in student learning about energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(10), 1408–1425. <https://doi.org/10.1002/tea.21261>
- Furió, C. & Guisasola, J [J.] (1998). Difficulties in learning the concept of electric field. *Science Education*, 82(4), 511–526. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199807\)82:4<511::AID-SCE6>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199807)82:4<511::AID-SCE6>3.0.CO;2-E)
- Goldring, H. & Osborne, J. (1994). Students' difficulties with energy and related concepts, 29(1), 26–32. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/29/1/006>
- Gombert, S., Di Mitri, D., Karademir, O., Kubsch, M., Kolbe, H., Tautz, S., Grimm, A., Bohm, I., Neumann, K. & Drachsler, H. (2023). Coding energy knowledge in constructed responses with explainable NLP models. *Journal of Computer Assisted Learning*, 39(3), 767–786. <https://doi.org/10.1111/jcal.12767>
- Greca, I. M. & Moreira, M. A. (1997). The kinds of mental representations--models, propositions and images--used by college physics students regarding the concept of field. *International Journal of Science Education*, 19(6), 711–724. <https://doi.org/10.1080/0950069970190607>
- Grehn, J. & Krause, J. (2011). *Metzler Physik* (3. Aufl., Dr. A, 10). Metzler.

- Guisasola, J [Jenaro], Almudí, J. M. & Zubimendi, J. L. (2004). Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university. *Science Education*, 88(3), 443–464. <https://doi.org/10.1002/sce.10119>
- Hadenfeldt, J. C., Repenning, B. & Neumann, K. (2014). Die kognitive Validität von Ordered Multiple Choice Aufgaben zur Erfassung des Verständnisses von Materie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 20(1), 57–68.
- Halliday, D., Walker, J. & Resnick, R. (2018). *Physik* (Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Harrer, B. W. (2017). On the origin of energy: Metaphors and manifestations as resources for conceptualizing and measuring the invisible, imponderable. *American Journal of Physics*, 85(6), 454–460. <https://doi.org/10.1119/1.4979538>
- Harrison, A. G. & Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. *Chemical education: Towards research-based practice*, 17, 189–212.
- Hecht, E. (2003). An Historico-Critical Account of Potential Energy: Is PE Really Real? *The Physics Teacher*, 41(8), 486–493. <https://doi.org/10.1119/1.1625210>
- Heller, K. A. & Perleth, C. (2000). *KFT 4-12+R - Kognitiver Fähigkeits-Test für 4. bis 12. Klassen, Revision*. Beltz.
- Heron, P., Michelini, M. & Stefanel, A. (2009). Teaching and learning the concept of energy at 14 years old. *Frontiers in Science Education research*, 231–240.
- Herrmann, F [F.] (1989). Energy density and stress: A new approach to teaching electromagnetism. *American Journal of Physics*, 57(8), 707–714. <https://doi.org/10.1119/1.15925>
- Herrmann, F [Friedrich] & Pohlig, M. (2016). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe II. Mechanik*.
- Herrmann-Abell, C. F. & DeBoer, G. E. (2018). Investigating a learning progression for energy ideas from upper elementary through high school. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(1), 68–93. <https://doi.org/10.1002/tea.21411>
- Hirça, N., Çalik, M. & Akdeniz, F. (2008). Investigating grade 8 students' conceptions of 'energy' and related concepts. *Journal of Turkish Science Education*, 5(1), 76–88.
- Hobson, A. (2013). There are no particles, there are only fields. *American Journal of Physics*, 81(3), 211–223. <https://doi.org/10.1119/1.4789885>
- Ingenthron, G. (5. Januar 2019). Harald Lesch: "Der Klimawandel ist ausgeforscht, wir müssen handeln". *Sonntagsblatt*. <https://www.sonntagsblatt.de/artikel/menschen/harald-lesch-der-klimawandel-ist-ausgeforscht-wir-muessen-handeln>
- Kali, Y., Linn, M. & Roseman, J. E. (2008). *Designing Coherent Science Education: Implications for Curriculum, Instruction, and Policy*. *Technology, Education--Connections (TEC) Series*. ERIC.
- Kaper, W. H. & Goedhart, M. J. (2002). 'Forms of Energy', an intermediary language on the road to thermodynamics? Part I. *International Journal of Science Education*, 24(1), 81–95. <https://doi.org/10.1080/09500690110049114>
- Kaper, W. H. & Goedhart, M. J. (2010). 'Forms of energy', an intermediary language on the road to thermodynamics? Part II. *International Journal of Science Education*, 24(2), 119–137. <https://doi.org/10.1080/09500690110049123>
- Kirk, D. & MacDonald, D. (2001). Teacher voice and ownership of curriculum change. *Journal of curriculum studies*, 33(5), 551–567.

