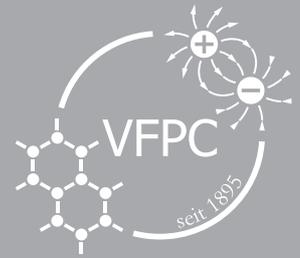
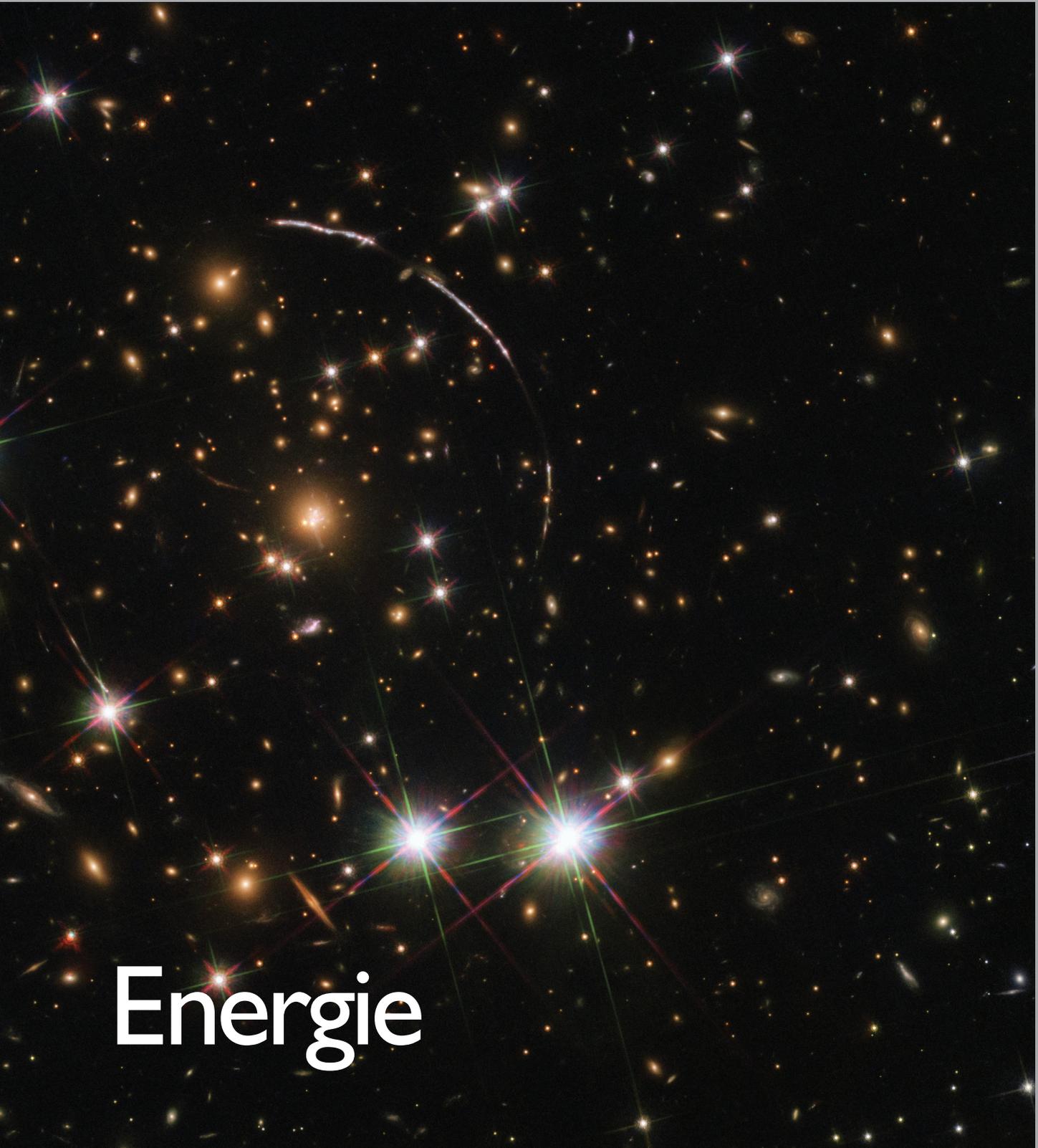


# plusLucis



Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts



# Energie

## Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses Physik & Schule der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (VZR: 668472729)  
Erscheint vierteljährlich

### Medieninhaber:

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts  
Adr.: AECC Physik Universität Wien, Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien  
Web: <https://www.pluslucis.org>  
E-Mail: [schriftenleitung@pluslucis.org](mailto:schriftenleitung@pluslucis.org)

### Redaktion:

Mag. Dr. Thomas Plotz (Leitung)  
Mag. Brigitte Knaus  
Mag. Sarah Zloklikovits

### Verantwortlicher Herausgeber

#### dieser Ausgabe:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf,  
Universität Wien, Physikdidaktik  
E-Mail: [martin.hopf@univie.ac.at](mailto:martin.hopf@univie.ac.at)  
Dr. Manuel Becker,  
Universität Wien, AECC Physik  
E-Mail: [manuel.becker.office@gmail.com](mailto:manuel.becker.office@gmail.com)

#### Herausgeber:innenteam:

Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer  
Universität Graz, Physikdidaktik  
E-Mail: [claudia.haagen@uni-graz.at](mailto:claudia.haagen@uni-graz.at)  
Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf  
Universität Wien, Physikdidaktik  
E-Mail: [martin.hopf@univie.ac.at](mailto:martin.hopf@univie.ac.at)  
Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens  
Universität Wien, Chemiedidaktik  
E-Mail: [anja.lembens@univie.ac.at](mailto:anja.lembens@univie.ac.at)  
Univ.-Prof. Dr. Thomas Wilhelm  
Universität Frankfurt, Physikdidaktik  
E-Mail: [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

#### Bezugshinweise:

Das Abonnement der Zeitschrift ist für Vereinsmitglieder im Mitgliedsbeitrag inkludiert.  
Ein institutionelles Abonnement (z. B. für Bibliotheken) ist zum Bezugspreis von 40 Euro im Jahr möglich.

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und ChemielehrerInnen, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Für die Inhalte der Artikel sind ausschließlich die namentlich genannten Autor:innen verantwortlich.

#### Titelbild (Umschlag):

NASA, ESA, and E. Rivera-Thorsen (Institute of Theoretical Astrophysics Oslo, Norway)

## Inhalt

Was ich immer schon über Energie wissen wollte.....	4
<i>Martin Hopf und Manuel Becker</i>	
Das Problem mit den Energieformen.....	8
<i>Manuel Becker</i>	
Der potentiellen Energie ein Zuhause geben.....	10
<i>Kristin Fiedler, Marcus Kubsch, Knut Neumann und Jeffrey Nordine</i>	
Auf das System kommt es an.....	16
<i>Marcus Kubsch und Jeffrey Nordine</i>	
Der Energie-Feld-Ansatz.....	21
<i>Manuel Becker</i>	
Energetheater: Eine verkörperte, kollaborative Lernaktivität zur Erforschung von Energie.....	29
<i>Abigail R. Daane, Lindsay Wells, Rachel E. Scherr und Benedikt W. Harrer</i>	
Thermische Energie mit dem BB-Bag veranschaulichen.....	35
<i>Manuel Becker und Michael M. Hull</i>	
Der Einsatz von Infrarotkameras im Physik- und Chemieunterricht.....	38
<i>Jesper Haglund und Christopher Robin Samuelsson</i>	

# Editorial

Liebe Kolleg:innen,

als wir dieses Editorial schreiben, ist Energie gerade wieder einmal – wie schon in den letzten Jahren – in aller Munde. Gerade hat die Ukraine angekündigt, in Zukunft kein russisches Gas mehr durch ihr Territorium zu leiten, da die entsprechenden Verträge auslaufen werden. Und natürlich ist dadurch die Energieversorgung in Österreich betroffen. Auch wenn gerade die Gasspeicher fast ganz voll sind. Und der unnatürlich warme Herbst in Österreich in diesem Jahr hat vermutlich die letzten Skeptiker:innen überzeugt, dass der Klimawandel tatsächlich existiert. Wir können uns jedenfalls nicht erinnern, schon einmal vorher im Oktober abends im Außenbereich eines Lokals gegessen zu haben.

Unterricht zum Thema Energie ist schon immer eine der Kernaufgaben des Physikunterrichts. Und das nehmen wir auch ernst. Genauso wie das die Kolleg:innen in Biologie, Chemie und in anderen Fächern tun. Vielleicht wäre es hin und wieder sinnvoll, miteinander zu sprechen und die Gemeinsamkeiten und auch die Unterschiede in unseren verschiedenen Disziplinen zu diskutieren. Energie kann man ganz unterschiedlich unterrichten.

Das vorliegende Heft ist ein Schritt dazu darzustellen, wie Energieunterricht aussehen könnte. Wir haben insgesamt acht Beiträge zusammengetragen, die ganz unterschiedliche Aspekte des Unterrichts zur Energie beleuchten. Den Auftakt machen zwei Beiträge zu fachdidaktischen Hintergründen. *Hopf* und *Becker* beantworten zum Beginn des Heftes die Fragen zur Energie, die Sie sich vielleicht noch nie getraut haben zu stellen. Wie Sie sehen werden, ist der Energiebegriff um einiges komplexer als man zunächst annehmen würde und sie werden als Lehrkraft einige Entscheidungen treffen müssen, wenn Sie das nächste Mal Energie unterrichten. Im zweiten Beitrag des Heftes gehen *Becker* und *Hopf* noch einen Schritt weiter und erklären, weshalb ein Unterricht über Energie auf Feldern aufbauen sollte (zumindest in der Oberstufe) und weshalb viele Begrifflichkeiten der Sekundarstufe I, wie z. B. die Zuschreibung von potenzieller Energie zu einem Objekt, irreführend sind.



*Martin Hopf*



*Manuel Becker*

Im zweiten Block des Heftes werden vier Unterrichtskonzeptionen vorgestellt. Zunächst erläutern *Fiedler*, *Kubsch*, *Neumann* und *Nordine*, wie man schon in der Sekundarstufe I einen Energieunterricht auf Feldern aufbauen und so die potenzielle Energie physikalisch sinnvoll beschreiben kann. Danach erklären *Kubsch* und *Nordine* den System-Transfer-Ansatz. Er beruht darauf, dass man nicht mehr Energieformen thematisiert, sondern den Transfer von Energie zwischen Systemen erläutert. *Becker* stellt anschließend den EFA, den Energie-Feld-Ansatz vor. Das ist eine Unterrichtskonzeption für die Sek. II, die die Energie auf kinetische Energie und Energie in Feldern zurückführt. Wie sich herausstellt, können so sogar Aspekte der modernen Physik wie das Gluonenfeld oder das Higgsfeld im Unterricht sinnvoll thematisiert werden. Der EFA wurde im Rahmen einer fachdidaktischen Dissertation an der Universität Wien entwickelt und umfangreich empirisch erprobt. *Daane*, *Wells*, *Scherr* und *Harrer* erläutern abschließend das „Energie-theater“. Bei dieser Methode erarbeiten sich Schüler:innen eine Szene zu einer Energieumwandlung, in der sie die verschiedenen Energieportionen und deren Umwandlungen darstellen.

Den Abschluss des Heftes bilden zwei Beiträge zu unterrichtspraktischen Ideen. *Becker* und *Hull* stellen das BB-Bag vor. Das ist ein Analogieversuch zu submikroskopischen Vorgängen im idealen Gas. *Haglund* und *Samuelsson* diskutieren schließlich den Einsatz von IR-Kameras im Energieunterricht, auch über die Physik hinaus.

Wir wünschen viel Spaß bei der Lektüre und hoffen, Sie finden viele Anregungen für Ihren Unterricht.

**Martin Hopf und Manuel Becker**

# Was ich immer schon über Energie wissen wollte...

Martin Hopf und Manuel Becker

## 1. Was ist Energie?

Wenn es doch nur eine leichte Antwort auf die Frage gäbe, was denn Energie ist... Seit langer Zeit plagen wir Physiker:innen uns damit herum, bestehende Definitionen zu kritisieren und mit neuen Definitionen die – verblüffend sperrige – Energie zu beschreiben. Das immer wieder verwendete Zitat von Richard Feynman dazu lautet: „It is important to realize that in physics today, we have no knowledge of what energy is.“ [1] Der Grund, warum wir – auch wenn wir nicht wissen, was Energie ist – in der Physik so viel damit anfangen können, ist der Energieerhaltungssatz. Also in aller Kürze: Wir wissen nicht, was Energie ist, aber sie ist erhalten. Und das ist in der Physik sehr nützlich.

Diese Erkenntnis ist ein Ergebnis der Arbeiten der Mathematikerin Emmy Noether (1882-1935). Das nach ihr benannte Theorem weist eine Beziehung zwischen Symmetrien und Erhaltungsgrößen nach. So ist die Impulserhaltung mit der Translationssymmetrie des Raums und die Drehimpulserhaltung mit der Rotationssymmetrie verbunden. Und aus der Homogenität der Zeit – also die Tatsache, dass der Ablauf eines Ereignisses nicht durch einen anderen Beginn verändert wird – folgt die Energieerhaltung. Oder um es genauer zu formulieren: Aus der Homogenität der Zeit lässt sich ableiten, dass es eine Größe  $E$  gibt, die erhalten ist. Diese Größe  $E$  nennen wir Energie.

Energie ist also eine **abstrakte Größe zur Bilanzierung**: Wir wissen, dass in einem abgeschlossenen System der Wert dieser Bilanzierungsgröße  $E$  weder zu- noch abnimmt. Für physikalische Betrachtungen ist das überaus hilfreich, denn eine Vielzahl von Problemen kann durch die Verwendung der Energieerhaltung gelöst werden.

Das hat auch schon Sexl konstatiert: „Es ist nicht möglich, den Energiebegriff mit Hilfe einer operationellen Definition einzuführen. Die Bedeutung der Energie liegt darin, daß [sic] sie eine Größe ist, die auch bei komplizierten Veränderungen innerhalb eines physikalischen Systems konstant bleibt. Die Konstanz der Energie während eines komplexen Bewegungsablaufs rechtfertigt also die Einführung dieser physikalischen Größe und nicht etwa ein besonders direkter Zusammenhang mit dem Experiment.“ [2]

Zurück zu den Definitionen: In vielen Lehrbüchern findet sich der Satz „Energie ist gespeicherte Arbeit“ oder andere Aussagen, die auf die Größe „Arbeit“ zurückgreifen, um die Energie einzuführen oder zu beschreiben. Wie die umfangreiche fachdidaktische Literatur zu diesem Thema übereinstimmend

berichtet, ist das wenigstens fragwürdig, wahrscheinlich sogar falsch und jedenfalls lernhinderlich [3]. Zum einen ist das ein Zugang, der stark darauf baut, mechanische Energie zu diskutieren. Dabei werden Energietransportprozesse durch Wärme und Strahlung u. a. außer Betracht gelassen. Zum anderen ist der Begriff der Arbeit selbst sehr komplex und wird oft falsch verstanden und angewendet.

Als Beispiel soll hier ein losfahrendes Auto dienen. Dabei muss man sich zunächst klar machen, welche (äußere!) Kraft das Auto beschleunigt. Der Motor (oder die Motorkraft) kann das ja nicht sein, da es sich hierbei nicht um eine äußere Kraft handelt. Als äußere Kraft kommt nur die Reibungskraft zwischen Reifen und Erdboden in Frage. Dass dies die zu betrachtende Kraft ist, wird auch dadurch klar, dass man bei Glatteis nicht beschleunigen kann. Nun können energetische Betrachtungen folgen. Dabei wird schnell klar, dass die Reibungskraft keine Arbeit am Auto verrichten kann. Das liegt daran, dass sich der Angriffspunkt der Reibungskraft nicht entlang eines Weges verschiebt. Sogar die – richtig angewendete – einfache Formel für die Arbeit als Kraft mal Weg ergibt hier null. Das Auto beschleunigt also, ohne dass Arbeit an ihm verrichtet wird. Die kinetische Energie stammt aus einer Veränderung der chemischen Energie im Inneren des Fahrzeugs. Dass diese Überlegungen plausibel sind, zeigt auch Folgendes: Wenn die Reibungskraft Arbeit verrichten würde, würde das bedeuten, dass aus dem Boden Energie in das Auto übertragen werden müsste.

Dies gilt für alle selbstangetriebenen Dinge (Lebewesen, Fahrzeuge, etc.). In der Literatur werden oft noch andere Beispiele wie ein:e Skateboarder:in, die:der sich von der Wand abstößt oder der Sprung vom Boden aus senkrecht nach oben diskutiert [3].

Manchmal findet man eine andere, aber ähnlich problematische Aussage zur Arbeit: Arbeit ist Energie im Fluss. Wenn man das zur obigen Definition hinzunimmt, ergibt sich eine Tautologie: Energie ist gespeichert (Energie im Fluss). Auch das ist keine tragfähige Begrifflichkeit.

Aus Sicht der Fachdidaktik kann nur empfohlen werden, den Begriff der Arbeit aus dem schulischen Physikunterricht zu eliminieren. In den aktuellen Lehrplänen sowohl für die Sekundarstufe I als auch für die Oberstufe der AHS ist das bereits vollzogen worden. Das macht allerdings die Grundfrage danach, was Energie ist, um so dringlicher. Inwiefern die Konzeptualisierung von Energie als abstrakter Bilanzgröße für den Physikunterricht hilfreich ist, wird im Folgenden diskutiert.

## 2. Wie erklären wir, was Energie ist?

Über diese Frage wurde schon umfangreich nachgedacht und geschrieben. In aller Kürze gibt es unseres Wissens neben dem klassischen Weg über die Arbeit fünf verschiedene Ansätze.

### i) Gar nicht

Ein erster Zugang besteht darin, völlig auf eine Definition der Energie zu verzichten. Wie dargestellt, ist eine angemessene Definition sehr abstrakt und es gibt gute Gründe, Schüler:innen der Sekundarstufe I nicht damit zu verwirren. Bei diesem Ansatz ist vielmehr das Ziel, die verschiedenen Wirkungen von Energie zu beschreiben und mit unterschiedlichen Aspekten der Energie umzugehen. So bekommen die Lernenden ein immer besseres Gefühl für den Energiebegriff. Und es ist ja auch weder notwendig noch angemessen, eine vollständige, axiomatische Einführung der Physik in der Schule zu präsentieren.

### ii) Philosophisch

Der erste Zugang mag für manche von uns reizvoll, aber unbefriedigend erscheinen. Papadouris und Constantinou [4] schlagen hier eine Erweiterung vor. Auch sie geben den Lernenden keine Definition der Energie, bieten aber gleichzeitig eine philosophische Begründung dafür an, weshalb es sinnvoll ist, die Energie einzuführen. Ausgehend von der Beobachtung von Vorgängen und einem Unterricht über die Natur der Naturwissenschaft (NOS) wird in diesem Zugang der Schwerpunkt auf die (gemeinsame) Interpretation von Veränderungen gelegt. Diese Veränderungen kommen in einer Vielzahl von physikalischen Systemen aus verschiedenen Bereichen der Physik vor. NOS erklärt, dass Physik eben genau so arbeitet und für die Interpretation all dieser Veränderungen von Systemen einen theoretischen Rahmen findet. So ein theoretischer Rahmen ist das Konzept der Energie. Energie wird also als theoretische (und daher nicht beobachtbare und nicht materielle) Entität eingeführt, die in dieser Hinsicht eine nützliche Rolle spielen könnte.

### iii) Energie als universeller Treibstoff

Ein ganz anderer Ansatz basiert darauf, Energie als universellen Treibstoff aufzufassen, also als das, was allen verschiedenen „Treibstoffen“ wie Benzin, Gas, Nahrung usw. gemein ist. Energie ist damit die „Währung“, mit der verglichen werden kann, wie viel Nützliches mit einem Treibstoff hervorgerufen werden kann, also z. B. wie weit man mit einer Tankfüllung fahren oder wie hoch man mit einem Schokoriegel steigen kann. Dieser Ansatz ist sehr kompatibel zur Deutung von Energie im Alltag und in anderen Naturwissenschaften.

Elaboriertere Umsetzungen dieser Idee unterscheiden dann zwischen Energie und Energieträgern. Energieträger sind die konkreten „Treibstoffe“ wie Benzin, Schokoriegel usw., die chemische Energie enthalten.

### iv) Energie als etwas, das warm macht.

Ogborn gibt eine weitere Konzeptualisierung von Energie an [5]. Aus der Erfahrung, dass ein kalter Gegenstand

wärmer wird, wenn er in thermischem Kontakt mit einem anderen Gegenstand höherer Temperatur ist, kann eine quasistoffliche Erfahrung der Wärme abgeleitet werden und so die Energie in einem kalorimetrischen Kontext eingeführt werden. Unseres Wissens ist dieser Zugang im deutschen Sprachraum nie genauer ausgearbeitet worden. Der Ansatz hat aber Potenzial und sollte einmal genauer durchdacht werden.

### v) Energieerhaltung als Ausgangspunkt

Ein weiterer Zugang zur Energie besteht darin, die Energieerhaltung an den Beginn zu stellen. Dabei werden bewusst Phänomene vorgestellt, in denen (fast) direkt die Energieerhaltung zu beobachten ist; bekannt ist hier das Wagenschein- bzw. Lewin-Pendel: Eine schwere Pendelmasse (Kegelkugel) hängt an einem langen Seil. Sie wird bis ans Kinn des:r Experimentierenden ausgelenkt und dann losgelassen. Für die Zusehenden ist immer wieder beeindruckend, dass das Pendel (fast) bis zum Ausgangspunkt zurückschwingt. Daraus kann dann die Erhaltung von Energie plausibel gemacht werden. Letztlich wird in diesem Zugang der bilanzierende und abstrakte Charakter der Energie in den Mittelpunkt des Unterrichts gestellt.

Diese Vielfalt an Möglichkeiten erfordert eine Entscheidung der Lehrperson. Unserer Einschätzung nach sind sie untereinander wenig kompatibel. Für den konkreten Unterricht wird man sich also – je nach Schulstufe, Alter der Lernenden, Vorwissen der Klasse u. v. a. m. – entscheiden müssen, welche Konzeption man am tragfähigsten und vielversprechendsten hält. Der österreichische Lehrplan lässt hier viele Freiheiten.

## 3. Wesentliche Eigenschaften der Energie

Für den Unterricht ist es empfehlenswert, sich die Key Ideas, also die wesentlichen Kernaussagen bzw. Ideen eines Konzepts klarzumachen. In der Regel wird man als Lehrer:in auch entscheiden müssen, welche davon besonders wichtig sind und mit entsprechender Wertigkeit im Unterricht vorkommen und welche eher nachrangig behandelt werden sollen. Für die Energie haben sich die Key Ideas der „Quadrige“ nach Duit bewährt (Abb. 1). [6]

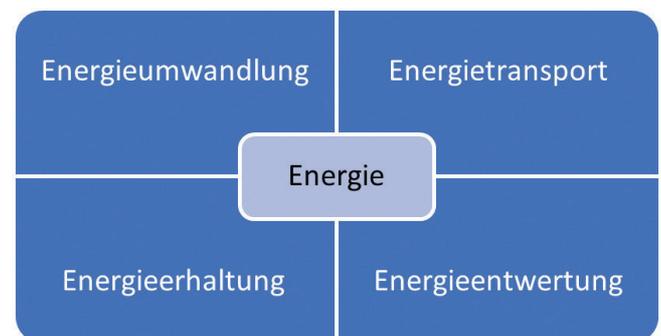


Abbildung 1: Energiequadrige nach Duit

**Energieumwandlung:** Es gibt verschiedene Energieformen. Diese können ineinander umgewandelt werden.

**Energietransport:** Energie kann von einem zu einem anderen System transportiert werden.

**Energieerhaltung:** Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems bleibt konstant.

**Energieentwertung:** Manche Energieformen können leichter von uns genutzt werden als andere. Auch wenn die Gesamtenergie erhalten bleibt, kann sich der „Nutzwert“ der Energie verändern. Man sagt: Energie kann entwertet werden.

Hier wird klar, dass verschiedene Konzeptualisierungen der Energie unterschiedliche Gewichte für die Elemente der Quadriga beinhalten. So wird eine Konzeptualisierung von Energie als universeller Treibstoff stärker auf Energieumwandlung, Energietransport und Energieentwertung fokussieren als eine Konzeptualisierung von Energie als Bilanzgröße.

Es ist also zu erwarten, dass der Unterricht je nach Wahl des Unterrichtsgangs unterschiedliche Aspekte betont und damit auch das Lernen der Schüler:innen beeinflusst. Auch wenn empirische Arbeiten zum traditionellen Energieunterricht zeigen, dass Energieerhaltung weniger verstanden wird als Energieformen, könnten andere Konzeptionen Abhilfe schaffen. Mit solchen Ansätzen könnte ein besseres Verständnis der Energie erzielt werden, als das bisher der Fall war.

#### 4. Schüler:innenvorstellungen

Wesentlich für einen erfolgreichen Physikunterricht ist die Berücksichtigung bekannter Schüler:innenvorstellungen. Beim Thema Energie ist dabei u. a. mit folgenden problematischen Vorstellungen zu rechnen:

- Energie wird verbraucht.
- Energie geht verloren.
- Energie braucht man, um etwas zu bewirken.
- Energie wird durch einen Stoff von A nach B gebracht.
- Energie bleibt nur unter idealen Bedingungen erhalten.
- Energie und Energieträger werden verwechselt.

Eine ausführlichere Darstellung ist bei Schecker und Duit (2018) zu finden. [7]

#### 5. Auf welche Unterrichtskonzeptionen kann ich zurückgreifen?

In den letzten Jahren hat sich immer mehr herausgestellt, dass Unterrichtskonzeptionen, die von einer Leitidee ausgehen und einen Vorschlag für die Gestaltung von Physikunterricht machen sowie oft empirisch überprüft sind, eine wesentliche

Hilfe für die Schulpraxis darstellen können. Auch zum Energieunterricht liegen solche Konzeptionen vor. Einige davon sind in der Literatur beschrieben [8], andere sind im vorliegenden Heft dargestellt [9]. Unseres Wissens existieren wenigstens folgende Konzeptionen:

- **Energieentwertung:** Ausgehend von einem alltäglichen Energiebegriff werden Schüler:innen zu einem physikalisch angemessenen Verständnis geführt. [8]
- **Energieerhaltung im Mittelpunkt:** Ausgangspunkt ist, dass eine physikalische Größe erhalten ist. Diese wird Energie genannt. Erst danach werden Energieformen erarbeitet. [8]
- **Energie im sinnstiftenden Kontext:** Hier wird stark an Alltagserfahrungen der Schüler:innen angeknüpft. Als einzige uns bekannte Unterrichtskonzeption ist es hier auch möglich, den Energiebegriff stark in der Elektrizitätslehre zu verorten. [8]
- **System-Transfer-Ansatz:** Es werden keine Energieformen betrachtet. Vielmehr rücken die zwischen wechselwirkenden Systemen ablaufenden Energietransfers in den Mittelpunkt. [9]
- **Energy Theater:** Schüler:innen erarbeiten sich den Energiebegriff durch theatrale Methoden. [9]
- **Energie mit Feldern:** Hier wird bereits in der Sek. I ein Energieunterricht auf Feldern aufgebaut. [9]
- **Energie-Feld-Ansatz:** Diese Konzeption für die Sek. II beschreibt Phänomene aussagekräftig nur durch kinetische Energie und Energie in Feldern. [9]

Daneben gibt es eine Vielzahl von Ausarbeitungen in Schulbüchern, die z. T. sehr unterschiedlichen Leitideen folgen sowie den Karlsruher Physikkurs [8]. Auch hier wird man als Lehrperson entscheiden müssen, ob und wenn ja welche Unterrichtskonzeption den eigenen Vorstellungen zu Konzeptualisierung und Gewichtung der Leitideen nahekommt.

