



Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept

Kristin Fiedler¹ · Marcus Kubsch¹ · Knut Neumann¹ · Jeffrey Nordine^{1,2}

Eingegangen: 15. Juni 2021 / Angenommen: 21. Juni 2022 / Online publiziert: 13. Juli 2022
© Der/die Autor(en) 2022

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 Felderverständnisses 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

✉ Kristin Fiedler
kfiedler@leibniz-ipn.de

¹ IPN – Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Abteilung Didaktik der Physik, Universität Kiel, Olshausenstraße 62, Kiel, Deutschland

² College of Education, University of Iowa, 240 South Madison Street, Iowa City, Iowa, USA

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. 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 (Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK] 2005a, b, c). 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 Energiekonzepts 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 (Quinn 2014; Swackhamer 2005). Allerdings sind Felder selbst ein Konzept, das für Schülerinnen und Schüler nicht leicht zu verstehen ist (Greca und 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 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 und McKeough 2005; Lee und Liu 2010; Neumann et al. 2013; Herrmann-Abell und DeBoer 2018).

Die naturwissenschaftsdidaktische Forschung offenbart aber auch die Schwierigkeiten, die Schülerinnen und Schüler mit der Entwicklung eines fundierten Energieverständnisses haben (Goldring und Osborne 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 und 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 und 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. 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 und 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 (vgl. z. B. Watts 1983). Darüber hinaus fällt es den Schülerinnen und Schülern schwer, potentielle Energie richtig zu lokalisieren (z. B. 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“¹ (vgl. z. B. 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

¹ 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).

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 (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 vollständige 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; Quinn 2014). 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 (vgl. 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 und Moreira 1997).

Studien zum Verständnis der Schülerinnen und Schüler sind hauptsächlich auf die Sekundarstufe II und die Universität fokussiert (z. B. Viennot und 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; Pocić 2007; Schecker et al. 2018). Sie haben Schwierigkeiten, zu erkennen, dass Felder auch abstoßende und nicht immer anziehende Wirkung haben können (Bradamante und 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 und 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 und 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 bis-

her 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 (Quinn 2014; Swackhamer 2005; Herrmann 1989). 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 und 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 (vgl. Bradamante und Viennot 2007; Bar et al. 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 (National Research Council [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, Herrmann und Pohlig 2016) wird die Energie im Gravita-

tionsfeld 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. (2019) 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. 2021). 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 Feldverständnis 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). 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.

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

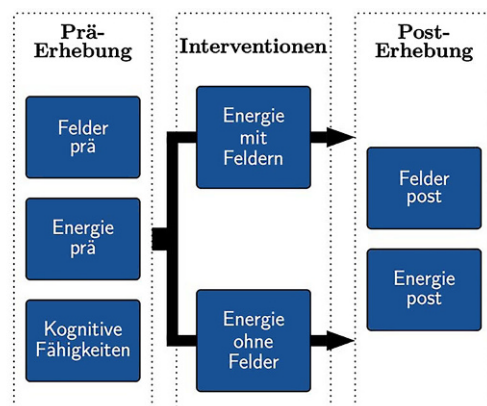


Abb. 1 Studiendesign als quasi-experimentelles Prä-Post-Design mit zwei Interventionsgruppen (Felder und Nicht-Felder) und Erhebungen vor und nach den Interventionen

nen 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 Prätestzeitpunkt in Bezug auf ihre kognitiven Fähigkeiten und ihre Vorkenntnisse über Felder und Energie verglichen. Der Kognitive Fähigkeitstest (KFT) (Heller und 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).

Interventionen²

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 2005) genüge. Im Besonderen sollte er die Schüle-

rinnen und Schüler durch Experimente aktivieren und ihre 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 und Shin 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 Bewegungsener-

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

gie 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 et al. 2011) 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 im Anhang, Abb. 5. 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 könnten 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.

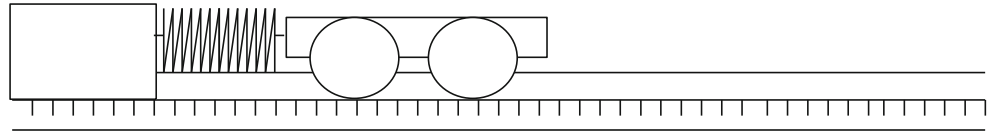
Unterschiede zwischen den Unterrichtseinheiten

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

Tab. 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	

Abb. 2 Versuchsaufbau zur Spannenergie



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 entnehmen.

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. 2), so dass diese verformt wurde, und dann losgelas-

sen. 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.

