

## Der Energie-Feld-Ansatz: Design-Forschung zur Entwicklung und Evaluation eines Unterrichtskonzeptes für den Energieunterricht der Oberstufe

Manuel Becker\*, Martin Hopf\*

\*Universität Wien, Didaktik der Physik, Porzellangasse 4, 1090 Wien  
manuel.becker@univie.ac.at, martin.hopf@univie.ac.at

### Kurzfassung

Trotz seiner zentralen Bedeutung für das Beschreiben und Erklären von Phänomenen wird das abstrakte Konzept der Energie und insbesondere das Prinzip der Energieerhaltung nach dem traditionellen Unterricht von vielen Schüler\*innen nur unzureichend verstanden [1]. Als Lösung schlagen mehrere Quellen vor, dass ein Verknüpfen von Energie mit Feldern oder Systemen das Verständnis für Energie erleichtern könnte (u.a. [1,2]). Ziel des Energie-Feld-Ansatzes (EFA) ist es, die Vorteile bereits existierender Vorschläge aufzugreifen und ein Unterrichtskonzept für die Sekundarstufe II zu entwickeln, in welchem die traditionellen Energieformen retrospektiv zu nur zwei Formen zusammengeführt werden: Bewegungsenergie und Feldenergie. Mit dem EFA werden Schüler\*innen somit auch Aspekte modernster Physik (z.B. Teilchenphysik, Higgsfeld) nähergebracht. Nach dem Modell der didaktischen Rekonstruktion [3] wird aktuell mit Hilfe der Methode der Akzeptanzbefragungen [4] und qualitativer Textanalyse [5] die Lernwirksamkeit des Unterrichtskonzeptes evaluiert und dieses weiterentwickelt. Der Artikel gibt Einblick in die wesentlichen Merkmale und ersten Ergebnisse des EFA.

### 1. Hintergrund

Das Konzept Energie dient in vielen Curricula als Basiskonzept, das nicht nur als eigenständiges Thema, sondern auch international jahrgangsübergreifend immer wieder Anwendung findet (siehe z.B. crosscutting concepts der NGSS nach [6]). Ein Grund dafür ist die weitreichende Bedeutung dieses physikalischen Konzeptes als Erhaltungsgröße. Ebenso wie andere Erhaltungssätze wie der Impuls- oder Drehimpulserhaltungssatz bestimmt auch der Energieerhaltungssatz den Rahmen, in dessen Grenzen physikalische Prozesse ablaufen können. Zusätzlich spielt die Energie nicht nur in der Physik, sondern interdisziplinär und kontextunabhängig auch in anderen Bereichen der Naturwissenschaften eine tragende Rolle. Denn die Kenntnis über die Energie eines bestimmten Systems und deren zeitliche Entwicklung besitzt nicht nur abstrakt mathematische (z.B. über den Lagrange- oder Hamilton-Formalismus), sondern auch phänomenologische Aussagekraft für die Beschreibung von Phänomenen. So bietet die Kenntnis über die Energie eines Systems auch Informationen über die Grenzen des systemischen Verhaltens. Betrachtet man außerdem die zu Grunde liegenden Wechselwirkungen, kann man auch Aussagen bzw. Vorhersagen über das Verhalten eines Systems machen. Letztlich stellt die Energie also eine für Beschreibungen und Erklärungen nützliche Größe dar, deren grundlegende Bedeutung und Relevanz jedem\*r Naturwissenschaftler\*in bewusst ist.

Dieses Verständnis über die Bedeutung der Energie auch Schüler\*innen zu vermitteln, scheint angesichts

der Vorteile also sinnvoll und ist schon lange ein Ziel des Physikunterrichts. Dennoch gelingt es vielen Lernenden bis zum Ende ihrer Schulzeit nicht, ein angemessenes Verständnis von Energie zu erlangen [1]. Die folgenden Abschnitte skizzieren einen knappen Ausschnitt der in der fachdidaktischen Forschungslandschaft bereits vertretenen Probleme und entsprechenden Lösungsansätze. Ein thematisch passender Überblick über die Problematik wird auch in [1] gegeben.