#### 6. Zusammenfassung

Energie ist eine viel komplexere physikalische Größe als es zunächst den Anschein macht. Schon eine Definition der Energie ist – mindestens für den Physikunterricht – sperrig und man hat eine Vielzahl von Möglichkeiten der Schwerpunktsetzung. Die verschiedenen Unterrichtskonzeptionen unterscheiden sich zum Teil erheblich voneinander. Empfehlen kann man hier nur, eigene Erfahrungen zu sammeln, sich über Probleme bewusst zu werden und immer wieder über erreichte Ziele und mögliche Alternativen zu reflektieren.

---

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf *Universität Wien, Physikdidaktik*  
Dr. Manuel Becker *Universität Wien, AECC Physik*

## Literatur

- [1] Feynman Lectures zitiert nach Leifiphysik <https://www.leifiphysik.de/mechanik/arbeit-energie-und-leistung/ausblick/feynman-zum-energiebegriff>
- [2] Sexl, R. U. (1979). Bemerkungen zur Didaktik des Energiebegriffs. *Physik und Didaktik* 3, 179-182.
- [3] z. B. Bauman, R. P. (1992). Physics that textbook writers usually get wrong. *The Physics Teacher*, 30(5), 264-269, Jewett Jr, J. W. (2008). Energy and the confused student I: Work. *The Physics Teacher*, 46(1), 38-43 oder Müller, Rainer. *Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug*, Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2021. <https://doi.org/10.1515/9783110730784>
- [4] Papadouris, N., & Constantinou, C. P. (2011). A philosophically informed teaching proposal on the topic of energy for students aged 11-14. *Science & Education*, 20(10), 961-979.
- [5] Ogborn, N. J. (1983). Unterricht über Energie. *physica didactica*, 17, 17-36.
- [6] Duit, R. (1991). Zur Elementarisierung des Energiebegriffs. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik*, 2 (6), 12-19.
- [7] Schecker, H. & Duit, R. (2018). Schülervorstellungen zu Energie und Wärmekraftmaschinen. In: Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (Hrsg.) *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2_8)
- [8] Starauschek, E. & Schecker, H. (2021). Unterrichtskonzeptionen zur Energie und Wärme. In: Wilhelm, T., Schecker, H. & Hopf, M. (Hrsg.) *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2_6)
- [9] Siehe die Artikel von Fiedler, Kubsch, Neumann und Nordine, Kubsch und Nordine, Becker sowie Daane, Wells, Scherr und Harrer im vorliegenden Heft.

# Das Problem mit den Energieformen

## Warum man Energie über Felder unterrichten sollte

Manuel Becker

### 1. Warum Energie über Felder unterrichten?

Die Konzepte Energie und Felder zu kombinieren, wirkt aus Sicht der Lehrenden auf den ersten Blick wie eine überfordernde Herausforderung und unzumutbar für die Schüler:innen. Das sind zwei abstrakte Konzepte, die beide für sich genommen Schwierigkeiten mit sich bringen und beim Unterrichten bereits große Sorgfalt fordern. Tatsächlich zeigt die bisherige didaktische Forschung aber, dass beide Konzepte sehr gut miteinander kombiniert werden können und dies ein angemessenes Energieverständnis sogar fördert [1]. Die Verknüpfung mit Feldern stellt eine Alternative zum traditionellen Unterricht über Energieformen dar.

Fachwissenschaftlich gesehen ergibt es mehr Sinn, Energie über Felder zu unterrichten anstatt über Energieformen. Helen Quinn hat dazu bereits 2014 Stellung genommen und die einzelnen Energieformen aus einer kritischen Perspektive der Physik beleuchtet [2]. Dabei zeigt sich, dass die Kategorisierung der Energie in Energieformen verschiedene Probleme mit sich bringt. Hier wollen wir drei konkrete Beispiele betrachten: die potenzielle und die chemische Energie sowie die allgemeine Zuordnung absoluter Energie zu den Energieformen.

### 2. Potenzielle Energie

Der Begriff „potenzielle Energie“ wird in vielen Kontexten verwendet. Oft wird er von Lernenden fälschlicherweise auch mit dem „Potenzial, Energie zu besitzen“ verwechselt. Im Unterricht wird in den meisten Fällen damit die elektrische Energie, z. B. eines Kondensators, oder die mechanische Energie der Lage bezeichnet. Analysiert man letztere Form, ergibt sich ein fundamentales konzeptionelles Problem:

Wir betrachten als Beispiel ein in der Hand gehaltenes Buch, kurz vor dem Herunterfallen (Abb. 1). Traditionell würde man diesem aufgrund seiner Position  $h$  über dem Boden eine bestimmte Lageenergie zuordnen. Wenn es herunterfällt, wird diese Energie in kinetische Energie umgewandelt. Man würde im Unterricht oft hören „das Buch besitzt die Lageenergie  $m \cdot g \cdot h$ “. Diese Formulierung ist aber sehr problematisch, denn diese Energie dem Buch allein zuzuschreiben, macht keinen Sinn. Was ändert sich, wenn sich unter dem Buch ein Tisch befände? Oder wenn das Buch nicht auf den Boden, sondern durch einen Spalt in den Keller fliehe: hätte es dann keine bzw. eine andere Lageenergie? Dann würde die Energie vom Bezugspunkt, also dem Ende der Bewegung abhängen. Das führte dann sehr schnell zu einem Problem mit der



Abbildung 1: Dilemma der potenziellen Energie

Energieerhaltung, denn diese darf nicht vom betrachteten Bezugssystem abhängen.

Diese Problematik ergibt sich bereits in der Sekundarstufe I, setzt sich aber in den höheren Klassenstufen fort und generiert u. U. Lernschwierigkeiten. Man kann dem Problem ausweichen, indem man die Energie nicht dem Objekt, also dem Buch, selbst zuschreibt, sondern das Phänomen als Ganzes betrachtet: Das Buch befindet sich an einem beliebigen Ort im Raum. Es fällt herunter, weil sich Buch und Erde durch die Gravitation anziehen. Je nachdem, wo sich Tisch und Boden befinden, kann das Buch dann tief oder weniger tief fallen. Die Fallhöhe  $h$  hängt also von den zwei Bezugspunkten ab. Man schreibt deshalb auch meist nicht  $h$ , sondern  $\Delta h$ . Aber selbst dann genügt es nicht, die Energie dem Buch oder der Erde zuzuschreiben. Erst, wenn man das System als Ganzes betrachtet, wird die Beschreibung richtig. Es ist also erst dann korrekt, wenn man sagt, dass das System Buch und Erde eine bestimmte potenzielle Energie besitzt. Diese Energie ergibt sich allgemein aus der anziehenden oder abstoßenden Kraft  $F$  zweier Objekte und dem Abstand  $r$  zwischen ihnen aus dem Integral über den Weg:

$$E = \int \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (1)$$

Wenn sich Abstand oder Kraft verändern, verändert sich also auch die Energie; sie wird übertragen.

### 3. Chemische Energie

Bei der chemischen Energie verhält es sich ähnlich. Üblicherweise wird bei Umwandlungsprozessen von Materie, z. B. bei der Explosion eines Feuerwerks oder beim Verbrennen von Stoffen, davon gesprochen, dass chemische Energie umgewandelt wird. Hier ergeben sich zwei Fragen: Erstens, wo steckt diese chemische Energie? Und zweitens, wie groß ist sie?

Das Problem dabei ist, dass man diese Fragen nicht so einfach umfassend beantworten kann. Denn die Energie

steckt in der Verbindung der Atome und Moleküle. Sie ist eine Kombination aus innerer Energie, thermischer Energie, Bindungsenergie, elektrischer und magnetischer Energie. Also eine Mischung verschiedener Energieformen, die – je nach Umwandlungsprozess – im Unterricht verschieden bezeichnet werden. Je nachdem, welche Umwandlung die Molekülstruktur des Stoffes durchläuft, gibt es unterschiedliche Energieumwandlungen. Man kann dies zwar fachlich meist der elektromagnetischen Wechselwirkung zuordnen, die in der Schule verwendeten Bezeichnungen sind hier aber inkonsistent.

Das zweite Problem ergibt sich bei der Bestimmung der Energiemenge. Wie bereits bei der potenziellen Energie kommt es auch bei der chemischen Energie auf die Konstellation der Atome und damit Ladungen untereinander an. Je nach Konstellation ist die Energie anders, die bei verschiedenen Prozessen frei werden kann. Es ist also nicht sinnvoll, einer bestimmten Konstellation eine bestimmte „absolute Energie“ zuzuordnen [2]. Vielmehr wäre es sinnvoll, nur die Änderung der Energie bei einem bestimmten Prozess zu betrachten. Dabei vergleicht man Anfangs- und Endzustand. Durch den Vergleich kann man dann eine Energiedifferenz  $\Delta E$  bestimmen, die sich aus dem Prozess ergibt und frei wird oder dem System zugeführt werden muss. Wie Quinn bereits ausführte, ist dies meist auch der Teil, den wir betrachten wollen.

#### 4. Absolute Energie vs. Energietransfer

Absolute Energien zuzuordnen und zu bestimmen ist also in vielen Fällen nicht möglich und auch nicht zielführend. Wie bereits in den zwei obigen Beispielen ausgeführt, ist es nicht sinnvoll, bestimmten Objekten oder Konstellationen einen Energiewert zuzuordnen. Vielmehr ist es ratsam, über den Transfer von Energien zu sprechen und über das Aufstellen einer Energiebilanz die Veränderungen zu beschreiben. Hält man sich an die von Duit eingeführte Energiequadrige, spielen Übertragung/Transfer, Umwandlung, Erhaltung und Dissipation von Energie die zentralen Rollen bei der Betrachtung von Phänomenen aus der Energieperspektive [3,4]. Insbesondere die Übertragung von einem auf das andere

System benötigen wir, um Prozesse zu beschreiben. Dazu ist dann  $\Delta E$  notwendig und nicht  $E$ :

$$\Delta E = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r} \quad (2)$$

Auch bei anderen Energieformen interessieren wir uns im Unterricht meist nicht für die absolute Energie, sondern für den Teil, der übertragen oder „freigesetzt“ werden kann. Bei der thermischen Energie beispielsweise ist nicht entscheidend, wie schnell sich die Teilchen und Moleküle bewegen und wie viel Energie in Summe in einem System steckt, z. B. in einem bestimmten Gasvolumen. Stattdessen interessieren uns die Differenzen von Temperatur und Energie, um ablaufende Prozesse energetisch zu beschreiben.

Die Idee, sich im Energieunterricht nur auf den Transfer von Energie zu konzentrieren, wird auch im „System-Transfer-Ansatz“ von Fortus et al. aufgegriffen und dort in einer erprobten Unterrichtskonzeption zum Thema Energie für den Unterricht der Mittelstufe aufbereitet [5].

#### 5. Abhilfe durch Felder

Eine Möglichkeit, dem Zuordnungsproblem von Energie zu begegnen, ist die Verknüpfung von Formen potenzieller Energie mit Feldern. In den Fällen von Lageenergie, elektrischer oder magnetischer Energie ist es möglich, die zu Grunde liegende Wechselwirkung zu betrachten. Man betrachtet das wechselwirkende System, also zwei Massen, Ladungen oder Magnete und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte. Aufgrund dieser Kräfte wird bei Abstandsänderung Energie übertragen (s. Formel 2). Auf diese Weise kann man die Veränderung von Feldern als Gesamtkonstellation von Objekten und Kräften betrachten, um Phänomene zu beschreiben. Die Energiebetrachtung ist dann sinnhafter und aussagekräftiger als die Zuschreibung einzelner Energien zu Objekten.

---

Dr. Manuel Becker *Universität Wien, AECC Physik*

#### Literatur

- [1] Nordine J, Fortus D, Lehavi Y, Neumann K und Krajcik J. (2019). Modelling energy transfers between systems to support energy knowledge in use. *Studies in Science Education*, 54(2), 177-206.
- [2] Quinn H. (2014) A physicist's musings on teaching about energy. In: Chen RF et al. (Hrsg.). *Teaching and learning of energy in K-12 education*. NY Springer, 15-36.
- [3] Duit R. (1991) Zur Elementarisierung des Energiebegriffs. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik*, 2(6), 12-19.
- [4] Duit R. (2007). Energie. Ein zentraler Begriff der Naturwissenschaften und des Naturwissenschaftlichen Unterrichts. *Unterricht Physik*. 18(101), 4-7.
- [5] Fortus, D, Kubsch, M, Bielik, T, et al. (2019). Systems, transfer, and fields: Evaluating a new approach to energy instruction. *J Res Sci Teach*. 56, 1341-1361. <https://doi.org/10.1002/tea.21556>

# Der potentiellen Energie ein Zuhause geben

## Eine Unterrichtseinheit zur Einführung des Energiekonzeptes mit Feldern

Kristin Fiedler, Marcus Kubsch, Knut Neumann und Jeffrey Nordine

Das Energiekonzept ist ein zentrales Konzept der Physik. Es kann nicht nur helfen, Phänomene innerhalb einzelner Sachgebiete (z. B. der Mechanik), sondern auch über Sachgebiete hinweg zu verstehen. Darüber hinaus hilft das Energiekonzept, zentrale Herausforderungen des 21. Jahrhunderts wie den Klimawandel zu verstehen und einen informierten Standpunkt dazu zu entwickeln. Die Bedeutung des Energiekonzeptes steht im Widerspruch zu den Schwierigkeiten, die Schüler:innen mit dem Verständnis des Energiekonzeptes haben. Studien zeigen, dass Schüler:innen selbst am Ende der Sekundarstufe I häufig nicht über ein ausreichendes Verständnis des Energiekonzeptes verfügen; insbesondere die Erhaltung der Energie scheint ihnen Probleme zu bereiten [1]. In der Literatur werden als mögliche Ursache Schwierigkeiten mit der potentiellen Energie angeführt [2]. Neben der kinetischen Energie ist die potentielle Energie zentral für die Entwicklung des Verständnisses des Energiekonzeptes. Dies liegt darin begründet, dass sich die meisten Phänomene über die Umwandlung zwischen kinetischer und potentieller Energie beschreiben lassen. Ohne die potentielle Energie kann das Energiekonzept nicht sinnvoll zur Erklärung von Phänomenen genutzt werden. In diesem Beitrag wird ein Unterrichtsansatz vorgestellt, der darauf zielt, die Schwierigkeiten mit der potentiellen Energie zu beheben.

### 1. Verständnisschwierigkeiten mit der potentiellen Energie

In der fachdidaktischen Literatur sind die Probleme der Lernenden mit der potentiellen Energie gut dokumentiert: Die Schüler:innen haben Schwierigkeiten mit der schlechten Beobachtbarkeit der potentiellen Energie. Während die Schüler:innen kinetische Energie leicht daran erkennen können, dass sich ein Objekt bewegt, sieht man einem angehobenen Ball die Energie jedoch nicht an. Die potentielle Energie erscheint den Schüler:innen versteckt. Am höchsten Punkt eines Pendels scheint die Energie für Schüler:innen sogar ganz verschwunden, weil sich nichts mehr bewegt. Sie zeigt sich erst, wenn sie in kinetische Energie umgewandelt wird. Potentielle Energie erscheint den Schüler:innen wegen ihrer schlechten Beobachtbarkeit wenig real [3].

Nicht nur die schlechte Beobachtbarkeit der potentiellen Energie ist schwierig für Schüler:innen, sondern auch ihre Lokalisierung. Die Lernenden schreiben Energie Objekten zu, die in der Lage sind, etwas zu tun, z. B. Magneten, die Objekte aus Eisen anziehen können. Aus dieser Zuschreibung der potentiellen Energie zu Objekten resultieren insbesondere zwei Schwierigkeiten: (1) Die Lernenden sehen die potentielle

Energie häufig fälschlicherweise als in einem Objekt gespeichert an. (2) Deswegen haben sie Schwierigkeiten mit der Wahl des für die potentielle Energie besonders wichtigen richtigen Bezugspunktes. Für eine korrekte Quantifizierung der potentiellen Energie ist es notwendig, mindestens zwei Objekte und ihre Konfiguration zu betrachten. Es macht für die Quantifizierung der potentiellen Energie einen Unterschied, ob ich z. B. einen Ball aus dem zweiten Stock eines Hauses auf den Erdboden fallen lasse, oder ob ich den Ball aus der gleichen Höhe auf den Fußboden des zweiten Stocks fallen lasse. Der Bezugspunkt ändert sich vom Erdboden zum Fußboden im zweiten Stock.

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

Eine Möglichkeit, diesen Problemen zu begegnen, ist die Integration von Feldern in den Energieunterricht. Mit Feldern kann die potentielle Energie als in Feldern zwischen interagierenden Objekten gespeicherte Energie konzeptualisiert werden. Felder helfen dabei, potentielle Energie für die Lernenden greifbarer zu machen, denn sie ist nicht länger versteckt, sondern in einem Feld gespeichert [4,5]. Wird beispielsweise ein Ball angehoben, wird Energie in Form von potentieller Energie im Gravitationsfeld zwischen Ball und Erde gespeichert. Das Stoppen eines Pendels am höchsten Punkt lässt sich mit Feldern folgendermaßen erklären: Auf dem Weg nach oben wird die kinetische Energie in potentielle Energie umgewandelt. Diese wird im Gravitationsfeld gespeichert. Bewegt sich das Pendel wieder nach unten, wird die potentielle Energie aus dem Gravitationsfeld genommen und in kinetische Energie umgewandelt. Felder können die Schüler:innen damit dabei unterstützen, potentielle Energie adäquat zu lokalisieren, denn **Felder geben der potentiellen Energie ein Zuhause**.

Felder im Physikunterricht der Sekundarstufe I einzuführen, mag auf den ersten Blick gewagt erscheinen. Die Schwierigkeiten, die Schüler:innen mit Feldern haben, sind gut belegt. Die Lernenden verwechseln Kraft und Feldstärke und halten Feldlinien für real [6,7]. Felder werden hier oft mit dem Magnetfeld eingeführt. Sie bleiben dort jedoch häufig nutzlos, da sie eher als Phänomen betrachtet werden, anstatt dass sie zur Erklärung von Phänomenen herangezogen werden. Formal-mathematisch werden Felder in der Oberstufe als Verteilung einer physikalischen Größe im Raum, d. h. als Vektorfeld eingeführt. Diese Einführung des Feldes als mathematisches Konstrukt könnte ein Grund für die Schwierigkeiten der Schüler:innen mit Feldern sein [8].

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

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

Eine Formulierung in für Schüler:innen angemessener Sprache zeigen die folgenden zentralen Ideen des Unterrichtsansatzes mit Feldern:

#### **Kasten 1: Zentrale Ideen des Unterrichtsansatzes mit Feldern**

Energie ist entweder in einem Objekt oder einem Feld gespeichert:

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

Felder vermitteln zwischen interagierenden Objekten:

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

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

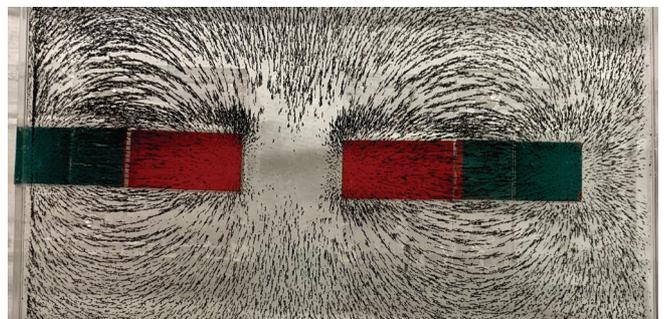
## **2.1 Die Wirkung der potentiellen Energie sichtbar machen**

Nähert man zwei Magnete einander an oder entfernt man sie voneinander, ändert sich die im Magnetfeld gespeicherte Energie. Mit der gespeicherten Energie ändert sich auch das Feldlinienbild. Diese Änderung kann mithilfe von Eisenfeilspänen oder einem Ferrofluid sichtbar gemacht werden. In Abbildung 1 ist dargestellt, wie die Änderung des Feldlinienbildes mithilfe von Eisenspänen sichtbar gemacht werden kann. Sie zeigt einen mit einer zähflüssigen Flüssigkeit gefüllten

Quader, in der Eisenfeilspäne schwimmen. Unter die Magnetfeldplatte sind Stabmagnete gelegt worden. Die Eisenfeilspäne haben sich im Magnetfeld ausgerichtet. In Abbildung 1a sind die beiden Magnete weit voneinander entfernt. In Abbildung 1b wurden die Magnete näher aneinander geschoben. Das Feldlinienbild hat sich geändert. Die Änderung der potentiellen Energie kann mithilfe dieses Phänomens für die Schüler:innen sichtbar gemacht werden.

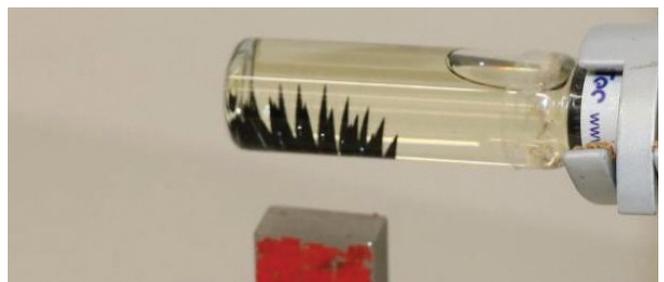


**Abbildung 1a:** Zwei Magnete unter einer Magnetfeldplatte, die weit voneinander entfernt sind



**Abbildung 1b:** Zwei Magnete unter einer Magnetfeldplatte, die nah beieinander sind

Alternativ oder auch ergänzend kann ein Ferrofluid genutzt werden, um eine Änderung der potentiellen Energie sichtbar zu machen. Abbildung 2a/b zeigt eine Ferrofluidflasche. Sie besteht aus einem Quader, der mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, in der Nano-Eisenpartikel schwimmen. Die Ferrofluidflasche wird über einen Stabmagneten gehalten. Ein zweiter Stabmagnet wird über die Ferrofluidflasche gehalten. Die Eisenpartikel haben sich im Magnetfeld ausgerichtet. In Abbildung 2a sind die beiden Stabmagnete weit voneinander entfernt. Der obere Stabmagnet ist im Bild nicht zu sehen. In Abbildung 2b wurde der obere Stabmagnet dem unteren genähert. Das Ferrofluid ist im Vergleich zu Abbildung 2a gestaucht und breitet sich zu den Seiten aus. Das Feldlinienbild hat sich geändert.



**Abbildung 2a:** Ein Magnet unter einer Ferrofluidflasche und ein Magnet darüber mit großem Abstand (nicht sichtbar im Bild)



**Abbildung 2b:** Ein Magnet unter einer Ferrofluidflasche und ein Magnet darüber mit geringem Abstand

## 2.2 Die Wirkung der potentiellen Energie fühlbar machen

Die Speicherung der potentiellen Energie kann nicht nur sichtbar gemacht werden, sondern auch fühlbar. Die Aktivierung eines weiteren Sinnes kann dazu beigetragen, dass potentielle Energie für Schüler:innen noch greifbarer und somit real wird. In Abbildung 3 sind Ringmagnete auf einer Führung so zueinander ausgerichtet, dass sie sich abstoßen. Drückt man den oberen Magneten näher an den unteren, spürt man einen Widerstand. Die Wirkung der Änderung der potentiellen Energie im Feld zwischen den Magneten kann für die Schüler:innen fühlbar gemacht werden.



**Abbildung 3:** Ringmagnete auf einer Führung

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

## 3. Eine Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern

Die Unterrichtseinheit zielt darauf ab, die Schwierigkeiten der Schüler:innen mit der potentiellen Energie mithilfe der Integration von Feldern bei diesen Energieformen zu adressieren. Die Unterrichtseinheit erstreckt sich über 8 Unterrichtsstunden und beinhaltet die Aspekte Energieformen (Bewegungsenergie, magnetische Energie, Lageenergie) und Energieumwandlung. Sie ist geeignet für den Anfangsunterricht zur Energie ab der

7. Schulstufe. Mit Blick auf die Eignung der Einheit für den Anfangsunterricht werden anstelle der abstrakten Begriffe der kinetischen Energie und der potentiellen Energie der Begriff Bewegungsenergie und für die beiden Vertreter der potentiellen Energie die Begriffe magnetische Energie und Lageenergie verwendet. Eine Übersicht über die Inhalte der Unterrichtseinheit zeigt Tabelle 1.

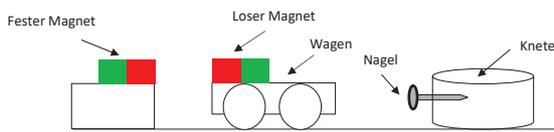
**Tabelle 1:** Übersicht über die Lerninhalte der Unterrichtseinheit zur Energie mit Feldern

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

Die übergeordnete Idee der Unterrichtseinheit lautet: Energie ist entweder in einem Objekt oder in einem Feld gespeichert (siehe Tabelle 1). Im Folgenden wird der Unterrichtsgang in Gänze vorgestellt. Es wird dabei auf die Beschreibung der Unterrichtsstunden 3-7 fokussiert. Diese beinhalten die Einführung des Feldes im Zusammenhang mit den Energieformen der magnetischen Energie und der Lageenergie. Die Unterrichtsmaterialien der gesamten Unterrichtseinheit können bei den Autor:innen angefordert werden.

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

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



**Abbildung 4:** Versuchsaufbau zur magnetischen Energie mit sich abstoßenden Magneten

Die Schüler:innen werden bei der Entwicklung einer Erklärung des Phänomens durch drei Fragen angeleitet: (a) ob zu Beginn und ob nach dem Loslassen Bewegungsenergie vorhanden ist, (b) wo die Energie herkommt bzw. wo sie vor dem Loslassen gespeichert ist und (c) woran man dies jeweils erkennt. Die Schüler:innen sollen erläutern, dass nur nach dem Loslassen Bewegungsenergie vorhanden ist, da der Wagen sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt. Bei der Frage, woher die Energie kommt, sind verschiedene Antworten der Lernenden denkbar. Eine (physikalisch falsche) Antwortmöglichkeit könnte sein, dass die Energie nur in einem der beiden Magnete gespeichert ist. Um dieser (falschen) Vorstellung zu begegnen, sollte den Lernenden aufgezeigt werden, dass ein einzelner Magnet, egal welcher, nicht ausreicht, damit sich der Wagen wegbewegt. Nur wenn beide Magnete vorhanden sind, bewegt sich der Wagen weg. Von magnetischer Energie zu sprechen macht folglich nur Sinn, wenn zwei Magnete interagieren. Um die Notwendigkeit der Betrachtung zweier magnetischer (oder magnetisierbarer) Objekte zu verdeutlichen, können weitere Phänomene wie z. B. sich abstoßende Ringmagnete auf einer Führung oder die Anziehung eisenhaltiger Objekte herangezogen werden. Zur Einführung des Magnetfeldes als Speicherort der magnetischen Energie wird die Aufmerksamkeit der Schüler:innen auf die vermittelnde Wirkung des Magnetfeldes gelenkt. Fragen wie z. B. „die Magnete interagieren, obwohl sie sich gar nicht berühren. Wie ist das möglich?“ können in dieser Phase als Impulse dienen. Es muss etwas zwischen den Magneten geben, das zwischen ihnen vermittelt. Dort muss auch die Energie gespeichert sein. diesen ihrer Alltagserfahrung oder aus vorangegangenem Unterricht ist den Lernenden das Magnetfeld meistens schon bekannt, so dass sie es an dieser Stelle als Vermittler und Speicherort der Energie auch nennen. Sollte das nicht der Fall sein, kann das, was zwischen den Magneten ist, also das Magnetfeld, durch seine Wirkung auf Eisenfeilspäne sichtbar gemacht werden. Es schließen sich die in den Abbildungen 1a/b und 2a/b dargestellten und in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschriebenen Phänomene an, die darauf abzielen, potentielle Energie für Schüler:innen greifbar zu machen.