- KMK, Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.). (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik (Chemie / Biologie) für den Mittleren Schulabschluss*. Luchterhand.
- Krajcik, J. S., & Shin, N. (2014). Project-based learning. *Cambridge Handbook of the Learning Sciences*, 275–297.
- Kubsch, M., Nordine, J., Neumann, K., Fortus, D. & Krajcik, J. (2019). Probing the Relation between Students' Integrated Knowledge and Knowledge-in-Use about Energy using Network Analysis. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 15(8). <https://doi.org/10.29333/ejmste/104404>
- Kubsch, M., Opitz, S., Nordine, J., Neumann, K., Fortus, D. & Krajcik, J. (2021). Exploring a pathway towards energy conservation through emphasizing the connections between energy, systems, and fields. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, 3(1), 349. <https://doi.org/10.1186/s43031-020-00030-7>
- Kubsch, M., Stamer, I., Steiner, M., Neumann, K. & Parchmann, I. (2021). Beyond p-values: Using Bayesian Data Analysis in Science Education Research. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.7275/vzpw-ng13>
- Kurnaz, M. A. & Sağlam Arslan, A. (2011). A Thematic Review of Some Studies Investigating Students' Alternative Conceptions About Energy. *International Journal of Physics & Chemistry Education*, 3(1), 51–74. <https://doi.org/10.51724/ijpce.v3i1.189>
- Lacy, S., Tobin, R. G [R. G.], Wisner, M. & Crissman, S. (2014). Looking Through the Energy Lens: A Proposed Learning Progression for Energy in Grades 3–5. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 241–265). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1_14)
- Landis, J. R. & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Latif, M. (1. Juli 2023). Europa braucht die Energiewende möglichst schnell. In *Denk' ich an Europa*. <https://www1.wdr.de/mediathek/audio/wdr5/wdr5-denk-ich-an-europa/audio-mojib-latif-europa-braucht-die-energiewende-moeglichst-schnell-100.html>
- Lee, H.-S. & Liu, O. L. (2010). Assessing learning progression of energy concepts across middle school grades: The knowledge integration perspective. *Science Education*, 94(4), 665–688. <https://doi.org/10.1002/sce.20382>
- Lehrman, R. L. (1973). Energy is Not the Ability to do Work. *Physics Teacher*, 11(1), 15–18.
- Lienert, G. A. & Raatz, U. (1994). *Testaufbau und Testanalyse* (5th ed.). Beltz.
- Lindsey, B. A. (2014). Student reasoning about electrostatic and gravitational potential energy: An exploratory study with interdisciplinary consequences. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 10(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.013101>
- Lindsey, B. A., Heron, P. R. L. & Shaffer, P. S. (2012). Student understanding of energy: Difficulties related to systems. *American Journal of Physics*, 80(2), 154–163. <https://doi.org/10.1119/1.3660661>
- Linn, M. C. (2006). *The knowledge integration perspective on learning and instruction*. Cambridge University Press.
- Liu, X. & McKeough, A. (2005). Developmental growth in students' concept of energy: Analysis of selected items from the TIMSS database. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5), 493–517. <https://doi.org/10.1002/tea.20060>