#### 1.1. Problematik des Energieunterrichts

Der traditionelle Energieunterricht fokussiert meist auf die Einführung unterschiedlicher Energieformen wie z.B. kinetische, potenzielle, elektrische, chemische, Solar- oder Kernenergie. Die Unterscheidung und Verwendung dieser Formen begründet sich hauptsächlich durch ihre Bedeutung und ihr Anwendungsfeld. So wirkt die Untergliederung der eigentlich unitären Größe *Energie* in verschiedene Formen von Energie oft auch aus praktischen Gründen vorteilhaft [1]. Um die aufgegliederten Formen wieder mit der Energieerhaltung in Verbindung zu bringen, muss dann über die Übertragung bzw. Umwandlung von Energie gesprochen werden. Daraus resultiert allerdings die Gefahr, dass Begriffe wie innere, chemische oder Kernenergie zu Blackboxen werden und Schüler\*innen zu dem Schluss kommen, die einzelnen Formen seien möglicherweise auch einzeln erhalten [7]. So wird von einigen Autor\*innen kritisiert, dass es sich bei der Einführung der Energieformen eher um eine bloße Umbenennung handelt, die nicht zu einem tieferen Verständnis führt [8]. Die umfangreiche Terminologie für eine

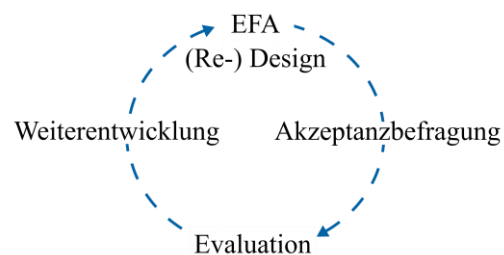
physikalische Größe mache es schwierig, ein kohärentes Verständnis von Energie zu entwickeln, zumal sich die Bedeutung der einzelnen Formen auch teilweise überlappen und nicht wohldefiniert sind [2]. So wird die potenzielle Energie beispielsweise auch teilweise als Eigenschaft eines Objektes anstelle eines Systems verstanden [9,10]. Darüber hinaus nehmen Schüler\*innen manchmal an, dass Energie eher eine Art Treibstoff sei, der auch verbraucht werden kann [1]. Diese Schwierigkeiten führen dazu, dass das Konzept der Energie ungern für die Beschreibung und Erklärung von Phänomenen herangezogen wird [11]. Insgesamt erreichen Schüler\*innen also nicht das erwünschte Niveau an Verständnis über Energie, das man sich erhofft [1,12]. Weiters muss festgehalten werden, dass der traditionelle Weg zur Einführung der Energie (Kraft, Arbeit, goldene Regel) oft erhebliche Probleme beim Lernen mit sich bringt.

## 1.2. Lösungsansätze

Der Grundgedanke der hier angerissenen Ansätze ist der gleiche: Für ein Verständnis der Energie muss man verstehen, dass diese abstrakte Größe keine Eigenschaft einzelner Objekte ist, sondern eine Eigenschaft von Systemen. Denn aus fachlicher Sicht existiert Energie nur in zwei Formen, nämlich in Bewegungsenergie und Feldenergie. Dabei ist es wichtig, dass man stets die Rolle des Bezugssystems einer Wechselwirkung betrachtet [2]. So ergibt der Ausdruck „potenzielle Energie eines Balles“ keinen Sinn, da erst mit dem Referenzpunkt „Erde“ dem Gesamtsystem eine Energie zugeordnet werden kann. Die Idee, dass Energie stets zwischen Systemen übertragen wird und dazu nicht nur sich bewegende Objekte, sondern auch Felder relevant sind, ist bereits Teil des System-Transfer-Ansatzes nach Nordine et al. [1]. Dieser Ansatz, über den Energietransfer zwischen Systemen (z.B. Feldern) zu sprechen, scheint auch in der Praxis für das Lernen über Energie von Vorteil zu sein [13]. Bereits Rückl [14] führt die Energieformen auf Bewegungs- und Feldenergie zurück und konzipiert damit ein Unterrichtskonzept, welches das Feld und seine Energie als zentrale Entität kontextübergreifend verwendet. Der Ausgangspunkt, dass Energie in Feldern und Bewegungen gespeichert ist und zwischen diesen übertragen werden kann, existiert also bereits als didaktisches Modell; die weitere Entwicklung und Evaluation eines lernwirksamen und effektiven Unterrichtskonzeptes auf dieser Grundlage bleibt allerdings noch aus [1]. Diese Lücke zu schließen hat auch der Energie Feld Ansatz (EFA) zum Ziel, welcher im Folgenden detaillierter erläutert wird.