Nach dieser Einführung des Magnetfeldes als Speicherort der magnetischen Energie im Unterrichtsgespräch soll das Phänomen des im Magnetfeld beschleunigten Magnetwagens experimentell untersucht werden. Die Lernenden untersuchen im Schüler:innenexperiment die Abhängigkeit der magnetischen Energie von der Stärke der Magneten und vom Abstand der Magneten. Sie nutzen den in Abbildung 4 dargestellten Versuchsaufbau mit befestigtem Magneten auf einem Block und losem Magneten auf einem Rollwagen. Die Lernenden

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

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

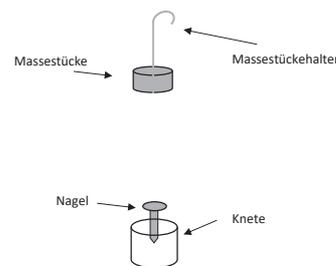
Zur Bestimmung der Lageenergie in einem Phänomen müssen immer zwei Objekte und deren Abstand betrachtet werden. Die Lageenergie ist für die Schüler:innen ein besonders herausfordernder Vertreter der potentiellen Energieformen. Schüler:innen übersehen leicht, dass ein zweites Objekt betrachtet werden muss. Dies könnte daran liegen, dass sie das Fallen von Objekten auf der Erde als zu selbstverständlich, zu alltäglich ansehen. Bei einem fallenden Ball zum Beispiel sehen die Lernenden häufig nicht die Notwendigkeit, ein zweites Objekt in die Erklärung miteinzubeziehen. Sie fokussieren bei der Erklärung des Phänomens auf den Ball allein. Darüber

hinaus fällt es den Lernenden schwer, die Referenzhöhe für den Abstand zu identifizieren. Wird beispielsweise ein Ball aus dem zweiten Stock eines Hauses fallen gelassen, dann ist die Referenzhöhe der Erdboden. Wird der Ball im zweiten Stock des Hauses jedoch auf den Fußboden im zweiten Stock fallengelassen, so ist die Referenzhöhe der Fußboden im zweiten Stock.

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

Im nächsten Schritt soll die Lageenergie eingeführt werden und das Gravitationsfeld als Speicherort der Lageenergie motiviert werden. Dafür wird ein Video gezeigt, das einen ähnlichen Bewegungsablauf zeigt wie das Video mit dem Magnetwagen. In diesem Video wird eine Kugel gezeigt, die wie der Magnetwagen zunächst gebremst wird, kurz stehen bleibt und dann wieder in die andere Richtung beschleunigt wird. Es handelt sich dabei um eine nach oben geworfene Kugel. Dieses bleibt den Schüler:innen jedoch zunächst verborgen, da das Video um 90° gedreht ist, so dass sich die Kugel zur Seite und nicht nach oben bewegt. Wie beim Magnetwagen werden die Schüler:innen gefragt, ob das Video etwas nicht zeigt, das für die Erklärung des Bewegungsablaufes wichtig ist,

bzw. ob an dem Video etwas merkwürdig ist. Die Schüler:innen erkennen schnell, dass das Video gedreht ist, und aufgrund des zur magnetischen Energie analogen Bewegungsablaufs und des analogen Impulses zur Identifikation des zweiten Objektes gelingt es ihnen, die Erde als fehlendes Objekt zu identifizieren. Zur Auflösung wird ein weiteres Video gezeigt, das den Ball in senkrechter Bewegungsrichtung und mit Erdboden zeigt. Zur Einführung der Lageenergie und des Gravitationsfeldes als Speicherort der Lageenergie können folgende Fragen bzw. Impulse verwendet werden: Erkläre, wie die Kugel und die Erde miteinander interagieren, ohne dass sie sich dabei berühren (mögliche Antwort: Da muss ein Feld zwischen Kugel und Erde sein, das zwischen den beiden vermittelt). Erkläre, wohin die Bewegungsenergie geht, wenn die Kugel langsamer wird bzw. woher sie kommt, wenn die Kugel schneller wird (mögliche Antwort: Die Energie wird in einem Feld gespeichert, wenn die Kugel langsamer wird, und sie wird aus diesem Feld entnommen, wenn die Kugel schneller wird). Nun kann die Lehrkraft die Lageenergie und das Gravitationsfeld folgendermaßen einführen: Die Energie ist im so genannten Gravitationsfeld zwischen Erde und Kugel gespeichert. Physiker:innen sprechen von Lageenergie. Anschließend soll das Phänomen eines fallenden Objektes im Gravitationsfeld der Erde betrachtet werden. Dafür nutzen die Schüler:innen den in Abbildung 5 dargestellten Versuchsaufbau. In Abbildung 5 sind Massestücke zu sehen, die fallen gelassen werden. Sie fallen auf einen Nagel, der zum Teil in Knete versenkt ist. Die Schüler:innen untersuchen mit diesem Versuchsaufbau experimentell die Abhängigkeit der Lageenergie von der Masse des angehobenen Objektes und dem Abstand des Objektes von seiner Referenzhöhe.



**Abbildung 5:** Versuchsaufbau zur Lageenergie

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

Am Ende der sechsten Unterrichtsstunde zur Lageenergie sollen die Schüler:innen gelernt haben, dass (1) das Gravitationsfeld zwischen Objekten und der Erde vermittelt,

(2) das Gravitationsfeld Lageenergie speichert und die Menge an gespeicherter Lageenergie vom Abstand des Objektes vom zweiten Objekt und von der Masse des angehobenen Objektes abhängt. Diese beiden Prinzipien, die Felder mit potentieller Energie am Beispiel der Lageenergie verknüpfen, sollen im nächsten Unterrichtsschritt in der siebten Unterrichtsstunde verallgemeinert werden. Durch einen Vergleich der Phänomene zur magnetischen Energie und zur Lageenergie und einen Vergleich der zugehörigen Felder soll den Schüler:innen verdeutlicht werden, dass magnetische Energie und Lageenergie Vertreter ein und derselben Energieform sind, nämlich potentieller Energie. Es soll den Lernenden bewusst gemacht werden, dass sie alle Formen der potentiellen Energie durch zwei grundlegende Prinzipien verstehen können:

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

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

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

Die Evaluierung der Unterrichtseinheit deutet darauf hin, dass die Integration von Feldern die Schüler:innen dabei unterstützen kann, Energie besser zu verstehen [9]. Dabei ist es besonders wichtig, die Verknüpfung der potentiellen Energie mit Feldern den Schüler:innen wiederholt begreiflich zu machen. Die Einführung der potentiellen Energie mit Feldern bringt den Vorteil mit sich, dass die bei der Einführung der potentiellen Energie mit Feldern etablierten Prinzipien für alle Formen der potentiellen Energie anwendbar sind. Dies erleichtert den Schüler:innen das Erlernen von ihnen bis dahin unbekanntem Vertretern der potentiellen Energie. Haben sie die grundlegenden Prinzipien der potentiellen Energie (d. h., sie ist in einem Feld gespeichert und die Menge an gespeicherter Energie hängt vom Abstand der Objekte ab) verstanden, wird ihnen auch das fortgeführte Lernen über Energie erleichtert [10].

### Danksagung

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

**Kristin Fiedler** *Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN), Kiel*

**Marcus Kubsch** *Freie Universität Berlin*

**Knut Neumann** *Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN), Kiel*

**Jeffrey Nordine** *Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN), Kiel und College of Education, University of Iowa*

### Literatur

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Hecht, E. (2003). An Historico-Critical Account of Potential Energy. Is PE Really Real? *The Physics Teacher* 41(8), 486-493.
- [4] Swackhamer, G. (2005). Cognitive resources for understanding energy.
- [5] Quinn, H. R. (2014). A physicist's musings on teaching about energy. In *Teaching and learning of energy in K-12 education* (pp. 15-36). Cham: Springer International Publishing.
- [6] Guisasola, 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.
- [7] Pocić, 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.
- [8] Greca, I. M. & Moreira, M. A. (1997). The kinds of mental representation – models, propositions and images – used by college physics students regarding the concept of field. *Int. J. Sc. Ed.* 19(6), 711-724.
- [9] Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K. & Nordine, J. (2022). Der potentiellen Energie ein Zuhause geben – Felder als didaktisches Hilfsmittel im Anfangsunterricht zum Energiekonzept. *ZfDN* 28(1), 1137.
- [10] Fiedler, K., Kubsch, M., Neumann, K. & Nordine, J. (2023). Fields in middle school energy instruction to support continued learning of energy. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1).

# Auf das System kommt es an

## Der System-Transfer Ansatz

Marcus Kubsch und Jeffrey Nordine

### 1. Einleitung

Das Energiekonzept spielt eine zentrale Rolle für ein Verständnis vielfältiger Phänomene – vom Klimawandel hin zum Aufbau der Atome. Darüber hinaus ist das Energiekonzept ein mächtiges Werkzeug um Phänomene zu modellieren und physikalische Fragestellungen zu beantworten [1]. Viele Lernenden erreichen allerdings kein hinreichendes Verständnis des Energiekonzepts um es entsprechend anwenden zu können [2,3]. Eine zentrale Schwierigkeit bei der Anwendung des Energiekonzepts für Lernende ist dabei der inhärent systemische Charakter der Energie [4,5]. Während jede Anwendung des Energiekonzepts die Wahl eines Systems erfordert und eine der Erkenntnisse, die ein Blick durch die „Energiefenster“ auf ein Phänomen liefern kann, die Angemessenheit der vorgenommenen Wahl des Systems betrifft, wird der systemische Charakter des Energiekonzepts in klassischen Unterrichtsgängen nicht oder nur wenig thematisiert [6]. Der System-Transfer-Ansatz [7] bietet einen Zugang zum Energiekonzept, welcher dieser Problematik entgegenwirkt, indem er Systeme und Energieflüsse zwischen Systemen in das Zentrum rückt.

### 2. Energie und Systeme

Dass Energie eine systemische Größe ist, lässt sich schon an den Formeln der beiden fundamentalen Energieformen ablesen. Die kinetische Energie  $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$  beinhaltet als für die kinetische Energie charakteristische Größe die Geschwindigkeit  $v$ . Geschwindigkeit ist aber keine absolute Größe, sondern immer relativ zu einem Bezugssystem zu sehen. Streng genommen lässt sich zum Beispiel die Frage nach der kinetischen Energie einer auf der Erde stillstehenden Person nicht klar beantworten, da das Bezugssystem für die Geschwindigkeit nicht gegeben ist: Relativ zu einem Punkt auf der Erde bewegt sich die Person nicht und hat folglich eine kinetische Energie von  $E_{kin} = 0$ . Relativ zur Sonne bewegt sich die Person jedoch schon und hat somit eine erhebliche kinetische Energie. Wenn also im Physikunterricht nach der kinetischen Energie eines bestimmten Objekts mit einer bestimmten Geschwindigkeit gefragt ist, liegt eine implizite Wahl des Systems vor. Diese Wahl des Systems wird den Lernenden jedoch häufig nicht explizit aufgezeigt und in Folge haben Lernende Schwierigkeiten ein entsprechendes Verständnis zu entwickeln.

Ähnlich verhält es sich bei der potentiellen Energie wie am folgenden Beispiel anhand der potentiellen Energie im Gravitationsfeld eines Planeten klar wird: Eigentlich wird anhand der Formel  $E_{grav} = \frac{-GMm}{r}$  und der dort vorkommenden

zwei Massen  $m$  und  $M$  sowie des Abstandes  $r$  klar, dass hier eine systemische Größe vorliegt und die potentielle Energie nicht als Eigenschaft nur einer der beiden massebehafteten Körper gesehen werden kann, sondern des aus den beiden Körpern mit Massen  $m$  und  $M$  bestehenden Systems. Die im Unterricht häufig gebräuchliche Formel  $E_{grav} = mgb$  verschleiert dies jedoch, weil die Höhe  $b$  als Eigenschaft des Körpers mit Masse verstanden wird. Dies wird durch verkürzende Formulierungen wie „Eine Masse von 0,1 kg hat auf der Erde in einer Höhe von 1 m eine potentielle Energie von 1 J.“, welche einem Objekt potentielle Energie zuschreiben und die Wahl des Systems nicht explizit machen, verstärkt.

Dieser Mangel an Explikation der Systemwahl wird in der Literatur für die Schwierigkeiten von Lernenden bei der Wahl von Systemen im Rahmen einer energetischen Betrachtung von Phänomenen verantwortlich gemacht [4-6]. Lindsey und Kolleg:innen [4] stellen als typische Probleme bei der Systemwahl fest, dass Lernende 1) überhaupt nicht erkennen, dass die energetische Betrachtung von der (im Prinzip arbiträren) Systemwahl abhängt, 2) potentielle Energie mit einzelnen Objekten anstatt mit Anordnungen von Objekten assoziieren, 3) annehmen, dass die Energie jedes Systems konstant ist, und 4) häufig Energie- und Arbeitsterme doppelt zählen.

Vor dem Hintergrund, dass die Wahl von Systemen bei energetischen Betrachtungen häufig nicht explizit gemacht wird, kann die Feststellung, dass Lernende nicht erkennen, dass die energetische Betrachtung von der Systemwahl abhängt, wenig überraschen – es fehlt hierfür häufig schlicht an expliziten Lerngelegenheiten [8]. Erschwerend kommt hinzu, dass der Systembegriff in der Physik eine andere Bedeutung hat als in anderen Fächern, wie zum Beispiel der Biologie. Während in anderen Fächern als der Physik der Systembegriff häufig mit einer holistischen Betrachtung von Phänomenen einhergeht, steht in der Physik häufig die Wahl eines Systems mit dem Ziel der Vereinfachung im Vordergrund. Alles, was nicht zum betrachteten System zählt, wird als Umgebung definiert und kann Quelle und Senke für Energie und Materie sein, wird ansonsten aber nicht weiter betrachtet. Die Wahl des Systems ist hierbei im Allgemeinen frei und physikalische Kompetenz zeichnet sich gerade auch darin aus, das System geschickt so zu wählen, dass Fragestellungen möglichst leicht zu beantworten sind. Diese Freiheit in der Systemwahl ist in anderen Fächern häufig gerade nicht gegeben, sodass mangelnde Lerngelegenheiten für die explizite Wahl von Systemen im Physikunterricht nur schwer durch anderen Fachunterricht kompensiert werden können beziehungsweise ein

unreflektierter Übertrag eines Systembegriffs aus anderen Fächern in die Physik gerade zu Lernschwierigkeiten führen kann.

Abschließend ist auch die Feststellung, dass Lernende häufig die Energie in jedem System als konstant annehmen, als problematisch herauszustellen – stellt doch die Anwendung des Energieerhaltungssatzes bei genauer Betrachtung der Systeme einen der produktivsten Nutzen des Energiekonzepts in der Physik dar. Hierbei werden für ein Phänomen zuerst Systeme präzise und strategisch definiert, dann analysiert inwieweit Energietransfers in oder aus den Systemen vorliegen und anschließend analysiert, inwieweit die Gesamtenergie der Systeme zunimmt, abnimmt oder konstant bleibt und dies mit dem bisherigen Verständnis des Phänomens im Einklang steht. Auf diesen Zugang gehen die Postulierung des Neutrinos von Wolfgang Pauli [9] sowie der indirekte Nachweis von Gravitationswellen durch Russell Hulse und Joseph Taylor [10] zurück – zwei Arbeiten die zu Nobelpreisen führten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Unterrichtsgänge zur Energie, welche nicht explizit auf den Systemcharakter der Energie eingehen, Lernenden wichtige Lerngelegenheiten zur Erlangung eines produktiven Energieverständnisses vorenthalten und potentiell Lernschwierigkeiten provozieren.

### 3. Der System-Transfer Ansatz

Der System-Transfer Ansatz wurde von Nordine und Kollegen [6] als Antwort auf vielfältige Kritik in der fachdidaktischen Forschung an existierenden, auf Energieformen fokussierenden Unterrichtsgängen zur Energie entwickelt. In Folge werden im System-Transfer Ansatz keine Energieformen unterschieden, sondern Energie als unitär angenommen. Der Energietransferansatz beschreibt und erklärt Phänomene, indem die zwischen wechselwirkenden Systemen ablaufenden Energietransfers und die dabei in den Systemen ablaufenden Prozesse charakterisiert werden. Um dies darzustellen und Lernende zu unterstützen, wird im System-Transfer Ansatz auf das so genannte Energie-Transfer-Modell (ETM) zurückgegriffen. Abbildung 1 zeigt ein allgemeines Energie-Transfer-Modell. Die beiden Kästen stellen die wechselwirkenden Systeme dar, der Pfeil beschreibt die Richtung des Energietransfers und in den eckigen Klammern stehen die dabei in den Systemen ablaufenden Prozesse.

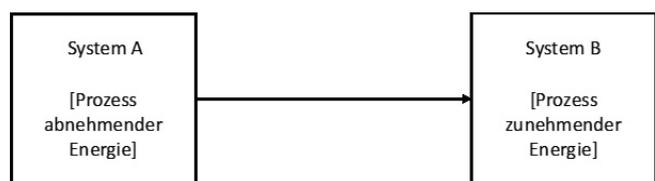


Abbildung 1: Energie-Transfer-Modell

An das Energie-Transfer-Modell sind einige Regeln geknüpft, welche die Energieerhaltung qualitativ abbilden. So muss es für jeden Prozess abnehmender Energie einen Prozess

zunehmender Energie geben und Energie kann immer nur zwischen wechselwirkenden Systemen transferiert werden. Das heißt, Pfeile können nicht ins „Nichts“ gehen oder aus dem „Nichts“ kommen. Abbildung 2 zeigt nun ein Energie-transfermodell für ein konkretes Beispiel – die Kollision zweier Kugeln A und B.

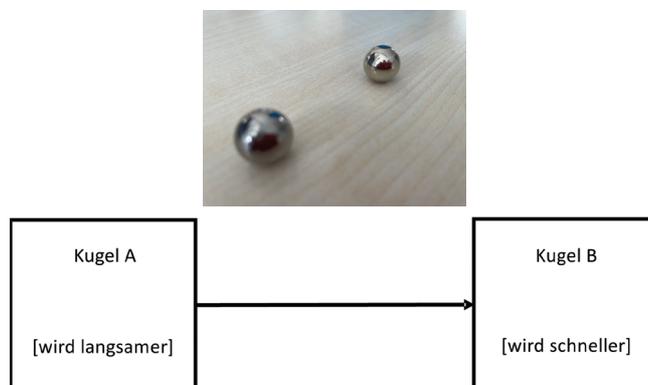


Abbildung 2: Energie-Transfer-Modell für die Kollision zweier Kugeln A und B

Im Beispiel in Abbildung 2 ist die Wahl der Systeme so, dass ein System jeweils einem Objekt entspricht. Dies muss aber nicht so sein, wie direkt in Abbildung 3 deutlich wird.

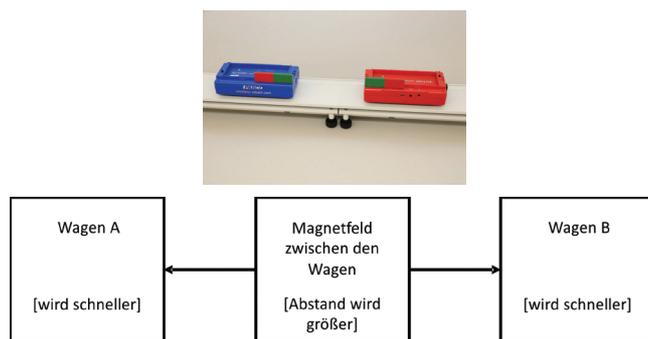
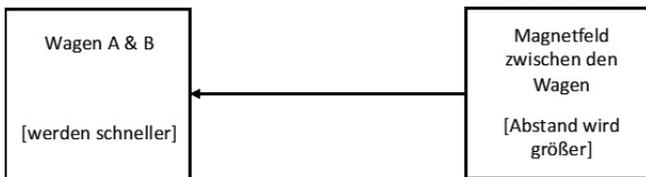


Abbildung 3: Energie-Transfer-Modell für zwei Wagen, an denen Magnete so angebracht sind, dass sie sich abstoßen

Abbildung 3 zeigt ein Energie-Transfer-Modell für folgendes Phänomen: Zwei Wagen A und B werden mit Magneten versehen, welche so orientiert sind, dass die Magnete sich abstoßen. Nun werden die Wagen zusammengedrückt und anschließend losgelassen. Sobald die Wagen losgelassen werden, beschleunigen Sie aufgrund der Abstoßung zwischen den Magneten. Im Energietransfermodell tauchen nun drei Systeme auf. Einerseits die beiden Wagen A und B und andererseits das System „Magnetfeld zwischen den Wagen“. Hier zeigt sich, dass Energie-Transfer-Modelle aus mehr als zwei Systemen bestehen können und dass der System-Transfer Ansatz Felder einführt.

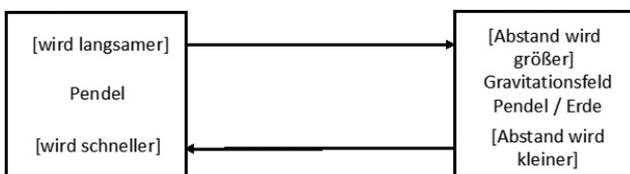
Felder werden im System-Transfer-Ansatz eingeführt, um der potentiellen Energie ein „Zuhause“ zu geben [11]. Die Einführung von Feldern ermöglicht es, potentielle Energie physikalisch korrekt zu lokalisieren [6,8,11,12]. Im System-Transfer-Ansatz können Systeme also sowohl einzelne

Objekte als auch Felder sein. Zusätzlich können Systeme auch aus mehreren Objekten bestehen; zirkulierende Energieflüsse sind möglich. Abbildung 4 zeigt eine alternative Darstellungsmöglichkeit für das Energie-Transfer-Modell aus Abbildung 3. Hier wurden die Wagen A & B in ein System zusammengefasst, da in beiden die selben Prozesse ablaufen. Hier zeigt sich exemplarisch, dass die Wahl der Systeme prinzipiell frei ist, eine geschickte Wahl der Systeme aber vorteilhaft sein kann – in diesem Fall ist das resultierende Energie-Transfer-Modell einfacher.



**Abbildung 4:** Alternatives Energie-Transfer-Modell für zwei Wagen, an denen Magnete so angebracht sind, dass sie sich abstoßen

Abbildung 5 zeigt ein Energie-Transfer-Modell für ein Pendel im Vakuum. Wenn das Pendel sich dem Boden nähert und schneller wird, wird Energie aus dem System „Gravitationsfeld zwischen Pendel und Erde“ zum System „Pendel“ transferiert. Wenn das Pendel sich vom Boden entfernt und schneller wird, wird Energie aus dem System „Pendel“ ins System „Gravitationsfeld zwischen Pendel und Erde“ transferiert. Für diese Art von kontinuierlichem Prozess mit zirkulärem Energietransfer steht auch eine dynamische Version des Energie-Transfer-Modells als Computersimulation zur Verfügung [13].



**Abbildung 5:** Energie-Transfer-Modell für ein Pendel im Vakuum.

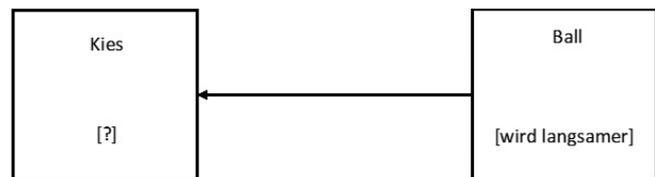
Zusammenfassend zeigen die hier aufgeführten Beispiele, dass der System-Transfer-Ansatz eine Perspektive auf das Energiekonzept bietet, welche den Systemcharakter der Energie in den Vordergrund stellt und mit dem Energie-Transfer-Modell eine Repräsentationsform liefert, welche dies klar abbildet. Somit kann der System-Transfer-Ansatz dem Problem entgegenwirken, dass die Wahl von System bei der energetischen Betrachtung von Phänomenen häufig implizit bleibt. Die Beforschung des System-Transfer-Ansatzes liefert zudem starke Evidenz dafür, dass der System-Transfer-Ansatz bei Lernenden in der Mittelstufe zu größerem Lernerfolg führt als ein vergleichbarer Unterricht der Energie über Formen konzeptualisiert [14] und dass Lernende ein qualitatives Verständnis der Energieerhaltung entwickeln und das Feldkonzept für die Lernenden zugänglich ist [15]. Abschließend zeigt sich, dass die aktive Konstruktion von Energie-Transfer-Modellen Lernende dabei unterstützt, mit Hilfe des Energiekonzepts neue Einblicke in Phänomene zu erlangen [16].

## 4. Beispiele

Im Folgenden soll nun anhand von drei Beispielen aufgezeigt werden, wie der Fokus auf Systeme im System-Transfer-Ansatz zusammen mit dem Energie-Transfer-Modell Lernende dabei unterstützen kann, das Energiekonzept zu nutzen, um ihr Verständnis von Phänomenen zu erweitern.

### 4.1 „Versteckte“ Prozesse entdecken

Mit versteckten Prozessen sind solche gemeint, die bei der Betrachtung eines Phänomens zunächst nicht sichtbar sind. Ein Phänomen, bei dem dies der Fall ist, wurde auch genutzt, um zu erforschen inwieweit das Konstruieren eines Energie-Transfer-Modells Lernende unterstützt. In dem Phänomen rollt ein Ball zunächst über Asphalt und dann von dort auf Kies, wo der Ball stoppt. Dabei bewegt sich der Kies nicht merklich. Für die Lernenden ist schnell klar, dass die beiden involvierten Systeme der Ball und der Kies sind. Der Prozess im System Ball ist auch eindeutig: die Geschwindigkeit nimmt ab. Da eine Abnahme der Geschwindigkeit ein Prozess ist, bei dem Energie aus dem System heraus transferiert wird, muss die Energie also in das System Kies transferiert werden. Hier ist allerdings kein Prozess sichtbar. Konstruieren die Lernenden ein Energie-Transfer-Modell für dieses Phänomen, ergibt sich entsprechend eine Lücke für den Prozess im System Kies (Abbildung 6). An dieser Stelle beginnen Lernende nun Vermutungen zu äußern, welcher Prozess im System Kies ablaufen könnte – der Kies könnte sich erwärmen oder kleine Kiesel könnten bewegt werden [16]. Diese Vermutungen bieten für die Lernenden eine motivierende Ausgangslage, um das Phänomen zu untersuchen.