- Lopez, R. E. (2014). A Space Physicist's Perspective on Energy Transformations and Some Implications for Teaching About Energy Conservation at All Levels. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 37–46). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1_3)
- Maxwell, J. C. & Niven, W. D. (2010). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. University Press.
- McNeish, D. (2018). Thanks coefficient alpha, we'll take it from here. *Psychological methods*, 23(3), 412–433. <https://doi.org/10.1037/met0000144>
- Michel, H. & Neumann, I. (2016). Nature of Science and Science Content Learning. *Science & Education*, 25(9-10), 951–975. <https://doi.org/10.1007/s11191-016-9860-4>
- Millar, R. H. (2005). Teaching about energy.
- Millar, R. (2014). Towards a Research-Informed Teaching Sequence for Energy. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 187–206). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05017-1_11)
- Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. (2016). *Repères pour l'enseignement de la physique-chimie au cycle 4*.
- Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein. (2015). *Fachanforderungen Geographie: Allgemein bildende Schulen, Sekundarstufe I, Sekundarstufe II*.
- Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein. (2016). *Fachanforderungen Physik: Allgemein bildende Schulen, Sekundarstufe I - Gymnasien, Sekundarstufe II*.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen. (2008). *Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen Physik*. Ritterbach Verlag GmbH.
- Mittenzwei, D., Bruckermann, T., Nordine, J. & Harms, U. (2019). The energy concept and its relation to climate literacy. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 15(6), em1703.
- National Research Council. (2012). *A Framework for K-12 Science Education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13165>
- National Research Council, Donovan, S. & Bransford, J. (2005). *How students learn*. National Academies Press Washington, DC.
- Neumann, K. (2017). Die Entwicklung physikalischer Kompetenz–Stand der Forschung und Desiderata. *Plus Lucis*, 2, 4–8.
- Neumann, K. (2020). Die Bedeutung instruktionaler Kohärenz für eine systematische Kompetenzentwicklung. *Unterrichtswissenschaft*, 48(1), 1–10.
- Neumann, K., Fischer, H. E. & Sumfleth, E. (2008). Vertikale Vernetzung und kumulatives Lernen im Chemie- und Physikunterricht. *Pädagogische Professionalität als Gegenstand empirischer Forschung*, 141–151.
- Neumann, K. & Nordine, J. (2022). Instructional coherence and the development of student competence in physics. In *Physics education* (S. 151–173). Springer.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J. & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(2), 162–188. <https://doi.org/10.1002/tea.21061>

- NGSS Lead States. (2013). *Next Generation Science Standards: For states, by states*. National Academies Press.
- Nordine, J. (2007). Supporting middle school students' development of an accurate and applicable energy concept. <http://deep-blue.lib.umich.edu/handle/2027.42/55689> (Dissertation. University of Michigan). (Erstveröffentlichung University of Michigan)
- Nordine, J. (2016). *Teaching energy across the sciences, K-12*. NSTA Press/National Science Teachers Association.
- Nordine, J., Fortus, D., Lehari, Y., Neumann, K. & Krajcik, J [Joe] (2018). Modelling energy transfers between systems to support energy knowledge in use. *Studies in Science Education*, 54(2), 177–206. <https://doi.org/10.1080/03057267.2018.1598048>
- Nordine, J., Krajcik, J. & Fortus, D. (2011). Transforming energy instruction in middle school to support integrated understanding and future learning. *Science Education*, 95(4), 670–699. <https://doi.org/10.1002/sce.20423>
- Nordine, J., Krajcik, J., Fortus, D. & Neumann, K. (2019). Using storylines to support three-dimensional learning in project-based science. *Science Scope*, 42(6), 86–93.
- OECD. (2019). *PISA 2018 Science Framework*. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/component/f30da688-en> <https://doi.org/10.1787/f30da688-en>
- OpenSciEd. (2022). *How can a magnet move another object without touching it?* <https://www.openscienced.org/instructional-materials/8-3-forces-at-a-distance/>
- OpenSciEd. (2023). *How can we design more reliable systems to meet our communities' energy needs?* <https://www.openscienced.org/instructional-materials/p-1-energy-flow-from-earths-systems/>
- Opitz, S. T., Blankenstein, A. & Harms, U. (2017). Student conceptions about energy in biological contexts. *Journal of Biological Education*, 51(4), 427–440.
- Osborne, R. J. & Gilbert, J. K. (1980). A Method for Investigating Concept Understanding in Science. *European Journal of Science Education*, 2(3), 311–321. <https://doi.org/10.1080/0140528800020311>
- Papadouris, N [Nicos] & Constantinou, C. P [Constantinos P.] (2016). Investigating middle school students' ability to develop energy as a framework for analyzing simple physical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(1), 119–145. <https://doi.org/10.1002/tea.21248>
- Park, M. & Liu, X. (2016). Assessing Understanding of the Energy Concept in Different Science Disciplines. *Science Education*, 100(3), 483–516. <https://doi.org/10.1002/sce.21211>
- Pocoví, M. C. (2007). The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(1), 107–132. <https://doi.org/10.1002/tea.20175>
- Quinn, H. R. (2014). A Physicist's Musing on Teaching About Energy. In R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine & A. Scheff (Hrsg.), *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education* (S. 15–36). Springer International Publishing.
- Reiser, B. J. (2017). Developing coherent storylines to support three-dimensional science learning. *Rhode Island Science Teachers Association (RISTA) conference*. <https://www.nextgenstorylines.org>.
- Roblin, N. P., Schunn, C. & McKenney, S. (2018). What are critical features of science curriculum materials that impact student and teacher outcomes? *Science Education*, 102(2), 260–282.
- Rückl, E. (1991). *Feldenergie: Ein neues didaktisches Konzept*. BI-Wiss.-Verlag.
- Saarelainen, M., Laaksonen, A. & Hirvonen, P. E. (2006). Students' initial knowledge of electric and magnetic fields - more profound explanations and reasoning models for undesired