## 2. Der Energie Feld Ansatz: Methodik

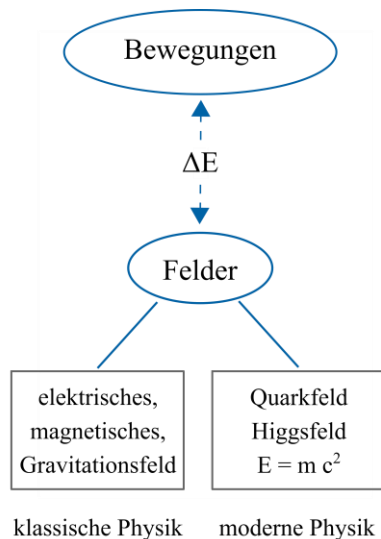
Der EFA ordnet sich als Projekt der physikdidaktischen Designforschung zu und kann als Teil der nutzenorientierten Grundlagenforschung [15] verstanden werden. Dabei wird im Rahmen des Modells der didaktischen Rekonstruktion (MDR) nach Katt-



**Abb.1:** Design, Evaluation und Re-Design des EFA

mann [3] ein Unterrichtskonzept zur Energie entwickelt. Das Konzept setzt sich aus Konzeptideen (auch: *core ideas* oder *key ideas*, vgl. z.B. [6]) sowie Kontexten und Erklärungen zusammen, die eine Lehr-Lern-Einheit (LLE) bildet. Die Entwicklung der LLE wird von Theoriebildung begleitet, sodass dabei auch Erkenntnisse über die Lernendenvorstellungen von Schüler\*innen beim Lernen über Energie gemäß dem EFA gewonnen werden. Die Evaluation der LLE und damit des Konzeptes erfolgt im aktuellen Stadium des Forschungsprojektes mittels Akzeptanzbefragungen nach Jung [4]. Dabei werden face-to-face Interviews mit Schüler\*innen der Oberstufe geführt, bei denen vorgestellte Erklärungen des EFA bewertet, paraphrasiert und angewendet werden sollen. Die Interviewdaten werden kodiert und inhaltsanalytisch ausgewertet [5], sodass daraus Rückschlüsse auf die Lernwirksamkeit der LLE gezogen werden können. Die Erkenntnis über problematische und förderliche Aspekte des Konzeptes führen dann zu einer Weiterentwicklung (Re-Design) des Konzeptes und der LLE, welche dann erneut evaluiert werden kann. Dieses Vorgehen erfolgt also zyklisch in mindestens drei Runden, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht ist (s. Abb. 1). Am Ende steht ein entwickeltes Konzept mit LLE und Informationen über die Schwierigkeiten und Benefits beim Lernen nach dem EFA.

Die Konzeption basiert gemäß dem MDR auf einer fachlichen und didaktischen Klärung, bei der nicht nur fachliche Inhalte, sondern auch fachdidaktische Erkenntnisse über Lernendenvorstellungen zu Energie und Feldern in Betracht gezogen werden. Aus beiden Perspektiven wird dann insgesamt ein Konzept (Design) für den Ansatz formuliert. Dieser hat dann zum Ziel, für das Verständnis problematische Aspekte zu minimieren und die fachliche Adäquatheit gleichzeitig zu maximieren. Fachdidaktische Forschung und Entwicklung hat gezeigt, dass ein Konzept in der Regel nicht beides sein kann, also fachlich vollständig und angemessen sowie didaktisch einfach, übersichtlich und verständlich. Deshalb müssen auf beiden Seiten Kompromisse eingegangen werden. Aus diesem Grund besitzt auch der EFA Stellen, an denen gewisse fachliche Grenzen erreicht werden. An diesen Stellen müssen dann angemessene didaktische Rekonstruktionen verwendet werden. Das Konzept und die Schwerpunkte der didaktischen Rekonstruktionen werden im Folgenden skizziert.



**Abb.2:** Grundidee des EFA. Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie. Die Energie kann also zwischen Bewegungen und Feldern übertragen werden.

### 3. Der Energie Feld Ansatz: Konzept

#### 3.1. Grundidee

##### 3.1.1. Bewegung und Feld

Der Energie Feld Ansatz (EFA) greift die aus den vorgestellten Vorschlägen die Herangehensweise auf, die traditionellen Energieformen auf einen „gemeinsamen Nenner“ zu bringen und sie mit dem Konzept des Feldes zu verknüpfen. In Anlehnung an [2] und [14] wird Energie nur auf zwei Arten unterschieden: Feldenergie und Bewegungsenergie (s. Abb. 2). Dabei entspricht die Bewegungsenergie der kinetischen Energie, die bereits aus dem traditionellen Schulunterricht bekannt ist und wird allen sich bewegendem Objekten mit Masse zugeschrieben. Das bedeutet, wenn sich Körper bzw. Teilchen mit (Ruhe-) Masse bewegen, so besitzen diese Bewegungsenergie; man sagt auch: sie haben Energie in ihrer Bewegung.