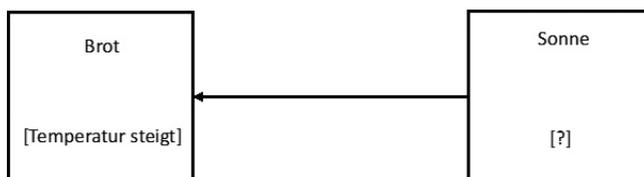


**Abbildung 6:** Energie-Transfer-Modell für einen rollenden Ball, der auf Kies stoppt.

Ähnlich verhält es sich mit dem Phänomen eines auf den Boden fallenden Objekts. Für die Lernenden ist klar, dass das Objekt, wenn es auf den Boden auftrifft, langsamer wird – also seine Energie verringert. Da das Objekt offensichtlich mit dem Boden wechselwirkt, bietet sich dieses als anderes System an. Allerdings ist wieder kein Prozess erkennbar. Hier findet sich wieder ein Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen an dem Phänomen, um Vermutungen von Lernenden wie „Die Temperatur des Bodens nimmt vielleicht zu“ nach zu gehen – zum Beispiel mit der Wärmebildkamera [17].

Ein letztes Beispiel betrifft das Phänomen eines Solarkochers, mit dem ein Brot gebacken wird. Wenn Lernende dieses Phänomen analysiert haben, wurde schnell klar, dass die Energie des Systems „Brot“ zunimmt und dessen Temperatur steigt. Außerdem identifizierten die Lernenden die Sonne

als System, aus dem die Energie zum Brot transferiert wird (Abbildung 7). Unklar blieb jedoch für viele Lernende, welcher Prozess in der Sonne abläuft. Die Lernenden stellten jedoch diverse Vermutungen wie zum Beispiel „chemische Reaktion“ auf, was wiederum als Ausgangspunkt für weitere Überlegungen dienen kann. Außerdem waren die Lernenden häufig von der Schlussfolgerung überrascht, dass die Energie der Sonne abnimmt, was zu weiteren Überlegungen und Spekulationen darüber führte, inwieweit die Sonne irgendwann aufhört, zu scheinen [15].



**Abbildung 7:** Energie-Transfer-Modell für einen Solarkocher mit dem ein Brot gebacken wird.

Zusammenfassend zeigen die drei Beispiele, dass ein Fokus auf die Systeme und die darin ablaufenden Prozesse Lernenden helfen kann, Lücken in ihrem Verständnis der Phänomene zu erkennen – die „versteckten“ Prozesse. Die Identifikation dieser Lücken an sich stellt schon eine wichtige Erkenntnis dar und kann dann die Grundlage für weitere, zielgerichtete Untersuchungen am Phänomen sein.

## 4.2 Unbekannte Systeme finden

Unbekannte Systeme spielen immer dann eine Rolle, wenn Energie scheinbar aus dem Nichts kommt oder ins Nichts verschwindet. Dieses „Verschwinden“ der Energie stellt eine Verletzung der Energieerhaltung dar. Energie ist aber eine Erhaltungsgröße. Dann heißt ein scheinbares Verletztes der Energieerhaltung, dass ein System, aus dem Energie kommt oder in welches Energie hinein transferiert wird, noch nicht erkannt wurde. Das wohl berühmteste Beispiel für einen solchen Fall stellt die Postulierung des Neutrinos dar. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Versuche zum Beta-Zerfall durchgeführt. Hierbei erwartete man aufgrund theoretischer energetischer Betrachtungen diskrete energetische Spektren der Elektronen. Man fand jedoch kontinuierliche Spektren, welche mit der Erhaltung der Energie nicht im Einklang schienen. Während nun nach Lösungen gesucht wurde und zum Beispiel Nils Bohr darüber spekulierte, ob die Energieerhaltung nur in einem statistischen Sinne galt – Energie also nur im Mittel erhalten sei – wendete Wolfgang Pauli das Prinzip der Energieerhaltung strikt an. Wenn man annahm, dass die Energieerhaltung galt, die kontinuierlichen Spektren jedoch anzeigen, dass Energie „verloren“ ging, dann – so verlangt es die Energieerhaltung – musste es ein anderes System geben, in welches die Energie transferiert wurde; ein System, das den Messungen bis dahin nicht zugänglich war. Dieses System kennen wir heute als Neutrino, welches 1956 (gut 20 Jahre nach seiner Postulierung durch Wolfgang Pauli) experimentell nachgewiesen wurde [18].

Ein Beispiel für die Entdeckung von unbekanntem Systemen im Kontext des System-Transfer-Ansatzes stellt die Einführung des Magnetfeldes als System dar, in welches Energie hinein und hinaus transferiert werden kann. Im Verlauf der Unterrichtseinheit lernen die Lernenden zunächst in diversen Kontexten, dass die Zunahme der Geschwindigkeit ein Prozess zunehmender Energie ist. Anschließend wird behandelt, dass die Fernwirkung von Magneten durch das magnetische Feld vermittelt wird. Nun wird den Lernenden das in Abschnitt 3 und Abbildung 3 dargestellte Phänomen mit den Magnetwagen gezeigt und die Lernenden aufgefordert, ein Energie-Transfer-Modell zu konstruieren. Die Lernenden haben keine Schwierigkeiten, die Systeme Wagen A und Wagen B zu konstruieren. Dann bemerken die Lernenden jedoch, dass in beide Systeme (Wagen A und B) Energie transferiert werden muss, wenn beide schneller werden. In Folge fehlt ein System, aus dem Energie heraus transferiert wird. Hieraufhin äußern die Lernenden dann schnell die Vermutung, dass die Energie aus dem Magnetfeld kommt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass scheinbare Verletzungen der Energieerhaltung neue Erkenntnisse darüber bereithalten können, in wie weit ein Modell eines Phänomens schon alle relevanten Systeme abdeckt. Dies erfordert zwangsweise eine explizite Betrachtung der Systeme bei der energetischen Betrachtung von Phänomen, welche beim System-Transfer-Ansatz im Vordergrund steht.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Obwohl Energie eine inhärent systemische Größe ist, wird dieser Systemcharakter häufig zu wenig explizit im Unterricht thematisiert. Lernschwierigkeiten sind die Folge. Der System-Transfer-Ansatz ist ein praxiserprobter und lernförderlicher Unterrichtsgang, welcher die Modellierung von Phänomenen durch Energieflüsse zwischen Systemen ins Zentrum stellt. Wie die Beispiele gezeigt haben, bietet diese Betrachtungsweise neben der expliziten Thematisierung der Systemwahl den Vorteil, dass der energetische Blick auf ein Phänomen zu einem echten Erkenntnisgewinn führen kann – z. B. über „versteckte“ Prozesse.

Alle hier vorgestellten Betrachtungen waren rein qualitativer Natur – Energieflüsse wurden nicht quantifiziert. Dies liegt daran, dass die bisherige Entwicklung zum Energie-Transfer-Ansatz auf einen qualitativen Zugang beschränkt war. Die Weiterentwicklung des Energie-Transfer-Ansatzes hin zu einem quantitativen Zugang, welcher auch anschlussfähig an die Oberstufe und Universitätsausbildung ist, ist Gegenstand aktiver Arbeiten, aus denen zum Beispiel schon die dynamischen Energie-Transfer-Modelle hervorgegangen sind [13]. Unterrichtsmaterialien für den Energie-Transfer-Ansatz zur Anwendung in der Mittelstufe können über die Autor:innen angefragt werden.

Marcus Kubsch *Freie Universität Berlin*  
 Jeffrey Nordine *University of Iowa, College of Education, Iowa*  
*City, Iowa, USA; IPN – Leibniz Institut für die Pädagogik der*  
*Naturwissenschaften und Mathematik, Kiel, Deutschland*

## Literatur

- [1] R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, and A. Scheff, *Teaching and Learning of Energy in K-12 Education* (Springer, Cham, 2014).
- [2] C. F. Herrmann-Abell and G. E. DeBoer, Investigating a Learning Progression for Energy Ideas from Upper Elementary through High School, *Journal of Research in Science Teaching* (2017).
- [3] K. Neumann, T. Viering, W. J. Boone, and H. E. Fischer, Towards a Learning Progression of Energy, *J. Res. Sci. Teach.* 50, 162 (2013).
- [4] B. A. Lindsey, P. R. L. Heron, and P. S. Shaffer, Student Understanding of Energy, *Am. J. Phys.* 80, 154 (2012).
- [5] J. W. Jewett, Energy and the Confused Student II: Systems, *Phys. Teach.* 46, 81 (2008).
- [6] J. Nordine, D. Fortus, Y. Lehavi, K. Neumann, and J. Krajcik, Modelling Energy Transfers between Systems to Support Energy Knowledge in Use, *Studies in Science Education* 54, 177 (2018).
- [7] M. Kubsch, J. Nordine, and K. Neumann, Der System-Transfer-Ansatz, *Unterricht Physik* 164, (2018).
- [8] L. Seeley, S. Vokos, and E. Etkina, Examining Physics Teacher Understanding of Systems and the Role It Plays in Supporting Student Energy Reasoning, *American Journal of Physics* 87, 510 (2019).
- [9] J. Coopersmith, *Energy, the Subtle Concept: The Discovery of Feynman's Blocks from Leibniz to Einstein*, Revised edition (Oxford University Press, Oxford, United Kingdom ; New York, NY, 2015).
- [10] J. H. Taylor, L. A. Fowler, and P. M. McCulloch, Measurements of General Relativistic Effects in the Binary Pulsar PSR1913 + 16, *Nature* 277, 437 (1979).
- [11] H. R. Quinn, A Physicist's Musings on Teaching About Energy, in *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education*, edited by R. F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, and A. Scheff (Springer International Publishing, Cham, 2014), pp. 15-36.
- [12] K. E. Gray, M. C. Wittmann, S. Vokos, and R. E. Scherr, Drawings of Energy: Evidence of the Next Generation Science Standards Model of Energy in Diagrams, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* 15, 010129 (2019).
- [13] M. Kubsch and P. C. Hamerski, Dynamic Energy Transfer Models, *The Physics Teacher* 60, 583 (2022).
- [14] D. Fortus, M. Kubsch, T. Bielik, J. Krajcik, Y. Lehavi, K. Neumann, J. Nordine, S. Opitz, and I. Touitou, Systems, Transfer, and Fields: Evaluating a New Approach to Energy Instruction, *J Res Sci Teach* tea.21556 (2019).
- [15] M. Kubsch, S. Opitz, J. Nordine, K. Neumann, D. Fortus, and J. Krajcik, Exploring a Pathway towards Energy Conservation through Emphasizing the Connections between Energy, Systems, and Fields, *Discip Interdiscip Sci Educ Res* 3, 2 (2021).
- [16] M. Kubsch, J. Nordine, D. Fortus, J. Krajcik, and K. Neumann, Supporting Students in Using Energy Ideas to Interpret Phenomena: The Role of an Energy Representation, *Int J of Sci and Math Educ* (2019).
- [17] M. Kubsch and S. Weßnigk, Die Wärmebildkamera im Kontext Mechanik gewinnbringend einsetzen, *MNU Journal* 75, 112 (2022).
- [18] C. L. Cowan, F. Reines, F. Harrison, H. Kruse, and A. McGuire, Detection of the Free Neutrino: A Confirmation, *Science* 124, 103 (1956).

# Der Energie-Feld-Ansatz

## Energie verstehen mit Feldern

Manuel Becker

### 1. Einführung

Der Energie-Feld-Ansatz (EFA) ist eine für die Sekundarstufe II entwickelte und evaluierte Unterrichtskonzeption, die die Probleme des traditionellen Energieunterrichts adressiert. Der EFA ist im Rahmen einer physikdidaktischen Dissertation entstanden und wurde in verschiedenen Settings empirisch evaluiert [1]. Indem Energie im Zusammenhang mit Feldern unterrichtet wird, werden verschiedene Probleme umgangen, die nach dem traditionellen Unterricht mit Energieformen entstehen. Der EFA führt die Energieformen auf den Zusammenhang mit den zu Grunde liegenden Feldern zurück und benötigt nur die Unterscheidung von **Feldenergie** und **Bewegungsenergie**. Dieser Artikel gibt Ihnen einen Überblick über die Merkmale und Vorteile des Unterrichts nach dem EFA. Alle Materialien zu EFA sind online verfügbar [2].

Die Konzeption gliedert sich entlang der einzelnen Konzeptideen, die den Kern des Konzeptes darstellen. Die Konzeptideen sind die essenziellen fachlichen und didaktischen Kernaussagen, welche die Lernenden verstehen sollen. Sie werden mit passenden Beispielen und Kontexten verknüpft, um die Inhalte anschaulich und nachvollziehbar zu vermitteln. Die Konzeption lässt sich in die folgenden Schwerpunkte gliedern:

1. Phänomenologie der Energie
2. Quellen von Feldern und das Gesamtfeld
3. Energieübertragung zwischen Feld und Bewegung
4. Arten von Feldern und Bewegungen
5. Energie und Masse im Quarkfeld
6. Energie und Masse durch das Higgsfeld
7. Zusatzinhalte der modernen Physik

Dabei wird Energie phänomenologisch mit Prozessen und Phänomenen unterschiedlicher Bereiche verknüpft. Es wird bewusst vermittelt, dass sie in vielen Bereichen unseres Lebens und Forschens eine Rolle spielt. Egal, ob auf der subnuklearen, atomaren, makroskopischen oder astronomischen Ebene – Energie ist ein Konzept, das sich zur Beschreibung zahlreicher naturwissenschaftlicher Phänomene eignet. Ebenso relevant sind Felder, denn sie sind untrennbar mit der Energie verknüpft, wenn Objekte miteinander wechselwirken. Deshalb werden zunächst Felder und ihre Eigenschaften als abstrakte Größen eingeführt. Es wird das Gesamtfeld eingeführt, das die Überlagerung mehrerer Felder beschreibt und mit der Energie verbunden ist. Wenn man das Verhalten eines Gesamtfeldes in Prozessen betrachtet, kann auch die Energieübertragung verstanden werden. Dabei dienen Indikatoren der Feldveränderung zur Beschreibung.

Nach der Feldeinführung werden verschiedene Arten von Feldern und Bewegungen erläutert und so die traditionellen Energieformen auf Bewegungen und Felder zurückgeführt (z. B. thermische Energie, Spannenergie, elektromagnetische Strahlung). Die Konzeption folgt wenigen aber sehr weitreichenden Konzeptideen, deren Prinzipien auch auf kernphysikalische Prozesse und Phänomene der Relativitätstheorie übertragen werden können. Durch Einführung des Quarkfeldes und Higgsfeldes können Masse und Energie miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Die folgenden Abschnitte gehen auf die einzelnen Bereiche der Konzeption ein und beschreiben die fundamentalen Erklärungen. Dabei werden zentrale Konzeptideen fett gedruckt.

### 2. Phänomenologie der Energie

Zu Beginn der Konzeption werden den Lernenden drei phänomenologische Beispiele vorgestellt, bei denen sie der Relevanz des Energiekonzeptes begegnen.

Energie kennen die Schüler:innen bereits aus dem bisherigen Schulunterricht. Dabei haben sie verschiedene Formen von Energie kennengelernt, wie z. B. elektrische, kinetische, potenzielle, thermische, Solar- oder auch Strahlungsenergie. Grundsatz war dabei immer, dass Energieformen ineinander umgewandelt bzw. übertragen werden können, die Gesamtenergie aber immer konstant bleibt. Das bezeichnet man als Energieerhaltung. Für uns ist dieses Prinzip im Folgenden auch von Bedeutung, insbesondere um Prozesse in Phänomenen zu beschreiben. Dabei kann man bei Kenntnis der übertragenen Energie nicht nur beschreiben, was passiert, sondern auch in welchem Ausmaß. Zum Beispiel, wenn man das Tempo eines Wagens auf einer Achterbahn bestimmen möchte oder herausfinden will, wie viel Energie bei einem bestimmten Prozess in Kernkraftwerken frei wird. Auch wenn man die Erzeugung von neuen, vielleicht sogar noch unbekanntem Teilchen untersucht (so wie man das beispielsweise am LHC des CERN macht), muss man wissen, wie viel Energie dafür notwendig ist. Für das Verständnis von Phänomenen spielen die Betrachtung und das Wissen über die Energie also eine bedeutende Rolle.

### 3. Energie in Feldern

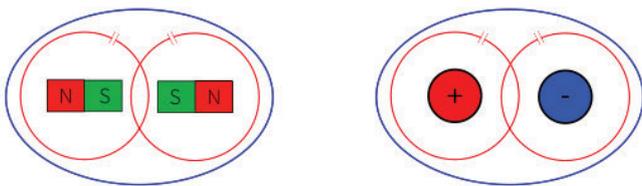
Zunächst wird der Grundstein für das Konzept über den Zusammenhang von Energie und Feldern gelegt. Implizit wird dabei auch die folgende für den Energie-Feld-Ansatz zentrale

Konzeptidee vorbereitet: **Es gibt nur Bewegungsenergie und Feldenergie, d. h. Energie in der Bewegung von Objekten und Energie in Feldern.**

Felder kennen die Schüler:innen bereits von Magneten und Ladungen. Hier lernen sie an Beispielen, dass man Felder weder sehen noch anfassen kann, sie aber dennoch real sind. Ein Feld ohne Einschränkung ist dabei unbegrenzt. Zu jeder Quelle in Form einer Masse, Ladung, eines Magneten oder eines Quarks gibt es ein Feld. Die Felder nennt man dann entsprechend Gravitationsfeld, elektrisches, magnetisches oder Quarkfeld.

### 3.1 Das Gesamtfeld

Gibt es zwei Quellen gleicher Art, so wechselwirken sie miteinander über ihre Felder. Dabei bildet sich ein sogenanntes Gesamtfeld als Überlagerung der einzelnen Felder. Wichtig dabei ist nun, dass wir uns im Folgenden nur für das Gesamtfeld interessieren, denn sobald sich zwei einzelne Felder überlagern, spielen die Einzelfelder für uns keine Rolle mehr. Man kann das Prinzip auch graphisch darstellen (Abb. 1).



**Abbildung 1:** Einzelfelder (rot) überlagern sich zu einem Gesamtfeld (blau).

**Beispiel:** Bei zwei Magneten zeichnet man um jeden Magneten einen Kreis; dieser stellt das Magnetfeld dar (vgl. Abb. 1). Eigentlich ist das Feld unendlich weit ausgedehnt, sofern es dazu die Möglichkeit hat. Da wir dies aber nicht zeichnen können, stellen wir es uns so vor. Darstellen können wir das durch die einzelnen Kreise. Da die Felder unendlich weit ausgedehnt sind, überlagern sie sich überall, das skizzieren wir dadurch, dass sie sich überlappen. Insgesamt ergibt sich dann ein Gesamtfeld, das wir durch eine Ellipse um beide Magnete herum darstellen. Diese Visualisierung ist zwar sehr limitiert, sie hilft aber dabei, sich die Situation besser vorstellen zu können. Dieses Prinzip kann man auch auf andere Felder wie elektrische Felder bei Ladungen oder auf Gravitationsfelder bei Massen übertragen.

### 3.2 Tendenz des Gesamtfeldes

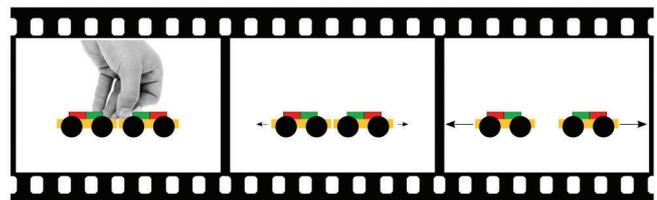
Um später die Richtung der Energieübertragung anhand der Art des Feldes und der Richtung der Interaktion bestimmen zu können, wird die **Tendenz des Feldes** eingeführt: Das Gesamtfeld ergibt sich aus der Wechselwirkung der Quellen bzw. Einzelfelder. Deshalb tendiert es entsprechend dieser Wechselwirkung dazu, sich zusammenzuziehen oder auseinanderzudrücken. Das Gesamtfeld wird hier also auch sprachlich als Akteur eingeführt. Diese Rolle stellt sich empirisch als

sehr lernförderlich heraus und verschafft dem Feldkonzept den attraktiven Charakter eines Werkzeugs, mit dem man Prozesse unter bestimmten Regeln analysieren kann: **Entsprechend der wirkenden Wechselwirkung tendiert ein Gesamtfeld dazu, sich zu verkleinern (Anziehung) oder zu vergrößern (Abstoßung).**

Bei sich anziehenden Ladungen gibt es also beispielsweise ein Gesamtfeld, das dazu tendiert, sich zusammenzuziehen. Umgekehrt tendiert das Gesamtfeld zweier sich abstoßender Ladungen dazu, sich auseinanderzudrücken. Sofern es für das Feld die Möglichkeit gibt, also keine äußeren Einflüsse, die dagegensprechen, wird das Feld sich entsprechend dieser Tendenz verändern. Aus diesem Grund nähern sich anziehende Quellen an und abstoßende entfernen sich ohne äußeren Einfluss.

### 3.3 Energie im Gesamtfeld

Im nächsten Schritt wird dem Gesamtfeld Energie zugeschrieben. Hier verbinden sich Feld- und Energiekonzept auf eine sinnstiftende Weise. Dazu wird den Lernenden das Beispiel zweier abstoßender Magnetwägen vorgestellt (Abb. 2).



**Abbildung 2:** Abstoßende Magnetwägen; die beiden sich abstoßenden Magnetwägen werden zusammengehalten und dann losgelassen.

Wir betrachten zwei Magneten auf Wägen in abstoßender Konstellation. Sie werden zusammengehalten und dann losgelassen. Beim Loslassen fahren sie auseinander. Die Frage ist nun: Wo war die Bewegungsenergie am Anfang, bevor die Bewegung begann? Antwort: Ein Magnet ist Quelle eines Magnetfeldes. Die beiden Magnetfelder überlagern sich zu einem Gesamtfeld. Hier stoßen sich die beiden Magnete ab, das heißt es gibt eine abstoßende Wechselwirkung, also ein Gesamtfeld, das sich vergrößert. **Dieses Gesamtfeld trägt Energie.** Wichtig dabei ist zu wissen, dass die Energie immer nur im Gesamtfeld mit der Wechselwirkung steckt, also in der Überlagerung. Nicht die Einzelfelder der Quellen tragen Energie, sondern erst die Konstellation als Überlagerung, also das Gesamtfeld. Die Energie kann aus dem Feld auf die Bewegung übertragen werden. Wenn man die beiden Magnetwägen also loslässt, dann gibt das Feld Energie an die Bewegung der beiden Magnetwägen ab.

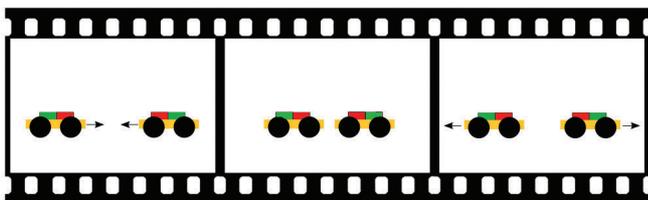
Dieses Prinzip kann auch auf andere Felder übertragen werden. Beispielsweise kann man zwei elektrostatisch aufgeladene Luftballons betrachten, die sich abstoßen oder die Bewegung eines Satelliten um die Erde, der beim Annähern schneller und beim Entfernen langsamer wird.

## 4. Energieübertragung

Nachdem das Gesamtfeld als Energieträger eingeführt ist, kann man verschiedene Szenarios der Energieübertragung betrachten, um zu bestimmen, wann die Energie in ein Feld und wann sie aus einem Feld übertragen wird. Diese Richtung der Energieübertragung dient dann der Beschreibung von Prozessen. Die Konzeptidee ist hier die folgende: Wenn Energie in ein Feld oder aus einem Feld übertragen wird, dann verändert sich das Feld. Das erkennt man daran, dass

- sich eine Bewegung verändert und ein Objekt schneller oder langsamer wird oder
- sich ein Feld verkleinert oder vergrößert (d. h. die Quellen sich annähern oder entfernen).

**Feld- und Bewegungsänderung sind also Indikatoren für die Übertragung von Energie.** Immer dann, wenn ein Feld sich in Richtung der Wechselwirkung (Kraft), also entsprechend seiner Tendenz verändert, gibt es Energie ab. Wenn es sich entgegen der Tendenz verändert, nimmt es Energie auf.



**Abbildung 3:** Umkehrende Magnetwagen; die Sequenz zeigt die Situation, wenn die Wagen aufeinander zu fahren und sich dann wieder entfernen.

**Beispiel:** Als Beispiel kann man wieder die beiden Magnetwagen betrachten. Diesmal werden sie aus der Entfernung aufeinander zu gestoßen, nähern sich an, ohne sich zu berühren und kehren dann durch die Abstoßung wieder um (Abb. 3). Wenn die Magnete aufeinander zu fahren, werden sie durch die abstoßende Wechselwirkung langsamer und geben dabei Energie an das Feld ab. Das Feld nimmt also Energie aus ihrer Bewegung auf. Dabei sieht man: Das Feld dehnt sich aus; der Abstand der beiden Magnete (Quellen) vergrößert sich entsprechend der Wechselwirkung. Wenn es aber durch die Bewegung der Magnete entgegen der Wechselwirkung zusammengedrückt wird, nimmt es Energie auf. Das geschieht, bis die Magnetwagen in der Mitte all ihre Energie aus der Bewegung an das Feld abgegeben haben. Dann hat das Feld die gesamte Energie aufgenommen. Da es aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung nach wie vor die Tendenz hat, sich auseinanderzudrücken, kehren die Magnetwagen wieder um und werden schneller. Dabei erhält ihre Bewegung Energie aus dem Feld. Das Feld gibt also Energie ab, wenn es die Möglichkeit dazu hat. Wir lernen dabei, dass ein Feld bei Veränderungen in Richtung der Wechselwirkung immer Energie abgibt; also wenn sich ein abstoßendes Feld vergrößert oder ein anziehendes Feld verkleinert. Wenn es sich andererseits entgegen der Wechselwirkung verändert, dann nimmt es Energie auf. Folglich tendiert ein Feld also immer zum Zustand minimaler

Energie. Um das Feld von außen zu verändern, muss man ihm Energie zuführen.

Die beschriebenen Konzeptideen zu Gesamtfeld und Energieübertragung sind das Fundament für die Beschreibung sämtlicher Prozesse aus der Energieperspektive. Mit den gegebenen Werkzeugen können Lernende beliebige Felder und Wechselwirkungen betrachten und die Energieübertragung analysieren. Im Folgenden werden verschiedene Arten von Feldern und Bewegungen betrachtet. So wird deutlich, dass die Ideen auf beliebiger Ebene (im Großen und Kleinen) und unabhängig vom Kontext gültig sind.

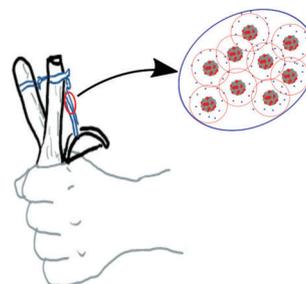
## 5. Arten von Feldern und Bewegungen

Im EFA wird versucht, von der makroskopischen auf die mikroskopische Ebene zu schließen. Das heißt, Konzeptideen werden wie hier beschrieben auf größerer Skala mit greifbaren Beispielen eingeführt und dann auf die molekulare/atomare, nukleare und subnukleare Ebene übertragen. Dabei wird auch das Vorgehen „von konkret zu abstrakt“ verfolgt, um den kognitiven Abstraktionsprozess der Lernenden anzuleiten und zu unterstützen.