- conceptions. *European Journal of Physics*, 28(1), 51–60. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/28/1/006>
- Schecker, H. (2014). Überprüfung der Konsistenz von Itemgruppen mit Cronbachs alpha. In Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.). (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Springer Berlin Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2> <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>
- Scherr, R. E., Close, H. G., McKagan, S. B. & Vokos, S. (2012). Representing energy. I. Representing a substance ontology for energy. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 8(2), 20114.
- Scholz, O. (2023). *Regierungserklärung von Bundeskanzler Olaf Scholz zu einem Jahr Zeitenwende vor dem Deutschen Bundestag am 2. März 2023 in Berlin*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/bulletin/regierungserklaerung-von-bundeskanzler-olaf-scholz-2169350>
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2005a). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Biologie für den mittleren Schulabschluss*. Luchterhand.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2005b). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Chemie für den mittleren Schulabschluss*. Luchterhand.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2005c). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Physik für den mittleren Schulabschluss*. Luchterhand.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2020). Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06. 2020)[Educational Standards in the Subject of Physics for the General Qualification for University Entrance (Resolution of the Conference of the Secretaries of Education from 2020-06-18)]. KMK.
- Sikorski, T.-R. & Hammer, D. (2017). Looking for coherence in science curriculum. *Science Education*, 101(6), 929–943. <https://doi.org/10.1002/sce.21299>
- Smil, V. (2003). *Energy at the crossroads: global perspectives and uncertainties*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Smil, V. (2006). *Energy a beginning's guide*.
- Smil, V. (2010). *Energy myths and realities*. AEI Press Washington, DC.
- Solomon, J. (1982). How Children Learn About Energy or Does the First Law Come First? *School Science Review*, 63(224), 415–422.
- Solomon, J. (1983). Messy, contradictory and obstinately persistent: a study of children's out-of-school- ideas about energy. *School Science Review*, 65(231), 225–230.
- Stephanik, B. M., Shaffer, P. S., Rebello, N. S., Engelhardt, P. V. & Singh, C. (2012). Examining student ability to interpret and use potential energy diagrams for classical systems. In *AIP Conference Proceedings* (S. 367–370). AIP. <https://doi.org/10.1063/1.3680071>
- Swackhamer, G. (2005). Cognitive resources for understanding energy. <http://modeling.la.asu.edu/modeling/CognitiveResources-Energy.pdf>
- Swackhamer, G. & Hestenes, D. (2005). An energy concept inventory. <http://energyeducation.eku.edu/sites/energyeducation.eku.edu/files/EnergyConceptInventory.pdf> (Arizona State University).