Auf der anderen Seite wird allen Konstellationen von Objekten, die aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaft als Quelle ein Feld besitzen (wie z.B. Magnete oder Ladungen), ein *Gesamtfeld* zugeordnet, welches Feldenergie besitzt; man sagt auch: das Gesamtfeld hat bzw. speichert Energie. Der EFA unterscheidet also nur zwei Arten von Energie (Bewegungsenergie und Feldenergie), wodurch die Unterscheidung in mehrere Energieformen obsolet wird. Dadurch braucht man auch nicht mehr über die Umwandlung von Energie zu sprechen, sondern es genügt die Übertragung. So wird Energie also zwischen Feldern und Bewegungen übertragen; man sagt beispielsweise „in bzw. aus einem Feld“ und „in bzw. aus“ einer Bewegung.

##### 3.1.2. Energie im Gesamtfeld

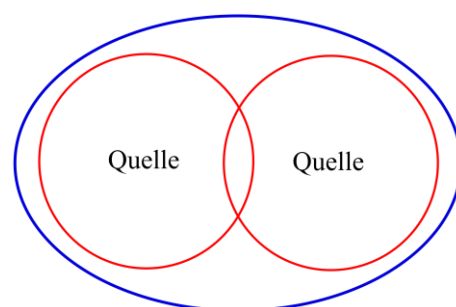
Wesentlich hierbei ist, dass es sich um das Gesamtfeld handelt, das die Konstellation von zwei oder mehr miteinander wechselwirkenden Quellen zu-

sammenfasst (s. Abb. 3). Denn, wie bereits von [1] und [2] herausgestellt, macht es erst bei einer Wechselwirkung zwischen Objekten Sinn, über die im Feld gespeicherte Energie zu sprechen. Auch wenn einzelne Quellen über ein eigenes Feld verfügen, so lässt sich diesem jedoch noch keine eindeutig sinnvolle Energie zuschreiben. Erst wenn man das Gesamtfeld (i.e. die Wechselwirkung zweier Quellen über deren Felder) betrachtet und also die wirkende Kraft kennt, kann man für einige Fälle eine Energie berechnen.<sup>1</sup> Ab diesem Punkt macht es also nur Sinn, das Gesamtfeld zu betrachten, weswegen ab hier auch die sprachliche Vereinfachung *Feld* zulässig ist. Dabei ist zu beachten, dass es sich stets um die Konstellation zweier oder mehr Felder von Quellen handelt, also um die *Überlagerung* von Einzelfeldern zu einem (Gesamt-) Feld. Die Energie, die dann in ein Feld oder aus einem Feld übertragen wird, ergibt sich abhängig von den einzelnen Parametern der Wechselwirkung (Abstand, Eigenschaften der Quellen) durch das Integral über die Kraft nach dem Weg:

$$\Delta E = \int \vec{F} d\vec{s} \quad \{1\}$$

Wie bereits von Quinn [2] erläutert, macht die Bestimmung einer absoluten Feldenergie ohnehin wenig Sinn, da wir uns in Prozessen meist für die übertragene Energie  $\Delta E$  interessieren. Die Energiedifferenz, die bei der Veränderung eines Feldes übertragen wird — sagen wir in diesem Fall sie wird abgegeben — kann dann in ein anderes Feld oder eine Bewegung übertragen werden.

In den meisten schulrelevanten Beispielen ändert sich in solchen Prozessen eine Bewegung, d.h. ein Objekt wird schneller oder langsamer, und ein Vorgang ist von außen beobachtbar. Der Rahmen dieses Prozesses wird dann durch den Energieerhaltungssatz und entsprechend die Energie im Feld beschränkt und kann prinzipiell bestimmt werden. So kann durch quantitative Betrachtungen beispielsweise berechnet werden, wie schnell sich zwei absto-



**Abb.3:** Das Gesamtfeld (blau) als Überlagerung zweier Einzelfelder von Quellen (rot)

<sup>1</sup> Dies gilt nicht für alle Fälle, wie z.B. zwei anziehende Ladungen in einem Abstand  $d$ . Denn da die Stärke der anziehenden Wechselwirkung mit  $1/d^2$  skaliert, lässt sich der Ausdruck  $\{1\}$  nicht einfach berechnen.