### 5.1 Atomare Felder

Auf der molekularen bzw. atomaren Ebene wird vermittelt, dass das Konzept des Gesamtfeldes ebenso bei Atomen funktioniert: **In jedem Festkörper gibt es atomare (elektrische) Felder.** Darüber hinaus kann man mit einer weiteren Idee des „Strebens nach minimaler Energie“ die Bindung von Atomen plausibilisieren: **Die Bindung von Molekülen und Festkörpern entsteht durch die Tendenz des Feldes zur Minimierung der Energie.**

Es bietet sich an, diese Prinzipien an einem makroskopischen Beispiel einzuführen, das dann auf mikroskopischer Ebene erklärt wird. Wir betrachten dazu als Beispiel eine elastische Schleuder (Abb. 4).



**Abbildung 4:** Gesamtfeld der Atome einer elastischen Schleuder.

**Beispiel:** Wenn man einen Ball in eine Schleuder spannt und dann loslässt, fliegt er davon. Dabei erhält er Bewegungsenergie. Diese kommt aus dem Band der Schleuder. Traditionell würde man sagen „hier wird Spannenergie in Bewegungsenergie umgewandelt“. Wir wissen aber nach unserem neuen Ansatz,

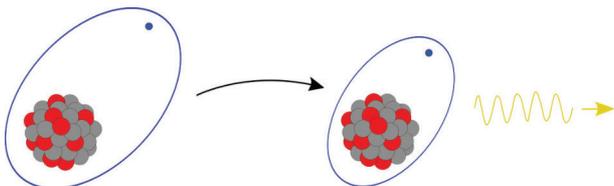
dass es nur Bewegungsenergie und Feldenergie gibt. Also ist die Frage: Wo finden wir hier Bewegungen und Felder? Wir wissen, dass die Schleuder aus Atomen besteht. Die Atome bilden durch die Überlappung ihrer elektrischen Felder ein elektrisches Gesamtfeld. Dieses Gesamtfeld trägt Energie. Wenn man nun das Band der Schleuder spannt, dann zieht man die Atome des Gesamtfeldes auseinander und verändert das Gesamtfeld damit entgegen seiner Tendenz. Dementsprechend wird Energie in das Feld übertragen. Lässt man die Schleuder wieder los, kann sich das Feld entsprechend seiner Tendenz verändern und die Schleuder zieht sich wieder zusammen. Dabei verändert sich das Gesamtfeld der Atome entsprechend seiner Tendenz und gibt Energie ab. Diese ist dann am Ende in der Bewegung der Schleuder und des Balles zu finden.

Als zweiten Aspekt kann man die Schleuder als Festkörper betrachten. Durch die anziehende Wechselwirkung der Atome besitzt deren elektrisches Gesamtfeld die Tendenz, sich zu verkleinern, wenn es verändert wird. Es ergibt sich also ein stabiler Zustand der Energie, die dann gerade minimal ist. Denn ansonsten würde sich das Feld weiter verändern. Man kann also sagen: Immer, wenn ein Feld die Möglichkeit hat, versucht es, seine Energie zu minimieren. Das ist ein Grund dafür, dass Atome sich zu Festkörpern binden und nicht einfach auseinanderfallen.

Wir sehen hier also zwei Dinge: Erstens, dass es nur Bewegungsenergie und Feldenergie gibt, in diesem Fall makroskopische Bewegung des Balles und Energie im mikroskopischen Feld der Atome. Zweitens, dass die Bindung von Atomen dadurch zu Stande kommt, dass das elektrische Feld der Atome seine Energie minimiert. Um einen Festkörper zu verändern, muss man also zunächst Energie hineinstecken, quasi als Auslöser. Wir haben also die uns bekannten Energieformen Spannenergie bzw. Verformungsenergie und Bindungsenergie auf Feldenergie eines mikroskopischen elektrischen Gesamtfeldes der Atome zurückgeführt.

## 5.2 Elektromagnetische Strahlung

Eine weitere elementare Energieform des traditionellen Energieunterrichts ist die Strahlungsenergie der elektromagnetischen Strahlung. Diese kann im EFA über die Überlagerung von elektrischen und magnetischen Feldern verstanden werden. Dazu betrachtet man die Entstehung von Strahlung am Beispiel des atomaren Energiestufenmodells (Abb. 5):



**Abbildung 5:** Elektromagnetische Strahlung als Feldenergie: Wenn ein Elektron in einen niedrigeren Energiezustand übergeht, wird vom Atom Strahlung abgegeben. Die freiwerdende Energie trägt das elektromagnetische Feld, also diese Strahlung wie z. B. Licht.

Wenn man ein Atom betrachtet, dann haben wir dort den Kern und die Elektronen, die sich um diesen herum aufhalten. Da sowohl der Kern als auch die Elektronen elektrisch geladen sind, besitzt das Atom ein elektrisches Gesamtfeld, das Energie trägt. Wegen der Bewegung der Elektronen haben wir gleichzeitig auch ein magnetisches Feld. Wenn sich dann die Konstellation eines Elektrons und des Kerns verändert, dann verändern sich auch die Felder. Dabei verändert sich das Feld in Richtung der Wechselwirkung und gibt Energie ab. Diese Energie muss irgendwo hin und – in der Tat – wir beobachten, dass das Atom elektromagnetische Strahlung abgibt, z. B. in Form von Licht. Diese Strahlung trägt also die abgegebene Energie. Nun ist die Frage: Ist dies Feldenergie oder Bewegungsenergie?

Auf den ersten Blick könnte man vermuten, dass es sich um Bewegungsenergie handelt, da sich das Licht bewegt. Allerdings ist das Licht im Gegensatz zu sich bewegenden Objekten kein Teilchen, denn es besitzt keine Masse. Es ist vielmehr eine Überlagerung des abgestrahlten elektrischen und magnetischen Feldes. Das bedeutet: **die elektromagnetische Strahlung ist ein elektromagnetisches Feld und trägt dementsprechend Feldenergie.** Auch wenn elektromagnetische Strahlung in gebündelter Form vorkommt, z. B. einem Lichtstrahl oder Laserstrahl, so ist es immer noch Feldenergie, nur eben gebündelt.

**Achtung:** Hier muss den Lernenden sorgfältig die Abgrenzung zur Bewegungsenergie verdeutlicht werden. Besonders dann, wenn im Unterricht auch die Teilchennatur des Lichtes mit Photonen erläutert wird, muss die Abgrenzung zu massiven Objekten vorgenommen werden, um die Feldenergie zu plausibilisieren. Für eine weitere Veranschaulichung kann man auch das folgende Beispiel zum Mikrowellenherd verwenden.

**Beispiel:** In einem Mikrowellenherd wird Energie in die Bewegung der Atome der Speise übertragen. Diese muss irgendwo herkommen: Wenn man das Gerät einschaltet, dann erzeugen wir ein elektromagnetisches Feld (die Mikrowellen), das Feldenergie trägt und den Innenraum des Mikrowellengeräts und damit auch die Nahrung durchsetzt. Wenn dieses Feld dann mit der Nahrung wechselwirkt, werden die Atome der Nahrung zur Bewegung angeregt und erhalten dabei ihre Energie. Diese Energie gibt das elektromagnetische Feld der Mikrowellen ab.

## 5.3 Thermische Energie als mikroskopische Bewegungsenergie

Als Vertreter der mikroskopischen Bewegungsenergie sollte den Schüler:innen auch die thermische Energie im Kontext des EFA erläutert werden. Hier wird die **thermische Energie als mikroskopische Bewegungsenergie von Teilchen** über das Beispiel des schwingenden Fadenpendels eingeführt. Die Leitfrage ist dabei: Was ist eigentlich thermische Energie, Feld- oder Bewegungsenergie?

Das Pendel schwingt hoch und runter. Dabei wird ständig Energie aus dem Gesamtfeld von Kugel und Erde (Gravitationsfeld) in die Bewegung der Kugel übertragen und wieder zurück. Da der Prozess nicht reibungsfrei von statten geht, gelangt das Pendel mit der Zeit immer weniger hoch bzw. wird immer langsamer, bis es irgendwann stehen bleibt. Der Grund dafür ist die Reibung in der Luft sowie an der Aufhängung. Aber wo genau geht die Energie hin, die dann weder im Gravitationsfeld noch in der Bewegung der Kugel steckt? Nach unserem Ansatz muss sie in einem Feld oder in einer Bewegung stecken, die wir offenbar auf den ersten Blick nicht sehen. Nun haben wir aber gerade zuvor festgestellt, dass es auch mikroskopische Felder und Bewegungen gibt, nämlich die der Teilchen, aus denen die Materie besteht. Schauen wir da also genauer nach:

Zunächst in der Luft. Dort stößt das Pendel ständig mit den Luftatomen und versetzt diese dabei in Bewegung. Ein Teil der Energie von vorher wird also in die mikroskopische Bewegung der Luftatome übertragen. Wir kennen das auch als thermische Energie. Der andere Teil der Energie geht durch Reibung in die Aufhängung. Dort reibt die Schnur des Pendels permanent am Material der Halterung. Dabei stößt die Schnur ständig mit den Atomen der Halterung, welche dadurch in Bewegung versetzt werden. Die Bewegungsenergie der Atome kennen wir auch als thermische Energie und merken diese durch z. B. Angreifen der Halterung. Wir können dann spüren, dass sie an der Stelle, wo die Schnur gerieben hat, leicht erwärmt wurde. Immer wenn etwas warm wird, bewegen sich die Atome des Materials schneller (mikroskopische Bewegungsenergie).

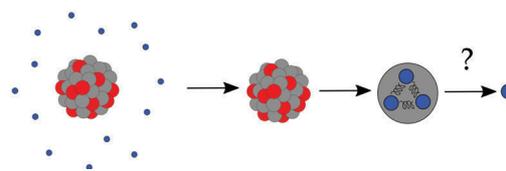
Um die Kollision und Energieübertragung zu veranschaulichen, bietet es sich an, das BB-Bag zu verwenden (siehe dazu den Beitrag von *Becker* und *Hull* im vorliegenden Heft sowie [3]). Demonstriert man den Lernenden dieses Modell, gelingt ihnen die Verknüpfung von thermischer Energie und Bewegungsenergie leichter und sie sind in der Lage, diese Energieform im EFA zu repräsentieren.

## 6. Moderne Physik

Nachdem den Schüler:innen nahegebracht wurde, dass man die traditionellen Energieformen auf Feld- und Bewegungsenergie zurückführen kann und deren Bedeutung so angereichert wird, kann man ihnen auch Aspekte der modernen Physik vermitteln. Hier werden Quarkfelder für Prozesse der starken Wechselwirkung und das Higgsfeld für den Zusammenhang von Elementarteilchen und deren Masse eingeführt.

### 6.1 Quarkfelder

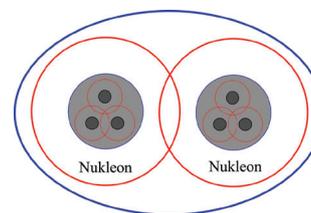
Der Übergang auf die subatomare Ebene erfolgt über eine Motivation. Den Lernenden sollte bewusst werden, dass die Feldenergie auf der nuklearen Skala mit der Masse von Teilchen zusammenhängt. Dazu wird der Aufbau der Materie aus der Perspektive der Masse betrachtet (Abb. 6).



**Abbildung 6:** Aufbau der Materie (schematisch); vom Atom über den Atomkern und den Nukleonen (Protonen und Neutronen) zu den Quarks als Elementarteilchen.

Alle Materie besteht aus Molekülen, die wiederum aus Atomen bestehen. Die Atome bestehen aus Elektronen und einem Atomkern. Der Atomkern ist im Vergleich zu den Elektronen viel schwerer, das heißt die Masse kommt hauptsächlich durch die Masse der Atomkerne zu Stande. Die Atomkerne wiederum bestehen aus Nukleonen, den Protonen und Neutronen. Die Masse all dieser Nukleonen macht die Masse der Materie aus. Aber wenn man nun noch weiter hineinschaut, dann sieht man, dass die Protonen und Neutronen aus Quarks bestehen. Diese sind Elementarteilchen und (zumindest soweit wir das bis heute wissen) neben den Elektronen die kleinsten unteilbaren Teilchen unserer Welt. Jedes Proton und Neutron besteht aus jeweils drei Quarks. Nun würde man vermuten, dass die Massen der drei Quarks zusammen die Masse eines Protons oder Neutrons ergeben. Das ist aber nicht so. Die Quarks machen nur maximal 10 Prozent der Masse eines Nukleons aus. Wo kommen also die restlichen 90 Prozent, also der Hauptanteil der Masse eines Protons oder Neutrons und damit die Masse der Materie her?

Die Antwort ist tatsächlich, was wir gesucht haben, nämlich Energie. Die Quarks sind Quellen eines Feldes, das wir noch nicht kennen, das sogenannte Quarkfeld (Abb. 7). Das Quarkfeld funktioniert genauso wie die Felder, die wir bereits kennen. **Jedes Quark ist also Quelle eines Feldes, die sich dann zu einem Gesamtfeld überlagern.** Und in diesem Gesamtfeld, dem Quarkfeld, steckt Energie. Nach Einstein ( $E = m \cdot c^2$ ) ist Energie gleich Masse und die fehlenden 90 Prozent unserer Masse sind in Wirklichkeit Energie, die im Quarkfeld steckt. Das Besondere hier ist, dass sich die Feldenergie als Masse äußert: **Die Feldenergie des Quarkfeldes ist Masse.**



**Abbildung 7:** Gesamtfeld der Quarks als Einzelfeld der Nukleonen sowie deren Gesamtfeld in einem modellhaften Kern.

**Beispiel:** Man kann den Zerfall von Atomkernen betrachten, zum Beispiel den Alpha-Zerfall (Abb. 8). Dabei gibt ein Atomkern ein Alpha-Teilchen ab, also zwei Protonen und zwei Neutronen, und wird dadurch zu einem kleineren (Tochter-) Kern. Das Alpha-Teilchen hat dabei Bewegungsenergie. Die Frage ist nun, wo kommt die her? Antwort: Aus dem Massen-

unterschied. Der Tochterkern und das Alpha-Teilchen zusammen sind leichter als der Kern am Anfang. Das heißt, ein Teil der Masse des Kerns am Anfang ist als Energie für die Bewegung des Alpha-Teilchens frei geworden. Diese freiwerdende Energie kommt aus dem Quarkfeld. Dadurch, dass sich der Kern verändert, ändert sich auch die Konstellation der Kernbausteine, also der Protonen und Neutronen und damit die Überlagerung der Quarkfelder. Das Quarkfeld tendiert dazu, seine Energie zu minimieren. Das heißt, es gibt Energie ab. Das bemerkt man als Massenunterschied und an der Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens. Wir kennen das auch als Massendefekt.

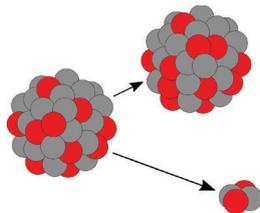


Abbildung 8: Alpha Zerfall (schematisch).

So sieht man, dass das, was wir von früher als **Massendefekt und Bindungsenergie** kennen, letztlich auch auf Feldenergie zurückgeführt werden kann. Wir haben also gesehen, dass man Prozesse, bei denen Masse „verloren“ geht, durch die Abgabe von Energie aus dem Quarkfeld beschreiben kann. Das funktioniert grundsätzlich bei allen Kernprozessen gleich, auch bei der Kernfusion.

### 6.2 Higgsfeld

In einem weiteren Schritt wird das Higgsfeld in den EFA eingebettet. Damit beantwortet man die Frage, wie sich die übrigen 10 Prozent der Masse der Materie äußern, also: Wie hängt die Masse von Elementarteilchen, z. B. Quarks und Elektronen, mit der Energie zusammen? Das Higgsfeld wird hier als omnipräsentes Feld eingeführt, welches das gesamte Universum durchsetzt und mit Elementarteilchen interagiert. Durch die Wechselwirkung mit dem Higgsfeld erhalten Quarks und Elektronen ihre Ruheenergie und deswegen auch ihre Ruhemasse. Das Higgsfeld ist also notwendig, damit die Elementarteilchen ihre Masse bekommen.

An diese Stelle sollte auch betont werden, dass sich das Higgsfeld von den bisherigen Feldern unterscheidet. Denn es entsteht kein Gesamtfeld. Die Energie der Teilchen steckt also nicht im Feld selbst, sondern kommt nur durch dieses zu Stande. Die Ruheenergie ist tatsächlich die Ruhemasse der Teilchen selbst.

**Beispiel:** Da wir nun wissen, dass Energie gleich Masse ist, kann man mit ausreichend Energie aus Bewegungen oder Feldern auch Teilchen mit Masse erzeugen. Wenn man zum Beispiel zwei Lichtbündel, also zwei elektromagnetische Felder, aufeinandertreffen lässt, dann summiert sich deren Feldenergie im Treffmoment und wir haben Energie im Gesamtfeld, die

theoretisch auch in andere Feldenergie oder Bewegungsenergie übertragen werden kann (Abb. 9a). So kann sich zum Beispiel die Energie auch durch das Higgsfeld als Masse manifestieren und wir erhalten neue Elementarteilchen. Man beobachtet das zum Beispiel bei der sogenannten Paarerzeugung, bei der zwei elektromagnetische Felder in zwei Elementarteilchen umgewandelt werden; ein Elektron und ein Positron. Das Positron ist das Antiteilchen des Elektrons. Es entsteht deshalb (und nicht noch ein zweites Elektron), weil neben der Energie auch die Ladung erhalten sein muss. Deshalb entstehen ein negativ geladenes Elektron und ein positives Positron.

Das Prinzip kann auch auf alltagsrelevante Kontexte wie z. B. die in der medizinischen Diagnostik eingesetzte Positronen-Emissions-Tomographie (PET) übertragen werden (Abb. 9b): Dort wird ein radioaktives Präparat verabreicht, das Positronen abgibt. Da sich das Präparat hauptsächlich an der Stelle des Tumors anreichert, werden dort besonders viele Positronen an das Gewebe abgegeben. Diese Positronen sind die Antiteilchen der Elektronen. Trifft ein Positron auf ein Elektron, dann vernichten sich die beiden. Die Masse verschwindet und es entsteht Strahlung. Die Ruhemasse und damit die Ruheenergie von Positron und Elektron wird in das elektromagnetische Feld übertragen. Aus der Wechselwirkung mit dem Higgsfeld stammt dann also die Existenz eines elektromagnetischen Feldes. Wenn man das Feld mit Detektoren nachweist, kann man den Weg der Strahlung zurückverfolgen und den Tumor lokalisieren.

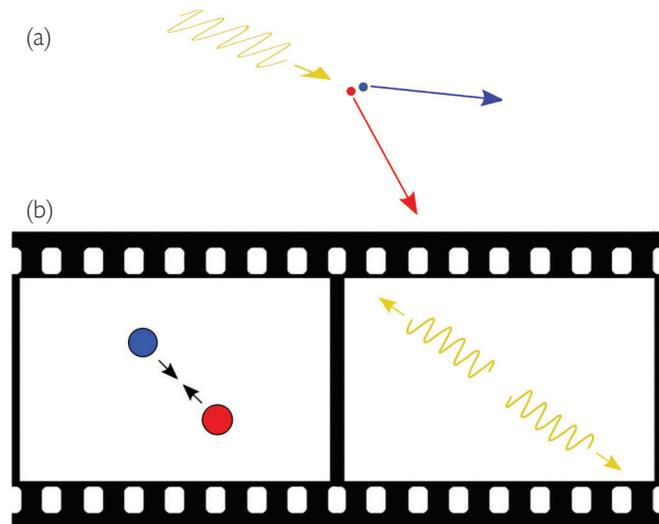


Abbildung 9: Energie wird zwischen elektromagnetischem Feld und Ruheenergie/Masse von Elementarteilchen am Beispiel der Paarerzeugung (a) und Positronen-Emissions-Tomographie (PET, b) übertragen.

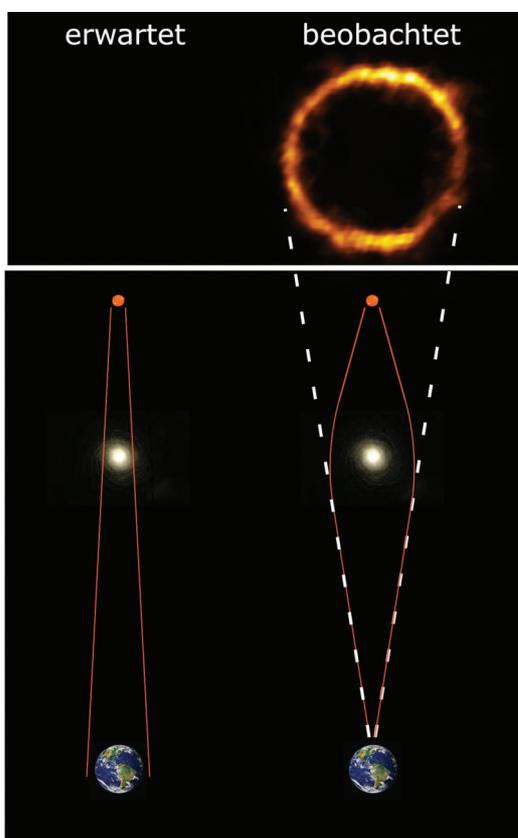
Das Prinzip kann man auf beliebige Beispiele von Teilchenentstehungs- und Annihilationsprozessen anwenden und z. B. Experimente am LHC besprechen. Hier zeigt sich die Tragweite des EFA, denn ein derart konsistentes Prinzip zur Verknüpfung aller Energieformen auf beliebiger Ebene gab es bisher noch nicht.

## 7. Zusatzinhalte

Durch die Tragweite des EFA lassen sich auch astronomische Phänomene diskutieren, bei denen der Zusammenhang von Feldenergie und Masse eine Rolle spielt.

### 7.1 Gravitationslinse

Am Beispiel der Gravitationslinse kann die Ablenkung des Lichtes an einem schwarzen Loch veranschaulicht werden (Abb. 10). Dabei kann man Schüler:innen nahebringen, dass das elektromagnetische Feld der Strahlung durch seine Energie auch durch die Gravitation beeinflusst wird. Man könnte in gewisser Weise über ein gravitatives Gesamtfeld von schwarzem Loch und Strahlung sprechen, das die Tendenz hat, sich zu verkleinern. Dadurch wird die Strahlung vom schwarzen Loch angezogen und abgelenkt; es entsteht die gekrümmte Bahn des Lichtes an der Gravitationslinse.



**Abbildung 10:** Gravitationslinse: Zwischen einer Galaxie und der Erde liegt ein schwarzes Loch (im Bild weiß gezeichnet). Da das Licht von der Galaxie nicht durch das schwarze Loch gelangen kann, erwartet man im Rahmen der klassischen Physik, dass man die Galaxie nicht sehen kann. Durch die Gravitationslinse wird aber in der Beobachtung ein Ring sichtbar. Bild der Gravitationslinse entnommen von eso.org (ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Rizzo et al.); Bild der Erde von pixabay.com.

### 7.2 Gravitationsbedingte Rotverschiebung

Auch die gravitative Rotverschiebung kann bereits mit Lernenden der Sekundarstufe II diskutiert werden. Die Energieabgabe der Strahlung kann auf die Gravitation und die Interaktion von Masse und Energie zurückgeführt werden.

Auch, wenn die beiden letzten Beispiele sehr anspruchsvoll sind, steigern sie das Interesse vieler Schüler:innen und verdeutlichen, dass eine Betrachtung von Phänomenen aus der Perspektive von Energie und Feldern oft praktisch und hilfreich ist. So fördert der Energie-Feld-Ansatz nicht nur die Handlungskompetenz der Lernenden im Umgang mit zwei abstrakten Konzepten, sondern steigert auch das epistemische Verständnis für die Rolle und Relevanz der Energie für Wissenschaft und alltägliches Leben.

## 8. Evaluation des EFA

Der Energie-Feld-Ansatz wurde im Rahmen einer Dissertation nach dem Paradigma der didaktischen Designforschung entwickelt und evaluiert [1]. Dabei stand das Modell der didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann et al. [4] im Fokus, bei dem Lernendenvorstellungen und fachliche Klärung miteinander in Beziehung gesetzt werden. Durch die Ausarbeitung der Konzeptideen und die Verknüpfung von geeigneten Kontexten konnte so die vorgestellte Unterrichtskonzeption geschaffen werden. Die Wirksamkeit des Lehrgangs wurde auf zwei Arten untersucht: Zum einen wurde die Konzeption in mehreren Zyklen qualitativ mittels Akzeptanzbefragungen nach Jung [5] getestet. Zum anderen wurde der Lehrgang von Lehrpersonen in ihren Klassen erprobt und der Lernzuwachs mittels Prä- und Posttest evaluiert.

### 8.1 Ergebnisse der Akzeptanzbefragungen

Die Inhalte wurden insgesamt 21 Schüler:innen der letzten drei Jahrgänge (10 bis 12) im Einzelgespräch vorgestellt und auf ihre Plausibilität, Akzeptanz und Anwendbarkeit überprüft. So konnte festgestellt werden, dass die Ideen der Konzeption verständlich sind, von den Schüler:innen angenommen werden und auch beim Lösen von Aufgaben übertragen werden können. Insbesondere zeigte sich, dass der Lehrgang sehr positiv von den Lernenden aufgenommen und begrüßt wird. In ihrem Feedback äußern sie, dass die Inhalte und deren Aufbau sowie die Beispiele sehr dabei helfen würden, das eigene Energieverständnis zu vertiefen. Sie gaben sogar an, dass man die sonst teilweise sehr undurchsichtigen und verwirrenden Inhalte, insbesondere die Energieformen, so viel besser verstehe und das große Ganze erkenne.

### 8.2 Ergebnisse der Erprobung im Klassensetting

Im Anschluss an die Befragung von Schüler:innen erprobten drei Lehrpersonen den Lehrgang in ihren Klassen mit insgesamt 84 Schüler:innen, verteilt auf die zehnte, elfte und zwölfte Schulstufe. Alle Lernenden wurden bereits in der Sekundarstufe II nach dem traditionellen Ansatz mit Energieformen unterrichtet. Die Vorstellungen der Schüler:innen zum Thema Energie wurden vor und nach dem Unterrichten der Konzeption mittels Prä- und Posttest miteinander verglichen. Dabei stellte sich heraus, dass das

Unterrichten mit dem EFA einen deutlichen Verständniszuwachs erwirken kann. Es zeigte sich, dass sich insbesondere das epistemische Energieverständnis der Lernenden verbesserte. Während viele Lernenden vor dem Unterricht nach dem EFA noch typische Fehlvorstellungen wie „Energie ist etwas, das verbraucht wird“ oder „Energie ist Aktivität“ nennen, sind nach dem Unterricht mit dem EFA kaum noch problematische Vorstellungen sichtbar. Die Schüler:innen sind sogar in der Lage, das Energiekonzept als fundamental und bedeutsam für die Beschreibung und Erklärung von Phänomenen zu erkennen. Die Studie demonstriert, dass der EFA dazu beiträgt, problematische Energievorstellungen zu reduzieren und stattdessen produktive Vorstellungen zu fördern.