- Tipler, P. A., Mosca, G., Kersten, P. & Wagner, J. (2019). *Physik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58281-7>
- Tobin, R. G [Roger 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*, 91(3), 398. <https://doi.org/10.1002/tea.21445>
- Trumper, R. (1993). Children's energy concepts: A cross-age study. *International Journal of Science Education*, 15(2), 139–148.
- van Huis, C. & van Berg, E. den (1993). Teaching energy: a systems approach. *Physics Education*, 28(3), 146–153. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/28/3/003>
- Viennot, L. & Rainson, S. (1992). Students' reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, 14(4), 475–487. <https://doi.org/10.1080/0950069920140409>
- Warren, J. W. (1982). The nature of energy. *European Journal of Science Education*, 4(3), 295–297.
- Watts, D. M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18(5), 213–217. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/18/5/307>
- Weber, U., Gräbe, G. & Scherer, M. (Hrsg.). (2015-2016). *Biologie Oberstufe* (3., neubearbeitete Auflage). Cornelsen.
- Weinstein, C. S., Mignano, A. J. & Romano, M. E. (2007). Elementary classroom management: Lessons from research and practice.
- Weßnigk, S. & Neumann, K. (2015). *Understanding Energy - An exploration of the relationship between measures of students' understanding of energy, general cognitive abilities and schooling*. <https://doi.org/10.18452/8214>
- Winter, J. de. (2013). *Using the Student's t-test with extremely small sample sizes*. <https://doi.org/10.7275/e4r6-dj05>
- Wirtz, M. & Caspar, F. (2002). Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität.[Inter-rater agreement and inter-rater reliability]. *Göttingen: Hogrefe*.
- Yao, J.-X., Guo, Y.-Y. & Neumann, K. (2017). Refining a learning progression of energy. *International Journal of Science Education*, 39(17), 2361–2381.



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<b>Abbildung 1</b> Unterrichtseinheiten für eine einführende Einheit zur Energie und eine Einheit zum fortgeführten Lernen mit und ohne die Einbeziehung von Feldern .....	11
<b>Abb. 1.1</b> Studiendesign als quasi-experimentelles Prä-Post- Design mit zwei Interventionsgruppen (Felder und Nicht-Felder) und Erhebungen vor und nach den Interventionen .....	26
<b>Abb. 1.2</b> Versuchsaufbau zur Spannenergie .....	31
<b>Abb. 1.3</b> Versuchsaufbau zur magnetischen Energie .....	32
<b>Abb. 1.4</b> Beispielaufgabe aus dem Energietest .....	35
<b>Anhang 1.1</b> Arbeitsblatt zur magnetischen Energie .....	44
<b>Anhang 1.2</b> Beispielaufgabe aus dem Feldertest .....	44
<b>FIG. 2.1.</b> Study design as a quasi-experimental pretest-posttest design with two intervention groups (fields and non-fields) and assessments before and after the interventions ...	52
<b>FIG. 2.2.</b> Model of a conveyor belt used to establish an analogy between the transformation of gravitational energy in the conveyor belt circuit and the transformation of electric energy in an electric circuit .....	54
<b>FIG. 2.3.</b> Model of the electric circuit used in the fields groups to visualize the electric field in an electric circuit .....	55
<b>FIG. 2.4.</b> Example of an item in the electric energy test .....	57
<b>FIG. 2.5.</b> Students mean scores on the electric energy test before (pre, T3) and after (post, T4) the subsequent unit for both groups .....	60
<b>FIGURE 3.1</b> Study Design as a Quasi-Experimental Pretest-Posttest Design Divided Into Two Parts (Introductory and Continued Learning Unit) With Two Intervention Groups (Fields and Non-Fields) .....	70
<b>FIGURE 3.2</b> Example of a Task From the Energy Test at Pretest (T1) and Posttest (T2) Time From the Introductory Unit .....	74
<b>FIGURE 3.3</b> Students Mean Scores on the Energy Test at Pretest (T1) and Posttest (T2) Time of the Introductory Unit for Both Groups .....	80
<b>FIGURE 3.4</b> Students Mean Scores on the Electric Energy Test at Pretest (T3) and Posttest (T4) Time of the Continued Learning Unit for Both Groups .....	81
<b>FIGURE 3.5a</b> Knowledge Network of the Fields Group (8 Students) at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit .....	83
<b>FIGURE 3.5b</b> Knowledge Networks of the Non-Fields Group (4 Students) at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit .....	83
<b>FIGURE 3.6a</b> Knowledge Network of a Student in the Fields Group With a Score of 43% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit .....	85
<b>FIGURE 3.6b</b> Knowledge Network of a Student in the Non-Fields Group with a Score of 43% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit .....	85