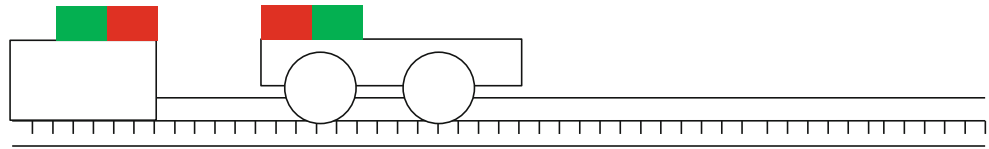
Die Schülerinnen und Schüler sollten erläutern, dass nur nach dem Loslassen Bewegungsenergie vorhanden war, da der Wagen sich mit einer gewissen Geschwindigkeit bewegte, und dass diese Energie vorher in der Feder gespeichert wurde, was man daran erkennen konnte, dass sich diese verformte. Die Entscheidung, zunächst die Spannenergie einzuführen, lag darin begründet, dass die Verformung der Feder direkt von den Schülerinnen und Schülern beobachtet werden können sollte.³

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. 3).

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

³ 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 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.

Abb. 3 Versuchsaufbau zur magnetischen Energie



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.

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 Magnetfeldes 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.

Instrumente⁴

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 und Neumann 2016, Nordine 2007, Swackhamer und He-

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

Abb. 4 Beispielaufgabe aus dem Energietest

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.

stenes 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 beschränkt⁵ 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. 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 im Anhang, Abb. 6. Der Energie- und der Feldertest wurden mit jeweils 10 Schülerinnen und Schülern der 8. Jahrgangsstufe pilotiert, um Verständnisschwierigkeiten im Vorfeld aufzudecken und zu beheben.

⁵ 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.

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.

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 Energiekonzepts, 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 und 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

Tab. 2 Ergebnisse beider Gruppen für das Energie- und Felderverständnis und die kognitiven Fähigkeiten

	Felder-Gruppe (N= 44)		Nicht-Felder-Gruppe (N= 23)	
	M	SD	M	SD
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

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 und Raatz 1994, S. 14).

Die kognitiven Fähigkeiten der Schülerinnen und Schüler wurden mit Hilfe der nonverbalen Subskala N1 des kognitiven Fähigkeitstests (KFT) erfasst (Heller und Perleth 2000). Die Reliabilität der verwendeten Subskala war mit einem Cronbachs α 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. 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.

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

Tab. 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, $p=0,027$

Tab. 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)	β	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

$N = 86$; $R^2 = 0,23$

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; $p = 0,1$

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. 3 entnommen werden.

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.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse zeigt Tab. 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 β 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 gespeicherte 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 Felderverständnis moderiert werden. Um zu untersuchen, ob der Effekt der Konzeptualisierung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherte Energie durch das Felderverständnis der Schülerinnen und Schüler moderiert wird, wurde eine weitere Regressionsanalyse durchgeführt. Als abhängige Variable diente wiederum das Energieverständnis zum Posttest-Zeitpunkt und als unabhängige Va-

Tab. 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)	β	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

$N = 85$; $R^2 = 0,22$

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; $p = 0,1$

riable die Interaktion aus der Gruppenzugehörigkeit und dem Feldverständnis zum Posttest-Zeitpunkt. Als Kovariaten dienten die kognitiven Fähigkeiten und das Energieverständnis zum Prätest-Zeitpunkt. Tab. 5 zeigt die Ergebnisse dieser Regressionsanalyse.

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 (z. B. Stephanik et al. 2012; Lindsey et al. 2012; Hecht 2003) 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 (z. B. Greca und Moreira 1997; Bradamante und Viennot 2007; 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 gespeicherte Energie untersucht wurde. Dabei wurde zum einen exploriert, ob die Einführung der potentiellen Energie als in Feldern gespeicherte 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 gespeicherte 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 (Ministeri-

um 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 Feldverständnisses 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 Feldverständnisses 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 Ener-

giekonzepts 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.

Anhang

Arbeitsblatt 3.1

Datum: __. __. 201__

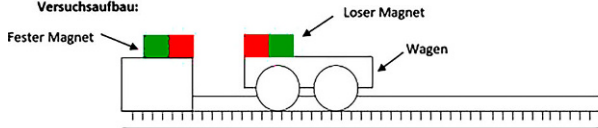
Magnetische Energie

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.

Abb. 5 Arbeitsblatt zur magnetischen Energie

Abb. 6 Beispielaufgabe aus dem Feldertest

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.