Der Energie-Feld-Ansatz besitzt gegenüber dem traditionellen Energieunterricht drei wesentliche Vorteile: Erstens übertrifft er den Unterricht mit Energieformen durch die Verknüpfung mit Feldern in seiner fachlichen Angemessenheit. Zweitens

stellt die Zusammenfassung der Energieformen zu Feldenergie und Bewegungsenergie auch wissenschaftspropädeutisch einen Mehrwert dar. Denn dieses Vorgehen des „Unter-einen-Hut-bringens“ wird schließlich auch in der Fachwissenschaft Physik seit jeher mit der Suche nach einer „Weltformel“ verfolgt. Der dritte Vorteil des EFA ist die empirische Bedeutung des Ansatzes durch die Aussagen der Evaluation. Es konnte gezeigt werden, dass eine Verknüpfung von Energie mit Feldern für das Lernen produktive Vorstellungen begünstigt und besonders nützlich für die Betrachtung von Phänomenen aus der Energieperspektive ist. Die Schüler:innen greifen auf die Konzeptideen zurück und können sie in den verschiedensten Szenarien anwenden. Damit ist die Energie ein mächtiges Werkzeug der Physik, das nun von den Lernenden auch im Unterricht so wahrgenommen wird.

---

Dr. Manuel Becker *Universität Wien, AECC Physik*

## Literatur

- [1] Becker, M. (2023). Der Energie-Feld-Ansatz: Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II. Dissertation, Universität Wien.
- [2] <https://aeccp.univie.ac.at/lehrer-innen/unterrichtskonzeptionen/>
- [3] Hull, M. M., Becker, M., Budimaier, F., Abe, H. & Funahashi, H. (2023). Uses for the HEC BB Bag in Physics Instruction. *The Physics Teacher* 61(1), 26-30.
- [4] Kattmann, U. (2007). Didaktische Rekonstruktion — eine praktische Theorie. In: *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung*. Springer, 93-104.
- [5] Jung, W. (1992). Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties. In R. Duit, F. M. Goldberg & H. Niedderer, Hrsg.: *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN, 278-295.

# Energietheater: Eine verkörperte, kollaborative Lernaktivität zur Erforschung von Energie

Abigail R. Daane, Lindsay Wells, Rachel E. Scherr und Benedikt W. Harrer

**Zusammenfassung:** Das Energietheater ist eine dynamische, verkörperte Lernaktivität, bei der die Schüler:innen den Energiefluss in einer Reihe von Phänomenen darstellen. Ziel des Energietheaters ist es, dass die Lernenden diese Darstellung nutzen, um reale Energieprozesse zu modellieren und dabei das Prinzip der Energieerhaltung und die Unterscheidung von Materie und Energie anzuwenden. Während der Aktivität identifizieren die Schüler:innen die relevanten Objekte in einem gegebenen Szenario und arbeiten zusammen, um Energie durch Prozesse der Übertragung und Umwandlung zu verfolgen. Dieser Artikel beschreibt die Möglichkeiten des Energietheaters für den einführenden Physikunterricht und gibt detaillierte Empfehlungen für die Umsetzung, Tipps für mögliche Herausforderungen und Ideen der Schüler:innen, die sich während der Aktivität entwickeln können.

## 1. Einführung

Das Energietheater ist eine dynamische, verkörperte Aktivität, bei der die Schüler:innen den Energiefluss in verschiedenen Phänomenen darstellen, z. B. das gleichmäßige Brennen einer Glühbirne oder das Kühlen von Lebensmitteln in einem Kühlschrank. [1, 2] Im Energietheater agiert jede:r Teilnehmer:in als eine Energieeinheit, die jeweils eine Form hat. Mit Seilschleifen (oder Klebeband) ausgezeichnete Bereiche auf dem Boden stellen relevante Objekte in einem physikalischen Szenario dar, und die Teilnehmer:innen bewegen sich von einem Bereich zum anderen, um den Energiefluss zwischen den Objekten zu demonstrieren (siehe Abb. 1, 3 und 4). Ziel des Energietheaters ist es, dass die Schüler:innen Energieübertragungen und -umwandlungen in realen Energieszenarien nachverfolgen und dabei das Prinzip der Energieerhaltung anwenden sowie



**Abbildung 1:** In dieser Inszenierung des Energietheaters stellen Schüler:innen der Oberstufe im Biologieunterricht die Energie dar, die auftritt, wenn ein Kaninchen hört, wie ein Apfel zu Boden fällt. Jede:r Schüler:in ist eine Energieeinheit; Seilschleifen auf dem Boden stellen das Kaninchen, den Apfel und die Sonne dar.

Materie und Energie auseinanderhalten. Im Gegensatz zu den meisten Darstellungen von Energie, bei denen es sich um statische Vorher-Nachher-Abrechnungsschemata für Energieänderungen handelt, ist das Energietheater eine dynamische Darstellung, die ein natürliches Sprungbrett zu den fortgeschritteneren Ideen der Energiedichte, des Energiestroms und der Kontinuitätsgleichung darstellt, die diese miteinander verbindet. Die Tatsache, dass die Energieerhaltung in die Darstellung eingebettet ist, ermutigt die Schüler:innen, die Energie in Situationen zu finden, in denen sie vielleicht nicht direkt wahrnehmbar ist.

## 2. Regeln

Die Regeln des Energietheaters lauten wie folgt:

- (1) Jede Person ist eine (unteilbare) Energieeinheit im Szenario.
- (2) Sichtbar ausgezeichnete Bereiche auf dem Boden entsprechen den Objekten im Szenario.
- (3) Jede Person hat zu gegebener Zeit jeweils eine bestimmte Energieform.
- (4) Jede Person zeigt ihre Energieform auf eine zuvor abgestimmte Weise an, oft mit einem Handzeichen (z. B. einem Zeichensymbol für K, um kinetische Energie zu bezeichnen) oder einer ikonischen Bewegung (z. B. „Fächeln“, um thermische Energie zu bezeichnen).
- (5) Teilnehmer:innen bewegen sich von einer Region in eine andere, wenn Energie übertragen wird, und sie ändern ihre Handzeichen, wenn die Energie ihre Form ändert; dabei wird eine „Energiespur“ aufgezeichnet.
- (6) Die Anzahl der Personen, die sich in einer Region aufhalten oder ein bestimmtes Handzeichen machen, entspricht der Energiemenge in einem Objekt bzw. einer bestimmten Form.

## 3. Lernziele

Die nationalen Bildungsstandards bzw. Lehrpläne in Österreich und Deutschland definieren Energie als ein grundlegendes, interdisziplinäres Konzept. [3] Insbesondere sollen die Schüler:innen das Prinzip der Energieerhaltung kennen (Energie kann weder erzeugt noch zerstört werden oder „verloren gehen“), wissen, dass Energie in verschiedenen Formen auftritt und von einer Form in eine andere umgewandelt werden kann, und dass Energie zwischen Objekten innerhalb und über Systemgrenzen hinweg übertragen werden kann.

Diese Lernergebnisse werden vom Energietheater durch seine Gestaltung und Anwendung im Klassenzimmer unterstützt. Das Energietheater betont die Energieerhaltung, indem es Energie als konkrete Einheiten (Menschen) behandelt, die während eines Prozesses weder erscheinen noch verschwinden. Energieveränderungen werden durch Personen dargestellt, die sich im Szenario in das System der Objekte hinein, aus ihm heraus und innerhalb dieses Systems bewegen. Jede Person (Energieeinheit) hat eine Form, die mit einem beobachtbaren Indikator verbunden ist, wie z. B. einem Handzeichen. Schließlich unterstützt das Energietheater das Nachdenken über Mechanismen für Energietransfers und -umwandlungen: Da das Energietheater Energietransfers und -umwandlungen als sichtbare Ereignisse darstellt, werden die Lernenden aufgefordert, ihre Darstellung dieser Ereignisse in Bezug auf kausale Mechanismen zu begründen. Andere Darstellungen wie Balkendiagramme, Tortendiagramme oder Flussdiagramme unterstützen diese Lernziele weniger gut. [4]

Das Energietheater unterstützt die Idee der Energie als interdisziplinäres, bereichsübergreifendes Konzept, da es viele physikalische Situationen in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen modellieren kann (z. B. Achterbahnen, elektrische Schaltkreise, Phasenübergänge, Verbrennungsmotoren oder Photosynthese) und nur wenig vorherigen Energieunterricht erfordert. Die Regeln des Energietheaters setzen sowohl das Gesetz der Energieerhaltung als auch die Konzepte der Energieübertragung und -umwandlung implizit um, unabhängig davon, ob die Schüler:innen sie formal gelernt haben oder nicht. Dank dieser Flexibilität eignet sich das Energietheater für verschiedene Lerngruppen auf unterschiedlichen Niveaus, selbst mit ein und demselben Szenario.

Das Energietheater fördert eine intensive Diskussion über die Natur der Energie. Der offene Charakter dieser Aktivität ermutigt die Schüler:innen dazu, die Szenarien im Detail zu analysieren. Anstatt nach einer einzigen „richtigen“ Antwort zu suchen, verfeinern die Lernenden ihre Modelle kontinuierlich, wenn neue Argumente und Ideen eingebracht werden. Während dieses Prozesses haben Lehrkräfte ständig die Gelegenheit, den Diskussionen der Schüler:innen zuzuhören. Das ermöglicht gezieltes Feedback und eine produktive Beteiligung der Lernenden.

## 4. Durchführung

### 4.1 Vorbereitung

Bei einer typischen Implementierung des Energietheaters stellt die Lehrperson die Regeln vor und weist die Schüler:innen an, ein bestimmtes Szenario darzustellen, z. B. eine Person, die eine Kiste mit konstanter Geschwindigkeit über den Boden schiebt, oder einen Gummiball, der auf den Boden fällt und zurück springt. Bei der Einführung des Energietheaters ist es sinnvoll, sowohl das Szenario als auch die Regeln an prominenter Stelle auszuhängen. Wir haben die Erfahrung gemacht, dass eine einleitende Demonstration mit einer kleinen Gruppe von

Schüler:innen für ein einfaches Szenario den Lernenden hilft, die Regeln schnell zu verstehen und die Art der Konversation zu erleben, die während ihrer Zusammenarbeit erwartet wird. Die Schüler:innen sollten darauf aufmerksam gemacht werden, dass es im Energietheater viele mögliche korrekte Darstellungen für ein bestimmtes Szenario gibt.

Im Rückblick auf unsere Erfahrungen mit dem Energietheater haben wir festgestellt, dass es wichtig ist, allen Schüler:innen die Ziele des Energietheaters deutlich zu machen; wir betonen auch, dass die theatralischen Fähigkeiten unserer Schüler:innen nicht auf die Probe gestellt und in keiner Weise bewertet werden. Stattdessen sehen wir das Energietheater als eine Gelegenheit für die Schüler:innen, ein tiefgründiges Gespräch über ein schwieriges Thema zu führen. In unserem Unterricht werden die Lernenden häufig aufgefordert, ihr neues Verständnis von Konzepten miteinander zu diskutieren. Das Energietheater bietet eine risikoarme Möglichkeit, diese Erfahrung bereits zu Beginn des Kurses einzuführen und zu normalisieren. Wir berichten unseren Schüler:innen von unseren Erfahrungen mit Lernenden aller Alters- und Erfahrungsstufen, von der Mittelstufe bis hin zu Seminaren mit Universitätsprofessoren: Egal wie viel Vorerfahrung mit Physik die Teilnehmer:innen hatten, wurden sie durch ihre Gespräche über Energie herausgefordert, wenn sie am Energietheater teilnahmen. Daher ermutigen wir die Schüler:innen, ihr eigenes Verständnis zu hinterfragen und bei der Erstellung ihrer Energiegeschichten so komplex wie möglich zu werden.

Wir betonen auch, dass ein wichtiges Merkmal dieser Aktivität darin besteht, dass sie ihren Körper einsetzen, um miteinander zu kommunizieren und gemeinsam einen Konsens zu finden. Wir erklären, dass der Einsatz des eigenen Körpers helfen kann, das abstrakte Energiekonzept für sich selbst und für andere zu visualisieren. Darüber hinaus unterstreicht der kooperative Charakter des Energietheaters unsere Erwartung, dass die Schüler:innen zusammenarbeiten, um eine Vielzahl von Aufgaben in der Klasse zu bewältigen.

Das Energietheater eignet sich am besten für Teilnehmer ab Schulstufe 6, die in Gruppen von 7-9 Schüler:innen arbeiten. Gruppen mit weniger als sieben Mitgliedern haben oft nicht genügend Energieeinheiten, um die Transfers und Umwandlungen in vielen Szenarien darzustellen. Bei Gruppen mit mehr als neun Personen ist die Beteiligung insgesamt geringer. Wenn Lernende das Energietheater durchführen, wird das Klassenzimmer schnell zu einem lebhaften und bewegungsreichen Raum der Zusammenarbeit. Wenn möglich, sollte den Schüler:innen ein separater Raum zur Verfügung gestellt werden, in dem sie arbeiten können.

Das Energietheater kann in drei Phasen unterteilt werden: Choreografie, Aufführung sowie Reflexion und Bewertung. In der Choreografiephase arbeiten die Schüler:innen gemeinsam an der Darstellung eines Energieprozesses (Abschnitt 4.2). In der Aufführungsphase tauschen die verschiedenen Gruppen ihre

Ideen aus, indem sie ihre jeweiligen Darstellungen vorführen (Abschnitt 4.3). In der Reflexions- und Bewertungsphase (Abschnitt 4.4) überarbeiten und reflektieren die Schüler:innen schließlich ihre Darstellungen.

## 4.2 Choreografie

Nach der Einführung in die Regeln des Energietheaters dauert die Choreografiephase in der Regel 20-30 Minuten. Der offene Charakter des Energietheaters ermutigt die Schüler:innen zu intensiven Gesprächen über die Details eines bestimmten Szenarios. Die Diskussionen während der Choreografiephase konzentrieren sich oft auf ein bestimmtes Detail des Szenarios; in solchen Fällen kann es sein, dass die Gruppe ihr Energietheater nicht zu Ende führt. In der Physikklasse der zweiten Autorin hatte eine Gruppe von Schüler:innen der 12. Schulstufe beispielsweise eine lebhafte Diskussion über den Unterschied zwischen Licht und Wärme, aber die Zeit reichte nicht aus, um die Choreografie zu beenden. Wenn zeitliche Einschränkungen wichtig sind, kann ein Protokoll verwendet werden, um die Lernenden davon abzuhalten, zu viel Zeit auf einen Aspekt des Planungsprozesses zu verwenden. Ein mögliches Protokoll für die Choreografiephase sieht wie folgt aus:

1. Identifiziert die relevanten Objekte für das Szenario und markiert Bereiche auf dem Boden, die diese Objekte darstellen. (2 Minuten)
2. Wählt ein Handzeichen für jede Energieform im Szenario. (3 Minuten)
3. Verfolgt die Energieübertragungen und -umwandlungen im Szenario. (10-15 Minuten) [5]
4. Entscheidet, welche „Energiespur“ und welche Form von Energie jede Person repräsentiert. (3 Minuten)
5. Übt für die Aufführung des Energietheaters. (2 Minuten)

In Schritt 1 überlegt sich eine Gruppe von Schüler:innen die Objekte, die am Szenario beteiligt sind, und legt Seile in großen Schleifen auf den Boden, eine Schleife für jedes Objekt. Jeder:r Schüler:in, der:die in einer Seilschleife steht, entspricht einer Energieeinheit, die in diesem Objekt enthalten ist. In Schritt 2 identifizieren die Lernenden die im Szenario vorkommenden Energieformen (z. B. chemische Energie, thermische Energie, kinetische Energie usw.) und geben für jede Form ein entsprechendes Handzeichen (z. B. benutzen die Personen in Abbildung 2 ihren Körper, um die Form eines „K“ für kinetische Energie zu bilden). Die Schüler:innen können Formen erfinden, die sie aufgrund ihrer Indikatoren benötigen (z. B. verwenden einige Personen „Bewegungsenergie“ anstelle von kinetischer Energie). Sobald die Schritte 1 und 2 abgeschlossen sind (in beliebiger Reihenfolge), legen die Schüler:innen fest, welche Energieform jedes Gruppenmitglied zu Beginn des Szenarios repräsentiert, wo und wann sie sich zwischen den Objektregionen bewegen und welche Handzeichen sie an welchen Stellen des Szenarios verwenden werden. Die Gruppen sollten ihre Darbietung mindestens einmal proben, bevor sie sie aufführen.



**Abbildung 2:** Schüler:innen der 8. Schulstufe, die am Energietheater eines springenden Balls teilnehmen. Sie stehen in zwei Seilschleifen, um die Energie eines Balls und des Bodens darzustellen. Die Körperform „K“ steht für kinetische Energie.

Während der Choreografiephase sollten die Lehrkräfte die Diskussionen beobachten und die Einhaltung der Regeln überprüfen (z. B. dass die Schüler:innen als Energieeinheiten und nicht als Objekte im Szenario agieren). Von allen Lernenden sollte erwartet werden, dass sie mit ihren Kolleg:innen zusammenarbeiten und sich aktiv am Wissensaufbau während des Energietheaters beteiligen. Die Schüler:innen sollten Fragen und Kommentare an ihre Gruppe richten, wobei die Lehrkraft als Schiedsrichter:in fungiert. Eine Möglichkeit, die Lernenden bei der effektiven Zusammenarbeit zu unterstützen, ist die Zuweisung von Rollen (z. B. Zeitwächter:in oder Erzähler:in), die die Selbstregulierung fördern. Durch die Zuweisung von Rollen wird die Norm gestärkt, dass der Beitrag einer jeden Person wertvoll und für den Fortschritt der Gruppe notwendig ist. Wenn die Schüler:innen im Voraus darüber informiert werden, dass sie nach der Aufführung ihr Verständnis individuell unter Beweis stellen müssen, kann dies ebenfalls die Teilnahme fördern.

Bestimmte Gruppen können schneller einen Konsens über ihre Darstellung erreichen als andere. Die Lehrkraft kann eine eingehendere Analyse fördern, indem sie die Gruppen auffordert: 1) das Szenario mikroskopisch zu betrachten, wenn ihre Darstellung makroskopische Energieübertragungen verwendet, 2) Belege zu identifizieren, die ihr Modell der Energieübertragungen und -umwandlungen unterstützen, oder 3) zu identifizieren, woher die Energie kommt, bevor das Szenario beginnt, oder wohin sie am Ende des Szenarios geht. Wir empfehlen nicht, mehr als ein Szenario auf einmal zuzuweisen, da dies während der Diskussion in der ganzen Klasse zu Verwirrung führen kann.

Im Laufe der Jahre haben wir die Erfahrung gemacht, dass es hilfreich sein kann, wenn die Schüler:innen ihre Ideen vor der Choreografiephase einzeln aufschreiben. Auf diese Weise können sich Personen, die das Szenario lieber allein durchdenken wollen oder müssen, besser auf die Diskussion vorbereiten. Die Bereitstellung von Whiteboards ermöglicht es den Schüler:innen außerdem, das Szenario auszuarbeiten und andere in das Gespräch mit einzubeziehen. Die Beschriftung

der Whiteboards ermöglicht es den Lehrkräften auch, den Fortschritt der Lernenden zu beobachten.

### 4.3 Aufführung

Eine typische Gruppenaufführung für das Energietheater dauert 2-3 Minuten. Da verschiedene Gruppen wahrscheinlich unterschiedliche Objekte, Energieformen und Handzeichen gewählt haben, ist es hilfreich, wenn jede Gruppe ihre Wahl vor der Aufführung dem Publikum erklärt. Die Schüler:innen der siebten Schulstufe in Abbildung 3 stellen beispielsweise das Energieszenario dar, bei dem Sonnenlicht auf einen Solar-Zeppelin trifft. Um das Verständnis ihrer Darstellung zu erleichtern, erklären sie zunächst, dass die Schleife auf der linken Seite den Zeppelin und der Bereich auf der rechten Seite die Umgebungsluft darstellt. Dann demonstrieren sie die Handzeichen, die sie für Licht und thermische Energie gewählt haben. Abschließend führen die Schüler:innen das Szenario zweimal vor, wobei sie jedes Mal ihre Handlungen erläutern.



**Abbildung 3:** Schüler:innen der siebten Schulstufe führen ein Energietheater durch, bei dem das Sonnenlicht auf einen Solar-Zeppelin trifft (ein großer schwarzer Luftsack, der sich in der Sonne aufbläht).

In einer anderen Aufführung (nicht abgebildet) inszeniert eine Gruppe von sieben Oberstufenschüler:innen (aus dem Physikkurs der zweiten Autorin) ein Energietheater für eine Hand, die eine Kiste mit konstanter Geschwindigkeit über den Boden schiebt. Sie arrangieren Seilschlaufen, um die Hand, die Kiste und die Umgebung darzustellen. Sechs Personen befinden sich in dem Bereich, der für die Hand vorgesehen ist, fünf halten ihre Hände in einer „C“-Form, um die chemische Energie darzustellen, und eine läuft auf der Stelle, um die kinetische Energie der Hand darzustellen. Die verbleibende Schülerin befindet sich in dem Bereich, der für die Kiste vorgesehen ist, und läuft auf der Stelle, was wiederum die kinetische Energie der sich bewegenden Kiste darstellt. Wenn eine der fünf „C“-Personen in der Hand von chemischer zu kinetischer Energie wechselt (und beginnt, auf der Stelle zu joggen), bewegt sich der schon joggende Schüler in der Hand zur Kiste und joggt dort weiter, was eine Übertragung von kinetischer Energie darstellt. Seine Ankunft veranlasst die joggende Schülerin, die sich ursprünglich in der Kiste befand, sich von der Kiste in die Umgebung zu bewegen, wo sie sich in thermische Energie umwandelt (sie hört auf zu joggen und beginnt, ihr Gesicht zu fächeln). Diese Sequenz wird fortgesetzt, bis alle fünf Personen,

die ursprünglich chemische Energie in der Hand darstellten, zu thermischer Energie in der Umgebung geworden sind.

### 4.4 Reflexion und Bewertung

Aufbau, Choreographie und Aufführung einer Energietheater Inszenierung können in der Regel innerhalb einer 45-minütigen Unterrichtsstunde abgeschlossen werden. Die Aufführung sollte jedoch nicht das Ende der Lernerfahrung sein; Reflexion und Bewertung sind entscheidend für den Lernerfolg der Schüler:innen. Die für diese Phase benötigte Zeit variiert je nach den verwendeten Aktivitäten.

#### 4.4.1 Vergleich und Gegenüberstellung der Aufführungen

Nach der Aufführung des Energietheaters ist es ideal, sofort eine Diskussion zu führen über: 1) die Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den Darbietungen der Gruppen, 2) die Belege für jeden Transfer und jede Transformation und 3) die Übereinstimmung der Modelle der Schüler:innen mit diesen Belegen. Es kann von Vorteil sein, den Lernenden diese Diskussionsthemen schon vor den Aufführungen mitzuteilen.

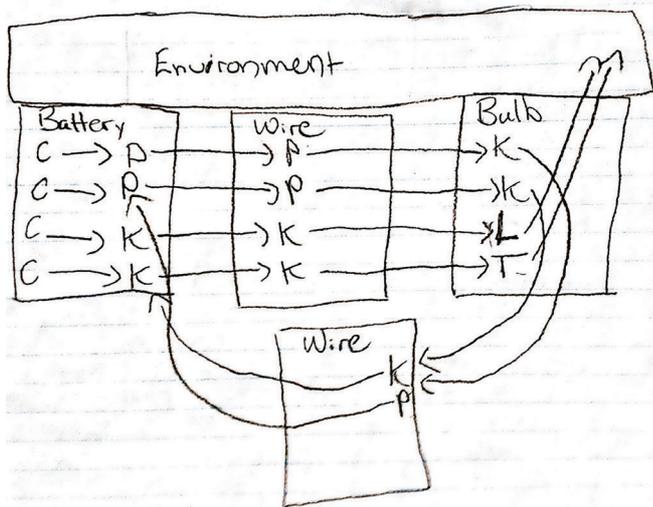
#### 4.4.2 Teilen und kritisieren

Der Vergleich der Energietheateraufführungen der verschiedenen Gruppen wird erheblich erleichtert, wenn die Schüler:innen sie schriftlich festhalten. Sie können schriftliche Darstellungen ihrer Energietheaterleistung entwerfen, entweder gemeinsam in der Klasse (vielleicht auf einem Poster oder einer Tafel) oder individuell als Hausaufgabe. Abbildung 5 ist ein Beispiel für eine Darstellung des Energietheaters für einen einfachen Stromkreis, die im Physikkurs der zweiten Autorin an einer High School verwendet wurde. Hier stellen Buchstaben Energieformen dar und Pfeile zeigen Übertragungen (über Objektgrenzen hinweg) und Umwandlungen (innerhalb von Objekten) einer Energieeinheit. Die Zeichnung stellt vier Energieformen von Schüler:innen dar, die alle mit chemischer Energie beginnen. Diese Zeichnung zeigt, dass sich die chemische Energie der Batterie in kinetische Energie und potenzielle Energie umwandelt. Diese Energie wird auf den Draht übertragen und dann in kinetische Energie, Lichtenergie und thermische Energie in der Glühbirne umgewandelt. Zwei Energieeinheiten werden in Form von Licht und thermischer Energie an die Umgebung abgegeben, und die verbleibenden kinetischen Einheiten werden über einen weiteren Draht zurück in die Batterie übertragen. Die Lehrkraft kann diese Diagramme nutzen, um die Gedanken der Lernenden zu hinterfragen, z. B. „Was verstehst du unter potenzieller Energie?“. Die Schüler:innen können diese Diagramme verwenden, um ihre Modelle mit denen ihrer Kolleg:innen zu vergleichen, oder sie können einen Absatz schreiben, in dem sie die Energieprozesse beschreiben und alle verbleibenden Fragen oder Bedenken festhalten. All diese Strategien zur formativen Bewertung des Energietheaters können den

Lernenden helfen, ihre Vorstellungen von Energie kritisch zu prüfen und zu überarbeiten. Diese dauerhafteren Darstellungen können auch zur Benotung und für individuelles Feedback verwendet werden. Weitere Optionen für die Reflexion und Bewertung von Energietheateraufführungen werden auf einer Website beschrieben, die Lehrkräfte bei der Umsetzung von Energiedarstellungen wie Energiewürfeln und Energietheater unterstützen soll [6].

### 5. Typische Alltagsvorstellungen

Das Energietheater gibt den Lehrkräften die Möglichkeit, die Ideen der Schüler:innen zum Thema Energie in allen Phasen der Aktivität zu entdecken, da die Lernenden ihre Gedanken durch Sprache, Körperbewegungen, Gesten usw. sichtbar machen. Einige typische Ideen der Schüler:innen tauchen regelmäßig in unseren Beobachtungen der Umsetzung des Energietheaters in den Klassen der Mittel- und Oberstufe auf. Tabelle 1 fasst diese gängigen Ideen zusammen mit den Ansätzen der Lehrkräfte, die den Lernerfolg der Lernenden fördern können.



**Abbildung 4:** Die Zeichnung eines Physikschrülers der zwölften Schulstufe zum Energietheater, das den Energiefluss in einem Stromkreis darstellt. C, P, K, L und T stehen jeweils für chemische, potentielle, kinetische, Licht- und thermische Energie.