<b>FIGURE 3.7a</b> Knowledge Network of a Student in the Fields Group With a Score of 70% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit .....	86
<b>FIGURE 3.7b</b> Knowledge Network of a Student in the Non-Fields Group with a Score of 67% on the Energy Test at Posttest Time (T2) of the Introductory Unit .....	86
<b>FIGURE 3.S1</b> Example of a Task From the Fields Test at Pretest (T1) and Posttest (T2) Time From the Introductory Unit .....	89
<b>Abbildung 4.1</b> Zentrale Ideen des Unterrichtsansatzes zur Energie mit Feldern in Schüler*innen- gerechter Sprache .....	94
<b>Abbildung 4.2a</b> Zwei Magnete unter einer Magnetfeldplatte, die weit voneinander entfernt sind .....	95
<b>Abbildung 4.2b</b> Zwei Magnete unter einer Magnetfeldplatte, die nah beieinander sind .....	95
<b>Abbildung 4.3a</b> Ein Magnet unter einer Ferrofluidflasche und ein Magnet darüber mit großem Abstand (nicht sichtbar im Bild) .....	95
<b>Abbildung 4.3b</b> Ein Magnet unter einer Ferrofluidflasche und ein Magnet darüber mit geringem Abstand .....	95
<b>Abbildung 4.4</b> Ringmagnete auf einer Führung .....	96
<b>Abbildung 4.5</b> Versuchsaufbau zur magnetischen Energie mit sich abstoßenden Magneten	98
<b>Abbildung 4.6:</b> Versuchsaufbau zur Lageenergie .....	101

## TABELLENVERZEICHNIS

<b>Tab. 1.1</b> Übersicht über die Lerninhalte der Unterrichtseinheiten .....	30
<b>Tab. 1.2</b> Ergebnisse beider Gruppen für das Energie- und Felderverständnis und die kognitiven Fähigkeiten .....	36
<b>Tab. 1.3</b> Korrelationen zwischen allen Maßen .....	37
<b>Tab. 1.4</b> Ergebnisse für das Energieverständnis (Posttest) in Abhängigkeit von der Gruppe, den kognitiven Fähigkeiten und dem Energieverständnis (Prätest) .....	38
<b>Tab. 1.5</b> Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt in Abhängigkeit von der Interaktion zwischen dem Felderverständnis zum Posttest-Zeitpunkt und der Gruppenzugehörigkeit, dem Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt und den kognitiven Fähigkeiten .....	39
<b>TABLE II.I</b> Overview of lesson contents during the units for both groups .....	53
<b>TABLE II.II</b> Results of both groups in the tests on electric energy, energy from the introductory unit, and cognitive abilities .....	59
<b>TABLE II.III</b> Correlations between all measures .....	59
<b>TABLE II.IV</b> Results of the ANCOVA with students' understanding of electric energy after the subsequent units (T4) as dependent variable .....	60
<b>TABLE 3.1</b> Distribution of Topics Among Lesson for the Introductory and the Continued Learning Unit for Both Groups .....	71
<b>TABLE 3.2</b> Extract of the Coding System Used for the Analysis of the Interviews .....	78
<b>TABLE 3.3</b> Descriptive Overview of Students' Results on all Measures for Both Groups. As the Number of Tasks Between the Energy Test at Pretest Time (T1) and Posttest Time (T2) Differed, We Show Students' Scores in Percent and Students' Gain in Energy Understanding in Percentage Points. For All Other Measures We Indicate Absolute Points. We Added the Maximum Score Separated by a Slash .....	79
<b>TABLE 3.S1</b> Correlations Between All Measures .....	89
<b>Tabelle 4.1</b> Übersicht über die Lerninhalte der Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern ...	97



## **ANHANG**

Auf der beigefügten CD sind folgende Daten hinterlegt:

- Die Unterrichtseinheiten der Felder- und der Nicht-Felder-Gruppe für die einführende Einheit und die Einheit zum fortgeführten Lernen über Energie
- Testinstrumente und Kodierleitfäden für die schriftlichen Tests zu Energie und zu Feldern und zu den Interviews



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation – abgesehen von der Beratung durch meine Betreuer – nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt wurden. Sie wurde weder im Ganzen noch in Teilen an einer anderen Stelle im Rahmen eines Promotionsverfahrens vorgelegt. Teile dieser Arbeit wurden bereits in Form von Zeitschriftenartikeln publiziert bzw. sind zur Publikation eingereicht. Die vorliegende Arbeit ist unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden. Ich erkläre ferner, dass mir kein akademischer Grad entzogen wurde.

Kiel, den 28.08.2023

Kristin Fiedler