Förderung Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer: 458465679.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Interessenkonflikt K. Fiedler, M. Kubsch, K. Neumann und J. Nordine geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- 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>.
- 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>.
- Burzin, S., Jähnig, M., Kahnt, M., Lichtenberger, J., Mohr, P., & Uhlmann, S. (2021). *Fokus Physik I* (1. Aufl.). Berlin: Cornelsen.
- 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*. Cham: Springer.
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge.
- Doménech, J.L., Gil-Pérez, D., Gras-Martí, A., Guisasaola, J., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., et al. (2007). Teaching of energy issues. A debate proposal for a global reorientation. *Sci & Educ*, 16(1), 43–64. <https://doi.org/10.1007/s11191-005-5036-3>.
- 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. (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). Cham: Springer.
- Ellse, M. (1988). Transferring not transforming energy. *School Science Review*, 69(248), 427–437.
- 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, M. S. LeeAnn & 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., et al. (2019). Systems, transfer, and fields. Evaluating a new approach to energy instruction. *J. Res. Sci. Teach*, 29(3), 349. <https://doi.org/10.1002/tea.21556>.
- Furió, C., & Guisasaola, J. (1998). Difficulties in learning the concept of electric field. *Sci. Ed*, 82(4), 511–526. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(199807\)82:4%3C511::AID-SCE6%3E3.0.CO%3B2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(199807)82:4%3C511::AID-SCE6%3E3.0.CO%3B2-E).
- Goldring, H., & Osborne, J. (1994). Students' difficulties with energy and related concepts. *Physics education*, 29(1), 26. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/29/1/006>.
- 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>.
- Guisasaola, J., Almudí, J. M., & Zubimendi, J. L. (2004). Difficulties in learning the introductory magnetic field theory in the first years of university. *Sci. Ed*, 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.
- 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*. Göttingen: Beltz.
- Herrmann, 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., & Pohlrig, 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. *J. Res. Sci. Teach*, 55(1), 68–93. <https://doi.org/10.1002/tea.21411>.
- 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>.
- 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*. München: Luchterhand.
- Krajcik, J. S., & Shin, N. (2014). Project-based learning. In *Cambridge handbook of the learning sciences* (S. 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 J. Math., Sci Tech. Ed*. <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. *Discip Interdiscip Sci Educ Res*, 3(1), 349. <https://doi.org/10.1186/s43031-020-00030-7>.
- Lee, H.-S., & Liu, O. L. (2010). Assessing learning progression of energy concepts across middle school grades. The knowledge integration perspective. *Sci. Ed*, 94(4), 665–688. <https://doi.org/10.1002/sce.20382>.
- Lienert, G. A., & Raatz, U. (1994). *Testaufbau und Testanalyse* (5. Aufl.). Weinheim: Beltz.
- Lindsey, B. A. (2014). Student reasoning about electrostatic and gravitational potential energy. An exploratory study with interdisciplinary consequences. *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res*. <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>.
- Liu, X., & McKeough, A. (2005). Developmental growth in students' concept of energy. Analysis of selected items from the TIMSS database. *J. Res. Sci. Teach*, 42(5), 493–517. <https://doi.org/10.1002/tea.20060>.
- Michel, H., & Neumann, I. (2016). Nature of science and science content learning. *Sci & Educ*, 25(9–10), 951–975. <https://doi.org/10.1007/s11191-016-9860-4>.
- 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). Cham: Springer.
- Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein (2016). *Fachanforderungen Physik. Allgemein bildende Schulen, Sekundarstufe I – Gymnasien, Sekundarstufe II*. Kiel: Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2008). *Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen Physik*. Frechen: Ritterbach.
- National Research Council [NRC] (2012). *A framework for K-12 science education. Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013). Towards a learning progression of energy. *J. Res. Sci. Teach*, 50(2), 162–188. <https://doi.org/10.1002/tea.21061>.
- Nordine, J. (2007). *Supporting middle school students' development of an accurate and applicable energy concept*. Dissertation. University of Michigan. <http://deep-blue.lib.umich.edu/handle/2027.42/55689>
- 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.
- Nordine, J., Fortus, D., Lehavi, Y., Neumann, K., & Krajcik, J. (2019). 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>.
- Pocoví, M. C. (2007). The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines. *J. Res. Sci. Teach*, 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). Cham: Springer.
- Rückl, E. (1991). *Feldenergie. Ein neues didaktisches Konzept*. BI-Wiss.
- 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 α . *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, 1.
- Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., & Duit, R. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2>.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK] (Hrsg.). (2005a). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Biologie für den mittleren Schulabschluss*. München, Neuwied: Luchterhand.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK] (2005b). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Chemie für den mittleren Schulabschluss*. München, Neuwied: Luchterhand.
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland [KMK] (2005c). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Physik für den mittleren Schulabschluss*. München, Neuwied: Luchterhand.
- 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 *2011 PHYSICS EDUCATION RESEARCH CONFERENCE*. AIP, Omaha, 3–4 August 2011. (S. 367–370). AIP Conference Proceedings.
- Swackhamer, G. (2005). Cognitive resources for understanding energy. <http://modeling.la.asu.edu/modeling/CognitiveResources-Energy.pdf>. Zugegriffen: 16. Nov. 2017.
- Swackhamer, G., & Hestenes, D. (2005). An energy concept inventory. Arizona State University. <http://energyeducation.eku.edu/sites/energyeducation.eku.edu/files/EnergyConceptInventory.pdf>. Zugegriffen: 16. Nov. 2017.
- Tobin, R. G., Lacy, S. J., Crissman, S., & Haddad, N. (2018). Model-based reasoning about energy. A fourth-grade case study. *J. Res. Sci. Teach*, 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.
- 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>.
- Watts, D. M. (1983). Some alternative views of energy. *Phys. Educ*, 18(5), 213–217. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/18/5/307>.
- Weinstein, C. S., Mignano, A. J., & Romano, M. E. (2007). *Elementary classroom management. Lessons from research and practice*.
- Wirtz, M., & Caspar, F. (2002). *Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität. [Inter-rater agreement and inter-rater reliability]*. Göttingen: Hogrefe.