**Tabelle 1:** Typische Alltagsvorstellungen, Manifestationen davon und Handlungsmöglichkeiten der Lehrkraft

Typische Alltagsvorstellungen	Manifestation im Energietheater	Mögliche Maßnahmen der Lehrkraft
<p>Die Schüler:innen könnten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energie als eine verbrauchbare Substanz betrachten (z. B. Nahrung, Treibstoff). [7]</li> <li>nicht zwischen Materie und Energie unterscheiden. Jüngere Lernende denken vielleicht, dass alles, was existiert, Materie ist, einschließlich Wärme, Licht und Elektrizität. [8]</li> </ul>	<p>Schrüler:innen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>handeln manchmal als Objekte und nicht als Energieeinheiten (z. B., wenn sich ein Ball bewegt, bewegen sie sich so, wie sich der Ball bewegt). In diesem Fall assoziieren die Lernenden manchmal Seilschlaufen mit Energieformen statt mit Objekten.</li> <li>stellen manchmal mikroskopische Objekte (z. B. Elektronen) als Energie dar.</li> </ul>	<p>Die Lehrkraft kann die Schüler:innen auffordern zu artikulieren, was sie darstellen und was durch die Bereiche auf dem Boden repräsentiert wird.</p>
<p>Die Schüler:innen könnten denken:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energie ist nicht messbar oder quantifizierbar. [9]</li> <li>Energie kann verbraucht werden oder an die Umwelt verloren gehen. [10]</li> </ul>	<p>Die Schüler:innen könnten darstellen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energieeinheiten, die an Größe zunehmen (oder abnehmen), indem sie höher stehen, sich tief hocken, sich schneller oder langsamer bewegen oder die Seilschlaufen verlassen.</li> <li>dass am Ende eines Prozesses keine Energie übrigbleibt, indem sie sich auf den Boden legen.</li> </ul>	<p>Die Lehrkraft kann:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>die Schüler:innen an folgende Regel erinnern: Menschen sind Energieeinheiten, die weder erzeugt noch zerstört werden können.</li> <li>die Lernenden auffordern, nach Belegen zu suchen, dass Energie umgewandelt oder übertragen wurde, um einen scheinbaren „Verlust“ von Energie zu erklären.</li> </ul>
<p>Die Schüler:innen berücksichtigen möglicherweise nicht das entsprechende System und die Umgebung, was zu offensichtlichen Widersprüchen zum Prinzip der Energieerhaltung führt. [11]</p>	<p>Die Schüler:innen könnten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Objekte einbeziehen, die für die Energieprozesse nicht relevant sind.</li> <li>sich nicht auf den Anfang und das Ende des Szenarios einigen (z. B. das Ende der Energieübertragung und -umwandlung).</li> </ul>	<p>Die Lehrkraft kann:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>die Lernenden auffordern, die räumlichen und zeitlichen Grenzen des Szenarios zu klären.</li> <li>von den Schüler:innen verlangen, dass sie ihre Argumente für die Einbeziehung (oder Nicht-Einbeziehung) bestimmter Objekte begründen, aber die Klasse daran erinnern, dass mehrere Interpretationen richtig sein können.</li> </ul>

## 6. Vorteile des Energietheaters für Lehrkräfte

Im Laufe der Jahre haben wir festgestellt, dass die Moderation des Energietheaters auch uns dabei hilft, bessere Lehrkräfte zu sein. Schüler:innen werden selten in größere Gruppen aufgeteilt, um gemeinsam Lösungen für Probleme zu erarbeiten. Das Energietheater bietet uns Lehrkräften die Gelegenheit, die vielen verschiedenen Möglichkeiten, wie Schüler:innen zu einer produktiven Gruppenarbeit beitragen können, zu erkennen und zu würdigen.

Wir sind auch der Meinung, dass das Energietheater uns hilft, die aufkommenden Ideen unserer Lernenden über Energie besser zu verstehen. Wir haben festgestellt, dass wir nach einigen Jahren, in denen wir ein bestimmtes Szenario verwendet haben, in der Lage waren, die meisten Variationen in den Gesprächen unserer Schüler:innen sowie ihre Antworten auf unsere Diskussionsfragen vorherzusehen. Dadurch hatten wir zunächst das Gefühl, ein (weitgehend) vollständiges Bild davon zu haben, was die Schüler:innen über Energie dachten. Als wir jedoch das Szenario änderten, eröffnete sich uns eine völlig neue Landschaft von Ideen der Lernenden!

Das Energietheater kann besonders spannend sein, wenn das Gespräch in ein interdisziplinäres Gebiet abschweift, wie z. B. bei Diskussionen über biologische oder chemische Energiespeichermechanismen. Wir sind der Meinung, dass vor allem diese Möglichkeit des interdisziplinären Lernens durch das Energietheater weiter erforscht werden sollte.

## Literatur

- [1] „Verkörpert“ bzw. „Verkörperung“ ist die – eher unzureichende Übersetzung der Begriffe „embodied“ bzw. „Embodiment“. Es geht dabei darum, das Lernen durch entsprechendes körperliches Agieren zu unterstützen.
- [2] Scherr, R. E., Close, H. G., Close, E. W., Flood, V. J., McKagan, S. B., Robertson, A. D., Seeley, L., Wittmann, M.C., & Vokos, S. (2013). Negotiating energy dynamics through embodied action in a materially structured environment. *Physical Review – Special Topics: Physics Education Research*, 9(2) und Scherr, R. E., Close, H. G., Close, E. W., & Vokos, S. (2012). Representing energy. II. Energy tracking representations. *Physical Review – Special Topics: Physics Education Research*, 8(2).
- [3] Kultusministerkonferenz (Hrsg.) (2005). Beschlüsse der Kultusministerkonferenz: Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10). München: Wolters Kluwer; Kultusministerkonferenz (Hrsg.) (2020). Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020); BMBWF (2023) Lehrplan Physik für die Sekundarstufe I. Wien: BMBWF.
- [4] Scherr, R. E., Close, H. G., McKagan, S. B., & Vokos, S. (2012). Representing energy. I. Representing a substance ontology for energy. *Physical Review – Special Topics: Physics Education Research*, 8(2).

## 7. Danksagung

Wir danken allen Mitwirkenden des „Energy Project“ an der Seattle Pacific University für ihre Mitarbeit, darunter Eleanor W. Close, Hunter G. Close, Lezlie S. DeWater, Stamatis Vokos, Sarah B. McKagan und Kara Gray. Unser besonderer Dank gilt Lane Seeley für seine umfangreiche Arbeit an der Energy Project Resources-Website sowie Amy D. Robertson und Leslie J. Atkins für ihre Unterstützung bei der Erstellung des Originalmanuskripts. Wir möchten auch den Lehrkräften, die an den Energieprojektkursen teilgenommen haben, dafür danken, dass sie dem ersten Autor erlaubt haben, in ihren Klassen zu hospitieren. Diese Arbeit wurde zum Teil von der Knowles Science Teaching Foundation und der National Science Foundation (DRL 0822342) unterstützt.

*Dieser Beitrag ist eine erweiterte Version eines bereits 2014 im The Physics Teacher erschienenen Artikels (Daane, A. R., Wells, L., & Scherr, R. E. (2014). Energy Theater. The Physics Teacher, 52(5), 291-294.) Er wurde von Martin Hopf ins Deutsche übertragen.*

---

**Abigail R. Daane** South Seattle College, Seattle, WA

**Lindsay Wells** Oregon High School, Oregon, WI

**Rachel E. Scherr** University of Washington Bothell, Bothell, WA

**Benedikt W. Harrer** University at Buffalo, Buffalo, NY

- [5] In diesem Schritt müssen die Schüler:innen möglicherweise die in den Schritten 1 und 2 getroffenen Entscheidungen noch einmal überdenken. Dies sollte gefördert werden.
- [6] <https://scholars.spu.edu/representingenergy/> (Stand November 2023)
- [7] Watts, D. M. (1983). Some alternative views of energy. *Physics Education*, 18(5), 213.
- [8] Stavy, R. (1991). Children's ideas about matter. *School Science and Mathematics*, 91, 240-244.
- [9] Solomon, J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, 20(4), 165.
- [10] Solomon, J. (1992). Getting to know about energy: In school and society. Bristol, PA: The Falmer Press.
- [11] Ametlier, J., Pinto, R. (2002). Students' reading of innovative images of energy at secondary school level. *International Journal of Science Education*, 24, 285-312

# Thermische Energie mit dem BB-Bag veranschaulichen

Manuel Becker und Michael M. Hull

Mit einem BB-Bag wird der Zusammenhang von thermischer Energie und Teilchenbewegung greifbar. Es hilft dabei, die unsichtbaren mikroskopischen Prozesse auf der Teilchenebene auf eine anschauliche Ebene zu heben. Damit ist das BB-Bag ein nützliches Tool für den naturwissenschaftlichen Unterricht (siehe auch [1]).

## 1. Grundidee

Die thermische Energie von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen hängt mit der kinetischen Energie der Teilchen zusammen. Sie steigt mit dem mittleren Betrag der Geschwindigkeit der Teilchen, also der Bewegungsenergie der Atome und Moleküle. Dies ergibt sich aus der Maxwell-Boltzmann-Verteilung  $p(v)$  für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Geschwindigkeiten. Eine größere thermische Energie bedeutet eine größere mittlere Geschwindigkeit und damit eine größere kinetische Energie der Teilchen. Dieser Zusammenhang ist fundamental für ein solides Verständnis der Thermodynamik. Deshalb ist es wichtig, dass Schüler:innen dies nicht nur als Merksatz „auswendig lernen“, sondern auch in seiner Bedeutung verstehen. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, dass die Lernenden nicht nur verbale Erklärungen erhalten, sondern auch eine anschauliche Vorstellung davon bekommen, was eigentlich passiert [2]. Das BB-Bag gibt den Lernenden ein greifbares Modell zur Hand, mit dem Sie die unsichtbaren, nur indirekt bemerkbaren Prozesse der thermischen Energieübertragung nachvollziehen und so auch makroskopische Prozesse besser nachvollziehen können. Es wurde erstmals 1990 im Physikunterricht von Yasukazu Kaneko in Japan eingeführt [1,3]. Seitdem wird es von vielen Lehrpersonen gerne als Hilfsmittel eingesetzt, das die Lernenden erfahrungsgemäß fasziniert und das Unsichtbare durch ein Modell visualisiert [1,4].

## 2. Was ist ein BB-Bag?

Ein BB-Bag ist eine durchsichtige Plastiktüte, gefüllt mit einer bestimmten Anzahl von kleinen Plastikkügelchen (BBs, siehe Abb. 1). Es hat sich gezeigt, dass sich hierfür die Kügelchen der Air-Soft-Munition sehr gut eignen. Daher stammt auch die Bezeichnung BBs („Baby Bullets“). Das BB-Bag stellt ein Modell für die Zustände in einem idealen Gas dar. Die Tüte modelliert das zu betrachtende Volumen, z. B. von Luft. Die frei beweglichen Kügelchen repräsentieren die Teilchen, also die Luftmoleküle. Die Besonderheit des BB-Bags ist die richtige Wahl der Größenverhältnisse: Die Volumenverhältnisse von Kügelchen/BB-Bag und Luftmoleküle/Luftvolumen sind gleich. Das heißt, das Verhältnis der Volumina der Kügelchen und damit ihrer Größe zum BB-Bag entspricht dem Volumenverhältnis



**Abbildung 1:** Aufgeblasenes BB-Bag mit 26 gelben BBs (Plastikkügelchen) mit 6 mm Durchmesser von der Seite (a) und von oben (b) [1].

der Luftmoleküle zu dem von ihnen eingenommenen Raumbereich bei Raumtemperatur. Es gilt also:

$$\frac{V_{\text{BBs}}}{V_{\text{BB-Bag}}} = \frac{V_{\text{Moleküle}}}{V_{\text{Luft}}}$$

**Beispiel:** Wir verwenden BB-Kügelchen mit einer Größe von ca. 6 mm. Das entspricht der handelsüblich erwerbbar Größe für BBs. Die Tüte hat dabei ein Volumen von ca. 5 Litern (23,5 cm x 33,5 cm) und beinhaltet 26 BBs. Für kleinere bzw. eine andere Anzahl von Kügelchen muss die Größe der Tüte dann variiert werden. In jedem Fall sollte das Verhältnis aber stimmen: Die Größen im Modell sind etwa  $1,7 \cdot 10^7$  mal größer als in der Realität (vgl. Tab. 1). Dabei entspricht der Durchmesser der Kügelchen von 6 mm einem kinetischen Durchmesser der Stickstoffmoleküle von 3,6 Å. Hier wird näherungsweise angenommen, dass sich Luft über die Größeneigenschaften von Stickstoff beschreiben lässt. Die Größen sind [5,6] entnommen. Für ein BB-Bag mit einem Volumen von 5 L kann man dann über die ideale Gasgleichung

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$$

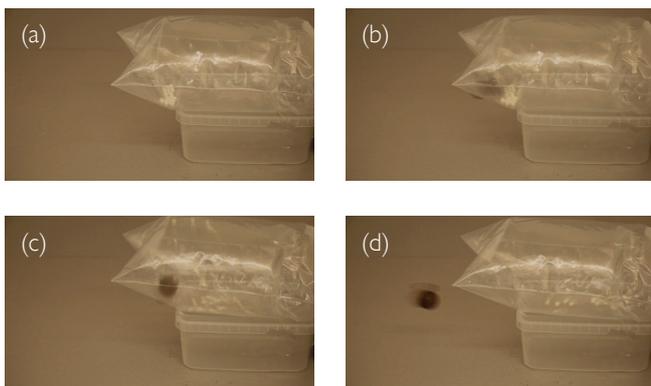
mit einem Normaldruck von  $10^5$  Pa und einer Raumtemperatur von 300 K die Anzahl  $N = 26$  der Stickstoffmoleküle berechnen. Die Rechnung lässt sich so auf beliebige Volumina und Größen von BB-Bag und Kügelchen übertragen.

**Tabelle 1: Vergleich von Modell und Luft**

BB-Bag (Modell)	Repräsentation Luft
Größe des BB-Bags (Tüte)	betrachtetes Volumen von Luft
Anzahl von BBs (Plastikkügelchen) mit bestimmtem Radius	Anzahl von Luftmolekülen, die einen bestimmten Raumbereich einnehmen
Durchmesser $d = 6$ mm der BBs	Kinetischer Durchmesser $3,6 \text{ \AA} = 3,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ der Luftmoleküle (Stickstoff)
26 Kügelchen in einem 5 Liter BB-Bag	26 Stickstoffmoleküle in einem Raum von $1,09 \cdot 10^{-21} \text{ m}^3$ (Normaldruck und Raumtemperatur)
freie Bewegung der Kügelchen	freie Bewegung der Moleküle (ideales Gas)
Stöße der Kügelchen untereinander	Stöße der Luftmoleküle untereinander
Druckempfinden durch die Stöße der Kügelchen mit der Wand des BB-Bags	Luftdruck in einem bestimmten Raumbereich

### 3. Verwendung des BB-Bags

Durch Schütteln des BB-Bags bewegen sich die Kügelchen und stoßen aneinander. Je schneller man schüttelt, umso schneller bewegen sich die Kügelchen. Man kann dabei deutlich spüren, wie die BBs durch Stöße mit der Außenwand der Tüte auf die Handfläche drücken. Dieses Empfinden des „Teilchendrucks“ kann als phänomenologische Analogie des Luftdrucks gesehen werden. Denn bei größerer thermischer Energie bewegen sich die Teilchen im Mittel schneller und der Druck steigt. Dieser Zusammenhang wird durch das greifbare BB-Bag für die Schüler\*innen leicht erfahrbar und nachvollziehbar. So kann den Lernenden die Abhängigkeit von Temperatur, Teilchenbewegung und Druck anschaulich nähergebracht werden. Auch empirisch zeigt sich, dass für Lernende der Sekundarstufe II ein solches Modell förderlich für das Konzeptverständnis sein kann [7].



**Abbildung 2:** Sequenz eines Fadenpendels, das von links kommend (a) auf ein BB-Bag trifft (b) und die BBs in Bewegung versetzt (c), bevor es langsamer zurückschwingt (d); nach [1].

### 4. Anwendung: Veranschaulichung der Energiedissipation

Ein häufiges Problem im Energieunterricht ist die Vermittlung der Energieerhaltung. Insbesondere bei Prozessen der thermischen

Energieumwandlung fällt es den Lernenden oft schwer, die Energieerhaltung nachzuvollziehen. Hier ist oft nicht klar, warum zum Beispiel ein Fadenpendel stoppt: Was passiert mit der kinetischen und potenziellen Energie? Die Energie geht scheinbar „verloren“.

Dass hier eine Energieübertragung vom makroskopischen System des Pendels zum nicht mehr sichtbaren mikroskopischen System der Umgebung stattfindet, ist nicht direkt ersichtlich. Natürlich kann man zeigen, dass sich z. B. die Halterung erwärmt. Aber unabhängig von der empirischen Nachvollziehbarkeit ist es sinnvoll, den Lernenden auch eine modellhafte Hilfestellung anzubieten. Das BB-Bag kann dabei unterstützen, den Blick auf die mikroskopische Ebene zu richten und so das Phänomen der Energiedissipation greifbar zu machen. Dazu lässt man das schwingende Pendel mit dem BB-Bag kollidieren (siehe Abb. 2). Das Pendel wird dabei abgebremst und versetzt durch die Impuls- und Energieübertragung die Kügelchen in Bewegung. Dies entspricht modellhaft der Veränderung des mittleren Tempos der Luftmoleküle. Man kann beobachten, dass eine stärkere Abbremsung zu mehr Energieübertragung führt [8].

Diese einfache, aber sehr prägnante Veranschaulichung hilft den Lernenden dabei, eine kognitive Verknüpfung von Modell und Erfahrung herzustellen. So wird nicht nur über die Erklärung, sondern auch visuell die eigentlich unsichtbare Bewegung von Teilchen und damit deren kinetische Energie mit der thermischen Energie verknüpft. Insbesondere die Verknüpfung von thermischer Energie mit der mikroskopischen Bewegungsenergie von Teilchen hilft den Schüler:innen, diese Energieform und deren Bedeutung besser zu verstehen.

### 5. Limitationen des Modells

Wie jedes Modell besitzt auch die Verwendung des BB-Bags Grenzen seiner Anwendbarkeit. Zum einen besitzt die Tüte eine äußere Hülle, die es bei einem Gas in dieser Form nicht gibt. Zum anderen werden die Teilchen als elastische Kügelchen modelliert. Die Stöße untereinander und auch zwischen Pendel und BB-Bag sind nicht vollständig elastisch, während sich die kinetische Energie im idealen Gas durch die „Stöße“ untereinander nicht verändert. Außerdem muss beachtet werden, dass sich die Kügelchen im Pendel-Beispiel zu Beginn nicht bewegen, während sich die Luftmoleküle auch vor der Interaktion bereits in einer thermischen Bewegung befinden. Hier geht es also um die Veranschaulichung der Veränderung der Energie, also den Energietransfer, und nicht um die Darstellung der absoluten Energie. Es ist deshalb wichtig, den Lernenden nicht nur die Chancen, sondern auch die Grenzen dieser Anwendung zu erläutern.

Ein weiterer Aspekt, den man unbedingt beachten sollte ist, dass sich im Modell zwischen den Kügelchen Luft befindet. In der Realität ist das nicht der Fall, hier bilden die Atome und Moleküle selbst die Luft, der Zwischenraum ist leer. Dieser

Umstand sollte den Lernenden unbedingt bewusst gemacht werden, um Fehlvorstellungen möglichst vorzubeugen.

Darüber hinaus eignet sich das Modell besonders für das Modellieren von idealen Gasen. Möchte man die Energieübertragung auf Flüssigkeiten oder Festkörper veranschaulichen, kann man weniger Merkmale übertragen. Wenn nämlich die Teilchen stärker miteinander wechselwirken, z. B. Bindungen miteinander eingehen, ist das Modell der freien Kügelchen nur

begrenzt sinnvoll. Nichtsdestotrotz lässt sich der grundlegende Zusammenhang ebenfalls übertragen: Mehr thermische Energie bedeutet ein größeres Tempo der Teilchen, also eine größere Bewegungsenergie und damit eine höhere Temperatur.

---

Dr. Manuel Becker *Universität Wien, AECC Physik*  
 Dr. Michael M. Hull *University of Alaska, Fairbanks*

## Literatur

- [1] Hull, M. M., Becker, M., Budimaier, F., Abe, H. & Funahashi, H. (2023). Uses for the HEC BB Bag in Physics Instruction. *The Physics Teacher*, 61(1), 26-30.
- [2] Bransford, J. D. & Schwartz, D. L. (1999). Chapter 3: Rethinking transfer: A simple proposal with multiple implications. *Review of research in education*, 24(1), 61-100.
- [3] Takeda, Y. (1991). Related materials for 'Tigers die and leave skin', the story of the development of molecular motion models. Übersetzt aus dem Japanischen. Wakaba Shobō.
- [4] Itakura, K. (2019). Hypothesis-Experiment Class (Kasetsu). Original: Kisetsusya, 1969, übersetzt: Universität Kyoto Publishing, red. von Haruhiko Funahashi.
- [5] Nakamura, A. (2022). Let's Enjoy "If You Could See an Atom"! Innovative Science Teaching Through HEC Enables Early Exposure to Atomic Theory. Kindle e-Book.
- [6] Ito, M. (1998). Little Atomists. Tokyo: Kasetu-sha Co. Ltd..
- [7] Becker, M. (2023). Der Energie-Feld-Ansatz: Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes für den Energieunterricht der Sekundarstufe II. Dissertation, Universität Wien.
- [8] Das Video ist unter <https://youtu.be/xO5HmQBkTfE> abrufbar

# Der Einsatz von Infrarotkameras im Physik- und Chemieunterricht

Jesper Haglund und Christopher Robin Samuelsson

## 1. Einleitung

Energie ist ein abstraktes Konzept, welches für Schüler:innen teilweise schwierig zu erfassen ist. Eine Infrarotkamera (IR-Kamera) ermöglicht es uns jedoch, sonst unsichtbare thermische Phänomene zu sehen, und bietet somit Möglichkeiten, Energie für SchülerInnen konkreter zu machen. In der Ausgabe 2/2019 von Plus Lucis zum Thema Strahlung wurden bereits viele Beispiele für den Einsatz von Infrarotkameras im Physik- und Chemieunterricht vorgestellt, siehe z. B. [1]. In diesem Artikel vertiefen wir dieses Thema, indem wir unsere Erfahrungen mit der Einführung von IR-Kameras in der fachdidaktischen Forschung und in der Praxis des Physik- und Chemieunterrichts in Schweden [2; 3] auf Universitäts-, Schul- und sogar Vorschuleebene teilen.

Wärmebildtechnik mit IR-Kameras basiert auf dem Phänomen, dass alle Objekte Wärmestrahlung aussenden, bei Objekten unter Alltagsbedingungen vor allem im Infrarotbereich. Das Spektrum der Strahlung hängt von der Temperatur der Oberfläche eines Objekts und seinem Emissionsvermögen ab. Durch die Erfassung der Strahlung und unter der Annahme des Emissionsgrades wird die Temperatur verschiedener Teile der Oberfläche mit Hilfe des Planck'schen Strahlungsgesetzes abgeleitet und als Farbbild auf dem Bildschirm der IR-Kamera dargestellt. Weitere Einzelheiten zur Physik und Technik der Wärmebildtechnik finden Sie in [4-6].

## 2 Einsatz von Infrarotkameras in der Unterrichtspraxis

Was die Motivation betrifft, so sind die Schüler:innen in der Regel sofort von der Verwendung von Infrarotkameras begeistert. Wir haben die Erfahrung gemacht, dass sie sagen, wie cool es ist, diese Technologie zu benutzen (ein „Wow-Effekt“), wenn sie damit herumspielen können. Das ist zwar keine Garantie dafür, dass sie etwas lernen, aber es erleichtert die Einführung von Aktivitäten, bei denen IR-Kameras eingesetzt werden.

In der Regel führen wir die Schüler:innen in die Verwendung von IR-Kameras ein, indem wir sie die Umgebung frei erkunden lassen. Sie sehen, dass sich bestimmte Objekte von einem Hintergrund abheben, der sich im thermischen Gleichgewicht befindet. Lampen und elektronische Geräte und nicht zuletzt ihr eigener Körper sind deutlich wärmer als die Umgebung. Mit Hilfe eines ausgewählten Farbschemas der IR-Kamera, z. B. dem Regenbogenmodus, bei dem Objekte mit hoher Temperatur weiß und rot, Objekte mit niedriger

Temperatur blau und dazwischen liegende Objekte allmählich gelb und grün dargestellt werden, erleben die Schüler:innen die Technologie wie eine thermische Lupe.

Wir haben die Erfahrung gemacht, dass das, was die Schüler:innen mit den IR-Kameras sehen, weitgehend mit ihrer Intuition übereinstimmt. Wir weisen sie jedoch darauf hin, dass die gemessenen Temperaturen vom Emissionsgrad der Oberfläche abhängen. Die meisten alltäglichen Materialien wie Stein, Holz, Kunststoffe, Kleidung, menschliche Haut oder Wasser haben einen hohen Emissionskoeffizienten, und wir stellen die IR-Kameras entsprechend ein. Im Gegensatz dazu haben glänzende Metalle und die meisten Glasarten einen geringeren Emissionsgrad, und die von den IR-Kameras angezeigten Temperaturen sind niedriger als die tatsächlichen Temperaturen. Außerdem reflektieren Oberflächen mit niedrigem Emissionsgrad die Wärmestrahlung, so dass auf dem Bildschirm der IR-Kamera Reflexionen von warmen Gegenständen, z. B. von Körpern, erscheinen können. Dies kann den Lernenden Probleme bereiten, wenn sie ihre Umgebung mit den IR-Kameras frei erkunden, aber es kann auch als Lernmöglichkeit genutzt werden, um etwas über den Emissionsgrad zu lernen.

Wenn sich die Schüler:innen mit der Technologie vertraut gemacht haben, haben wir häufig die Methode Vorhersagen – Beobachten – Erklären (POE) [7] verwendet, um Demonstrationen oder Laboraufgaben zu strukturieren, die verschiedene thermische Phänomene betreffen. Nachdem die Lernenden den Laboraufbau gesehen haben, sollen sie zunächst vorhersagen, was ihrer Meinung nach passieren wird, dann genau beobachten, was passiert, und anschließend etwaige Unterschiede zwischen ihren Vorhersagen und Beobachtungen erklären.

Aufgrund der Vielseitigkeit der Technologie eignen sich IR-Kameras auch für offenere, forschungsbasierte Ansätze, bei denen die Schüler:innen die Aufgabe erhalten, eine Frage zu formulieren und ein Experiment zu entwerfen, um die Frage zu beantworten [8]. Solche Ansätze hängen von der Vertrautheit der Lernenden mit dem Untersuchungsprozess ab, abgesehen von der Auswahl thermischer Phänomene auf einem für die Schüler:innen geeigneten Niveau.

Wir haben IR-Kameras in erster Linie für qualitative Beobachtungen von Objekten mit unterschiedlichen Temperaturen eingesetzt oder um den Schüler:innen die Möglichkeit zu geben, Prozesse zu beobachten, die mit Temperaturveränderungen einhergehen. Messungen mit IR-Kameras können jedoch auch

zur quantitativen Modellierung von thermischen Phänomenen verwendet werden, z. B. zur Wärmeleitung durch Festkörper [9] oder zur Energieumwandlung, wenn eine Glasmurmelt durch ein Stück Pappe geschossen wird [10].

### 3. Physikalische und chemische Phänomene im Infrarotbereich

#### 3.1 Visualisierung der Energieumwandlung in thermische Energie

IR-Kameras können zur Visualisierung eines breiten Spektrums von thermischen Phänomenen verwendet werden. Im Unterricht wird die Umwandlung verschiedener Energiearten in thermische Energie häufig als Erklärung für Energieverluste herangezogen. Solche Erklärungen werden jedoch selten durch konkrete Beobachtungen oder Messungen untermauert, so dass sie für die Schüler:innen abstrakt bleiben.

Wenn eine 1 kg schwere Stahlkugel aus einer Höhe von 2 m auf den Boden fällt, wird die Energie allmählich von potentieller Energie in kinetische Energie umgewandelt. Im Moment des Aufpralls auf den Boden wird ein Großteil der Energie in thermische Energie umgewandelt. Bei geeigneten Bodenoberflächen (z. B. Asphalt im Freien oder ein Notizblock im Haus) können die Schüler:innen mit einer IR-Kamera einen Temperaturanstieg an der Aufprallstelle von etwa 3° C feststellen [2, 11] (s. Abb. 1). Die Temperatur sinkt allmählich wieder auf die ursprüngliche Temperatur ab, was eine Diskussion über Wärmeleitung und thermisches Gleichgewicht ermöglicht. In manchen Fällen versuchen die Schüler:innen, den Temperaturanstieg zu maximieren, indem sie die Kugel mit höherer Geschwindigkeit werfen. In ähnlicher Weise können IR-Kameras eingesetzt werden, um den Verlust mechanischer Energie aufgrund von Reibung zu veranschaulichen. Beispiele hierfür sind die „Hitzeschlieren“ auf dem Asphalt, wenn ein Fahrrad oder ein Auto bis zum Stillstand abbremst [4], oder wenn ein 5-kg-Metallzylinder über eine raue horizontale Oberfläche gezogen wird [10].



**Abbildung 1:** IR-Bild, das den Temperaturanstieg beim Aufprall einer Stahlkugel auf Asphalt zeigt.

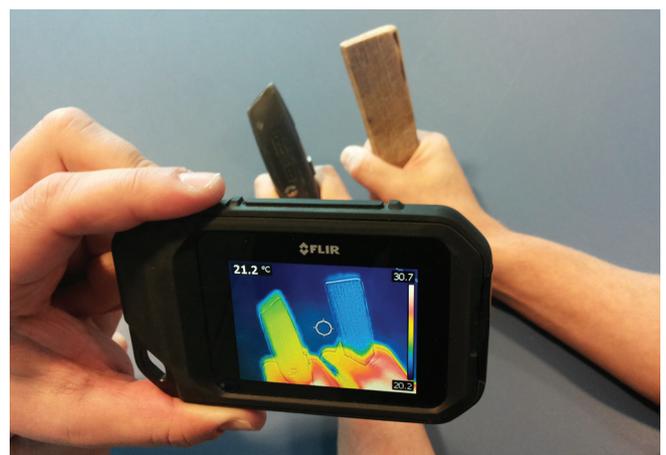
Abgesehen von Energieverlusten in der Mechanik können IR-Kameras auch zur Untersuchung der Umwandlung von Energie in elektrischen Schaltkreisen verwendet werden.

Die Schüler:innen können die Temperaturunterschiede zwischen Glühlampen und Energiesparlampen als Einstieg in Diskussionen über Energieeffizienz vergleichen oder die Temperatur von Widerständen in parallelen und seriellen Schaltungen untersuchen [12]. Interessanterweise können die Schüler:innen mit IR-Kameras auch Wärmeverluste aufgrund von Übergangswiderständen an den Verbindungspunkten zwischen einem Widerstand und einer Lochrasterplatine sehen [13].

#### 3.2 Wärmeleitung durch Metalle und isolierende Materialien

Wenn man ein Stück Metall und einen Holzgegenstand bei einer Raumtemperatur von etwa 20 °C berührt, z. B. verschiedene Teile der Stühle und Tische in einem Klassenzimmer, fühlen sie sich unterschiedlich an. Das Metall fühlt sich kälter an als das Holz. Wenn die Schüler:innen hören, dass die Gegenstände die gleiche Temperatur haben, da sie sich im thermischen Gleichgewicht befinden, sind sie oft verwirrt, da sie dazu neigen, ihre Temperaturempfindung für ein genaues Thermometer zu halten.

Im Rahmen unserer Forschung haben wir das Potenzial der Einführung von POE-Experimenten mit IR-Kameras untersucht, um das Phänomen anhand der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der Materialien zu erklären. Die Schüler:innen haben Experimente mit IR-Kameras durchgeführt, bei denen sie die Unterschiede in der Wärmeleitung beobachten konnten, wenn sie die Enden eines Eisenblechmessers und eines Holzstücks in die Hand nahmen. Das Messers erwärmt sich allmählich entlang seiner ganzen Länge, während das Holzstück nur lokal an der Kontaktstelle wärmer wird, da es ein guter Wärmeisolator ist (siehe Abb. 2).



**Abbildung 2:** Ein Blechmesser leitet die Wärme von der Hand, die es hält, weg, während ein Stück Holz gegen Wärmeleitung isoliert.

Wir haben jedoch festgestellt, dass Schüler:innen verschiedener Altersstufen auch nach solchen Experimenten Schwierigkeiten haben, die Unterschiede in ihrem Temperaturempfinden zu erklären. Wir sind zu dem Schluss gekommen, dass ein Modell der Wärmeleitung von Objekten mit höherer Temperatur zu

Objekten mit niedrigerer Temperatur vor solchen Experimenten explizit eingeführt werden muss, damit die Schüler:innen mit dieser Erfahrung etwas anfangen können [2].

Eine häufige Anwendung von IR-Kameras außerhalb des Bildungswesens ist die Erkennung von Wärmelecks und die Gewährleistung der Energieeffizienz in Gebäuden. Es wurde festgestellt, dass die Konfrontation von Hauseigentümer:innen mit IR-Bildern von Wärmelecks in ihren Häusern deren Installation von Zugluftschutzmaßnahmen und Energienutzung beeinflusst [14]. Die Untersuchung der Energieeffizienz von Gebäuden mit Hilfe von IR-Kameras ist auch ein geeignetes Thema für den Unterricht.

Die Schüler:innen können dazu angehalten werden, nach Wärmelecks in den Schulgebäuden zu suchen, einschließlich Zugluft und so genannter „Kältebrücken“, d. h. Wärmeleitung durch die Wände, z. B. aufgrund einer schlechten Wahl der Baumaterialien.

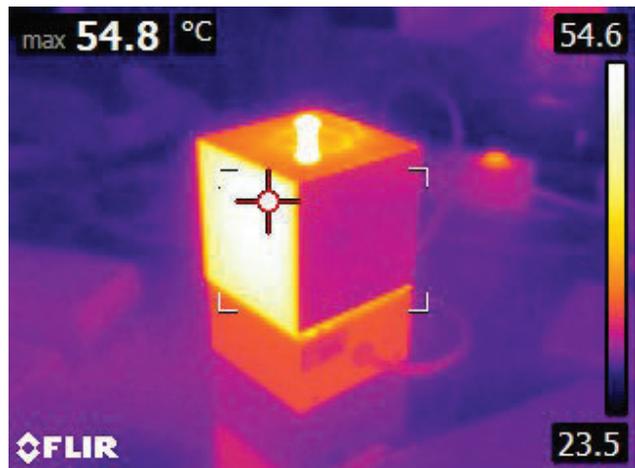
### 3.3 Wärmestrahlung

IR-Kameras bieten auch die Möglichkeit, die Eigenschaften der Wärmestrahlung und ihre Wechselwirkung mit festen und flüssigen Stoffen zu untersuchen. Ein Leslie-Würfel ist ein hohler Metallwürfel, der von innen durch Wasser oder eine Glühlampe erhitzt wird. Die vier vertikalen Seiten haben unterschiedliche Oberflächeneigenschaften, in unserem Fall glänzendes Metall, raues Metall, weiße Farbe und schwarze Farbe.

Wenn der Leslie-Würfel erwärmt wird, zeigt das glänzende Metall aufgrund des geringen Emissionsgrades mit einer IR-Kamera eine niedrigere Temperatur an als die tatsächliche Oberflächentemperatur, zeigt aber Reflexionen von umliegenden Objekten (s. Abb. 3). Was viele Schüler:innen mehr überrascht, ist, dass die weiß und schwarz gestrichenen Seiten ähnliche Temperaturmesswerte aufweisen. Obwohl schwarze Oberflächen sichtbares Licht, z. B. von der Sonne, besser absorbieren als weiße Oberflächen, haben sie ein ähnlich hohes Emissionsvermögen im fernen Infrarotbereich [3].

Wenn die Schüler:innen im Rahmen der Einführung von IR-Kameras ihre Umgebung absuchen, bemerken sie oft die Reflexionen der Wärmestrahlung ihres Körpers in Fenstern und Tafeln. Dies ist ein guter Ausgangspunkt für Diskussionen über die thermischen Eigenschaften von Glas. Die Hauptfunktionen eines Fensters bestehen darin, das Sehen zu ermöglichen – sie lassen sichtbares Licht durch – und gleichzeitig Wärmeverluste aus dem Gebäude an die Umgebung zu vermeiden (Abbildung 4).

Die Reflexion der Wärmestrahlung aus dem Gebäudeinneren ist daher vorteilhaft [3]. Im Gegensatz dazu durchdringt ein erheblicher Teil der IR-Strahlung einen aufgeblasenen Ballon, obwohl er für sichtbares Licht undurchlässig ist.



**Abbildung 3:** IR-Bild eines Leslie-Würfels. Die linke Seite ist mit schwarzer Farbe beschichtet und zeigt eine Temperatur von bis zu 54,8 °C an, was der tatsächlichen Temperatur entspricht. Die rechte Seite besteht aus poliertem Metall, das aufgrund seines geringen Emissionsgrades eine viel niedrigere Temperatur aufweist.



**Abbildung 4:** Ein Fenster lässt die IR-Strahlung eines menschlichen Körpers nicht durch, reflektiert aber die IR-Strahlung einer Hand und der in Richtung Fenster gehaltenen IR-Kamera.

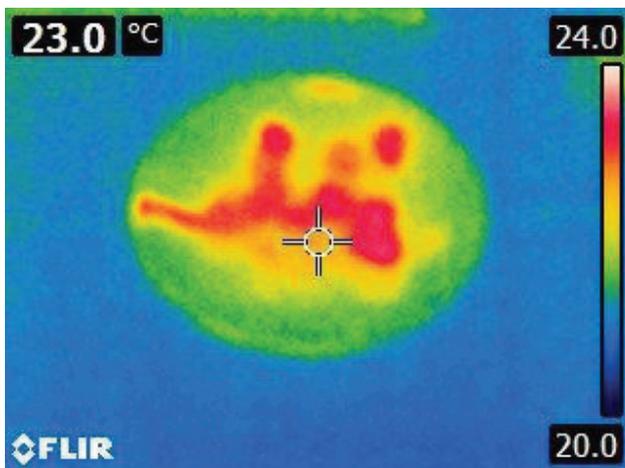
### 3.4 Chemische Reaktionen

Bisher haben wir uns vor allem mit dem Einsatz von IR-Kameras im Physikunterricht beschäftigt. Es gibt jedoch auch großartige Möglichkeiten, diese Technologie in den Unterricht anderer Fächer wie Chemie, Biologie und Technik einzuführen. In der Chemie sind IR-Kameras besonders leistungsfähig bei der Untersuchung des Ablaufs chemischer Reaktionen.

Beim Lösen von Salzen in Wasser kommt es zu einer Nettoänderung der Enthalpie (der Enthalpie der Lösung), die durch das Hess'sche Gesetz beschrieben und durch einen Born-Haber-Zyklus angenähert werden kann. Die Berechnung der Lösungsenthalpie zeigt, ob das Auflösen des Salzes in Wasser zu einer endothermen oder exothermen Reaktion führt. Die Schüler:innen neigen dazu, die Temperaturen vor und nach den Reaktionen zu messen, um die Nettoänderung der Enthalpie zu ermitteln, erhalten aber nur einen begrenzten Einblick in die Vorgänge während des Prozesses. Mit einer IR-Kamera können sie die Temperaturunterschiede an verschiedenen Stellen der

Wand eines Becherglases sehen, wenn sich ein Feststoff in Wasser auflöst (ein ungerührter Prozess funktioniert am besten), und lokale Temperaturanstiege und -abfälle feststellen [12]. Oft können sie auch Konvektionsmuster aufgrund von Änderungen der Dichte in der Lösung feststellen. Ein besonders spannendes Experiment ist die Zugabe von ein paar Tropfen konzentrierter  $H_2SO_4$  in Wasser. Zunächst passiert nicht viel, aber nach etwa 13-15 Sekunden erscheint ein roter Fleck auf der Oberfläche, der sich schnell ausbreitet [15].

In einem Experiment sollten Chemiestudierende der Universität festes  $NaOH$  in Wasser geben, um die exotherme Reaktion zu untersuchen. Als sie einen Teil des Salzes einige Zeit lang der Raumluft aussetzten, bemerkten sie plötzlich, dass es glänzend und klebrig geworden war. Zunächst konnten sie sich das Phänomen nicht erklären, aber als sie mit einer IR-Kamera sahen, dass die Temperatur des Salzes gestiegen war (Abb. 5), erkannten sie, dass eine exotherme Reaktion eingesetzt hatte, da das Salz Feuchtigkeit aus der Luft aufgenommen hatte [16], also das Ergebnis des Zerfließens von  $NaOH$ .

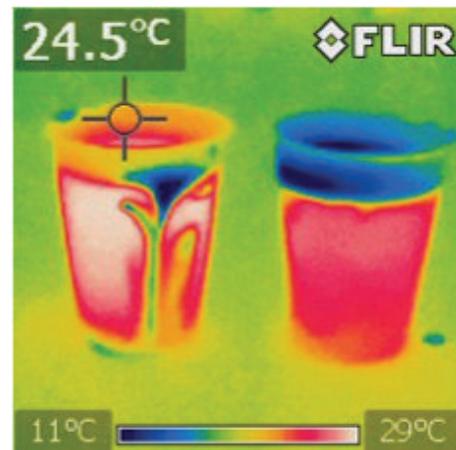


**Abbildung 5:** Eine exotherme Reaktion tritt auf, wenn die Temperatur der  $NaOH$ -Pellets ansteigt, da sie Feuchtigkeit aus der Luft anziehen.

### 3.5 Phasenübergänge

Phasenübergänge sind ein weiteres Phänomen, bei dem die Einführung von IR-Kameras das Verständnis der Schüler:innen verbessern kann. Wenn man einen Eiswürfel in einem Glas mit Wasser bei Raumtemperatur schmelzen lässt, fließt das schmelzende Wasser aufgrund der höheren Dichte von kaltem Wasser zum Boden des Glases. Hält man den Eiswürfel an den Rand des Glases, kann man die Konvektion mit einer IR-Kamera beobachten [17]. In der Lehre kann das Phänomen mit der Wasserumwälzung in Seen verglichen werden, wenn die Oberfläche im Herbst gefriert. Im Gegensatz dazu bleibt das Schmelzwasser eines Eiswürfels, der in eine gesättigte Kochsalzlösung gelegt wird, an der Oberfläche der Lösung (Abb. 6). Hier hat die lauwarmer Lösung eine höhere Dichte als das kalte, frische Schmelzwasser [17]. Dies kann mit den Folgen des schmelzenden Eisschildes auf Grönland und der möglichen Verringerung des Golfstroms in Verbindung gebracht werden, da frisches Oberflächenwasser möglicherweise nicht so schnell

auf den Grund des Atlantiks sinkt wie Oberflächenwasser mit höherer Salzkonzentration.

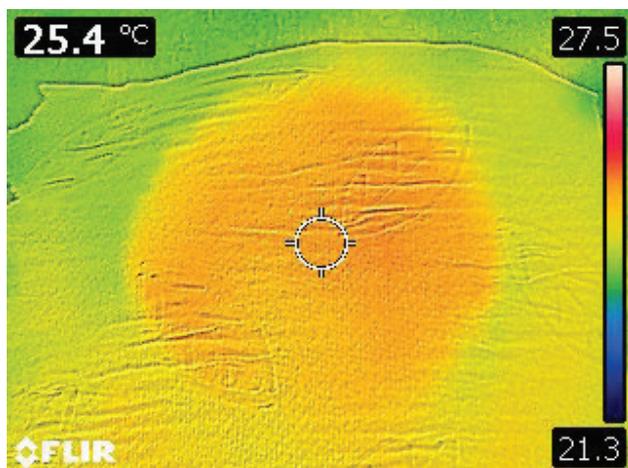


**Abbildung 6:** Das Schmelzwasser eines Eiswürfels fließt nach unten, wenn er in Wasser mit Raumtemperatur gelegt wird (linke Tasse), aber das Schmelzwasser eines Eiswürfels, der in eine gesättigte Salzlösung gelegt wird, bleibt oben (rechte Tasse).

Wenn man Kochsalz auf einen Eiswürfel streut, beginnt das Eis zu schmelzen und das Salz löst sich im Schmelzwasser auf. Wenn schwedische Schüler:innen gebeten werden, vorherzusagen, was passiert, denken sie, dass das Eis schmilzt und die Temperatur ansteigt, weil sie wissen, dass wir in Schweden im Winter Salz auf die Straßen streuen, um Schnee und Eis zu beseitigen, und sie diesen Schmelzvorgang mit Erwärmung assoziieren. Sie sind daher überrascht, wenn sie mit einer IR-Kamera sehen, dass die Temperatur der Salzlösung drastisch sinkt, in der Regel auf etwa  $-20^\circ C$  (der Gefrierpunkt von gesättigtem Salzwasser liegt bei etwa  $-21,1^\circ C$ ). Es wird Energie benötigt, um die Wasserstoffbrückenbindungen des Eises und die Ionenbindungen des Salzes aufzubrechen, wodurch die Temperatur sinkt. Der Gefrierpunkt der Lösung sinkt aufgrund der Mischungsentropie (das chemische Potenzial sinkt, wenn sich das Salz in der Wasserschicht auf dem Eis auflöst), was zur Erklärung dieses endothermen Prozesses herangezogen werden kann.

IR-Kameras bieten auch die Möglichkeit, Temperaturveränderungen aufgrund von Verdunstung und Kondensation zu beobachten. Mit einer IR-Kamera können die Lernenden beispielsweise das Ergebnis der Verdunstungskälte auf der Oberfläche von Wasser in einem Glas sehen, ein Phänomen, das für Schüler:innen verwirrend sein kann [18]. Legt man ein Stück Papier auf ein mit Wasser gefülltes Glas, das Raumtemperatur hat, und lässt dabei einen Luftspalt von etwa 5 mm, steigt die Temperatur des Papiers innerhalb weniger Sekunden an, da die feuchte Luft an der Unterseite des Papiers kondensiert (Abb. 7). Nach weniger als einer Minute geht die Temperatur des Papiers wieder auf Raumtemperatur zurück, da ein Gleichgewicht zwischen Kondensation und Verdunstung erreicht wird. Wenn das Papier anschließend von der Oberseite des Glases entfernt wird, sinkt die Temperatur, da das Wasser aus dem Papier verdunstet [17]. In unserer Untersuchung

wurde festgestellt, dass Lehrkräfte im Vorbereitungsdienst den Temperaturabfall damit erklären, dass für den Phasenwechsel von fest zu flüssig Energie benötigt wird, und die Verdunstung mit dem Kältegefühl in Verbindung bringen, das man hat, wenn man aus der Dusche kommt [18].



**Abbildung 7:** Die Teile eines Papierhandtuchs, die auf einen Becher mit Wasser bei Raumtemperatur gelegt werden, erhöhen ihre Temperatur aufgrund der Kondensation der feuchten Luft.

#### 4. Abschließende Betrachtung

In unserer Lehr- und Forschungstätigkeit sind wir auf viele potenzielle fachdidaktische Anwendungen von IR-Kameras gestoßen, von denen wir einige hier vorgestellt haben. Lehrpersonen können experimentelle Aktivitäten zu einer breiten

Palette von Themen planen. Insgesamt haben wir jedoch die Erfahrung gemacht, dass die spannendsten Phänomene und Anwendungen von den Schüler:innen selbst entdeckt werden, wenn sie ihre Umgebung erkunden. So stellte beispielsweise eine Gruppe von Sekundarstufenschüler:innen, die sich zu Landwirt:innen ausbilden lassen, fest, dass Euterentzündungen bei Sauen überraschenderweise eine niedrigere Temperatur haben als das umgebende milchproduzierende Gewebe [19]. Das Beispiel mit dem klebrigen NaOH ist ein weiteres Beispiel. Wir möchten die Lehrkräfte daher ermutigen, bei der Einführung der Technologie in den Unterricht viel Zeit für die Erkundung und Untersuchung durch die Schüler:innen zu lassen.

Die Kosten sind immer ein Thema, wenn es um Investitionen in neue Geräte geht. In den letzten Jahrzehnten wurden einfach zu bedienende Modelle von Infrarotkameras zu Preisen eingeführt, die für viele Schulen und Universitäten erschwinglich sind. So kostet beispielsweise eine FLIR C5, ein portables Modell mit geringer Reichweite, etwa 800 €. Infrarotdetektoren, die an ein Smartphone angeschlossen werden können, wie die FLIR ONE, sind zu niedrigeren Preisen erhältlich. Die Preise hängen weitgehend von der gewünschten Bildauflösung ab.

Jesper Haglund *Karlstads Universitet, Schweden*

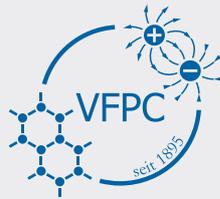
Christopher Robin Samuelsson

*Uppsala Universitet, Schweden*

#### Literatur

- [1] Schüttler, T., & Girwidz, R. (2019). Kostengünstige Infrarotsensoren im Physikunterricht. *Plus Lucis* (2), 16-21.
- [2] Haglund, J., Jeppsson, F., Hedberg, D., & Schönborn, K. J. (2015). Thermal cameras in school laboratory activities. *Physics Education*, 50(4), 424-430.
- [3] Melander, E., Haglund, J., Weiszflog, M., & Andersson, S. (2016). More than meets the eye – infrared cameras in open-ended university thermodynamics labs. *The Physics Teacher*, 54(9), 528-531. <https://doi.org/10.1119/1.4967889>
- [4] Vollmer, M., & Möllmann, K.-P. (2017). *Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [5] Vollmer, M. (2022). Fundamentals of thermal imaging. In J. Haglund, F. Jeppsson, & K. J. Schönborn (Eds.), *Thermal cameras in science education* (pp. 7-25). Springer International Publishing.
- [6] Karstädt, D., Möllmann, K.-P., Pinno, F., & Vollmer, M. (1998). Sehen im Infrarot – Grundlagen und Anwendungen der Thermographie. *Physik in unserer Zeit*, 29(1), 6-15.
- [7] White, R., & Gunstone, R. (1992). *Probing understanding*. The Falmer Press.
- [8] Xie, C., & Hazzard, E. (2011). Infrared imaging for inquiry-based learning. *The Physics Teacher*, 49(6), 368-372. <https://doi.org/10.1119/1.3628268>
- [9] Oss, S. (2022). Thermal infrared imaging as a bridge between mathematical models and the laboratory. In J. Haglund, F. Jeppsson, & K. J. Schönborn (Eds.), *Thermal cameras in science education* (pp. 27-43). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85288-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85288-7_3)
- [10] Planinšič, G., Nered, U., & Etkina, E. (2022). An infrared camera: Multiple ways to use a modern device in introductory physics courses. In J. Haglund, F. Jeppsson, & K. J. Schönborn (Eds.), *Thermal cameras in science education* (pp. 147-167). Springer International Publishing.
- [11] Meiringer, M. (2013). *Schülervorstellungen zur Infrarotkamera und deren Aufnahmen* [Master thesis, Universität Wien].
- [12] Wong, C. P., & Subramaniam, R. (2022). Infrared thermal imaging: Applications for physics, chemistry and biology education. In J. Haglund, F. Jeppsson, & K. J. Schönborn (Eds.), *Thermal cameras in science education* (pp. 169-186). Springer International Publishing.
- [13] Netzell, E., Jeppsson, F., Haglund, J., & Schönborn, K. J. (2017). Visualising energy transformations in electric circuits with infrared cameras. *School Science Review*, 98(364), 19-22.
- [14] Goodhew, J., Pahl, S., Auburn, T., & Goodhew, S. (2015). Making heat visible: promoting energy conservation behaviors through thermal imaging. *Environment and behavior*, 47(10), 1059-1088.
- [15] Xu, X., Wu, M., & Wang, X. (2019). Smartphone visualization of thermal phenomena with thermal imaging accessories. *Journal of Chemical Education*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00131>
- [16] Samuelsson, C. R., Elmgren, M., & Haglund, J. (2019). Hot vision: Affordances of infrared cameras in investigating thermal phenomena. *Designs for Learning*, 11(1), 1-15.

- [17] Xie, C. (2011). Visualizing chemistry with infrared imaging. *Journal of Chemical Education*, 88(7), 881-885.
- [18] Samuelsson, C. R., Elmgren, M., Xie, C., & Haglund, J. (2019). Going through a phase: Infrared cameras in a teaching sequence on evaporation and condensation. *American Journal of Physics*, 87(7), 577-582. <https://doi.org/10.1119/1.5110665>
- [19] Haglund, J., & Henriksson, F. (2021). Introducing infrared cameras in the study of pigs' physiology and health as cognitive apprenticeship in vocational education. *Action Research and Innovation in Science Education*, 4(1), 5-11. <https://doi.org/10.51724/arise.38>



## Neues aus dem Verein

### Generalversammlung

In der Generalversammlung des Vereins am 13.12.2023 wurde als Vorstand gewählt:

Obmann: Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf

stv. Obfrau: Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens

Kassiererin: Mag. Andrea Hauff-Achleitner

stv. Kassiererin: Dr. Marianne Korner

Schriftführerin: Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer

stv. Schriftführerin: HS-Prof. Dr. Ingrid Krumphals

Wir danken den langjährigen Kassaprüfenden (Ass Prof. Dr. Philipp Spitzer und Mag.<sup>a</sup> Sarah Zloklikovits) für Ihr Engagement für den Verein. Ab diesem Vereinsjahr übernehmen Mag.<sup>a</sup> Louisa Winter und Dr. Marvin Rost diese Funktionen.

### Stellungnahme zur neuen Lehrer:innenbildung

Der Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts hat im Anhörungsverfahren eine Stellungnahme zum Gesetzentwurf des BMBWF abgegeben:

Wir fordern den Gesetzgeber dazu auf,

- von der Idee einer Gleichzeitigkeit von Masterstudium und Berufseinstieg Abstand zu nehmen.
- sicherzustellen, dass ohne Bachelorabschluss NICHT unterrichtet werden darf,
- dass Bachelorabsolvent:innen NUR in der Sekundarstufe I eingesetzt werden und
- dass in der Sek. II NUR Personen mit Masterabschlüssen eingesetzt werden.
- die im Studium vorgesehenen ECTS für Fachdidaktik und für Pädagogik zu erhöhen.



Österreichische Post AG  
SM 17Z041123 S

Verein zur Förderung des physikalischen  
und chemischen Unterrichts,  
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien

DVR 0558567  
VRN 668472729