Bende Magnetwägen oder Ladungen bewegen können, die man in einem Abstand  $d$  loslässt. Auch die Geschwindigkeit, die ein in einem Plattenkondensator beschleunigtes Elektron besitzt, lässt sich mit dieser Überlegung bestimmen. Für die Berechnung braucht man allerdings nach dem traditionellen Ansatz die typischen Formeln für die Energieumwandlungen bzw. -übertragungen, deren Verständnis einigen Schüler\*innen bislang Schwierigkeiten bereitet [16]. Die Hauptaufgabe des EFA ist es folglich, die traditionellen Energieformen auf Feldenergie und Bewegungsenergie zurückzuführen, also die klassischen Formen durch eine gleichbedeutende aber inhaltlich tiefere Verknüpfung mit entweder Feldern oder Bewegungen zu ersetzen.

### 3.1.3. Aktive Rolle und Minimierung der Energie

Ein Vorteil dabei, über das Gesamtfeld anstelle der Wechselwirkung zu sprechen, ist der eher abstrakte Charakter. Denn wie bereits ausreichend belegt, haben viele Schüler\*innen Probleme mit dem Newton'schen Kraftkonzept [12], weswegen hier eine starke Verknüpfung damit umgangen werden soll. Die Natur des Feldes als physikalische Entität, die zwar etwas abstrakt ist, aber dennoch bestimmte Eigenschaften besitzt, macht es zu einem Akteur in physikalischen Prozessen. Dadurch, dass ein Feld Energie trägt bzw. speichert und Energie aufnehmen oder abgeben kann, wird ihm eine „quasi-aktive Rolle“ zuteil, die eine Argumentation mit und den Rückgriff auf das Feldkonzept erleichtern und attraktiver gestalten soll. So wird den Schüler\*innen im Rahmen des EFA das Gesamtfeld wie bereits beschrieben als Überlagerung von Einzelfeldern und Energieträger vorgestellt, das entsprechend seiner Wechselwirkung dazu tendiert, seine Energie zu minimieren, sofern es die Möglichkeit dazu besitzt und nicht anderweitig von außen gezwungen wird. Auf diese Weise wird die *Tendenz* von Feldern implementiert, sich in Richtung eines energetisch günstigeren Zustandes zu verändern. Aus dieser Konzeption ergeben sich also zwei Benefits: Zum einen wird Schüler\*innen mit dem Feld eine Entität zur Hand gegeben, die mit festgelegten Regeln eine aktive Rolle in Prozessen mit Energieübertragung spielt und mit der sie Phänomene aus der Energieperspektive beschreiben oder sogar erklären können. Zum anderen bietet das Feld mit seiner Tendenz zur Energieminimierung die Grundlage dafür, auch Bindungen von Atomen, Molekülen oder Kernen und damit die Stabilität unserer Materie zu beschreiben. Die Einsicht, dass man einem stabilen gebundenen System Energie zuführen muss, um es zu verändern, wird somit eine logische Konsequenz einfacher Konzeptideen. Eine Auswahl der wichtigsten Konzeptideen seien hier kurz aufgelistet:

- Jede Quelle hat ein Feld. (Bewegte) Ladungen, Magnete, Massen, und Quarks sind Quellen eines Feldes.

- Zwei (oder mehr) Quellen wechselwirken miteinander über ihre Felder. Die Felder überlagern sich dabei zu einem Gesamtfeld.
- Jedes Gesamtfeld trägt Energie. Energie kann zwischen Feldern und Bewegungen übertragen werden.
- Es gibt nur Bewegungs- und Feldenergie.
- Ein Feld strebt (gemäß seiner Wechselwirkung) stets zu einem Zustand minimaler Energie; das ist die Tendenz des Feldes.
- Die Bindung von Atomen und Kernen entsteht durch diese Tendenz des Feldes.

## 3.2. Zusammenführung der Energieformen

### 3.2.1. Bewegungsenergie

Dadurch, dass nur bewegten massiven Objekten Bewegungsenergie zugeordnet werden kann, müssen bis auf zwei Ausnahmen alle anderen Energieformen auf Feldenergie zurückgeführt werden. Die entsprechende Logik sei hier kurz dargelegt: Neben sich bewegenden makroskopischen Objekten tragen auch mikroskopische Objekte wie zum Beispiel sich bewegende bzw. schwingende oder rotierende Atome oder Moleküle Bewegungsenergie. Diese Bewegungsenergie wird im Schulunterricht traditionell als thermische Energie (bzw. deren Übertragung als Wärme) bezeichnet. Kombiniert man diese weiter mit Wechselwirkungen auf der atomaren Ebene, so spricht man oft über innere Energie. Im Rahmen des EFA werden hauptsächlich die ersten beiden Begriffe auf die mikroskopische Bewegungsenergie von Atomen zurückgeführt. Auf diese Weise wird dem von Schüler\*innen teilweise als Blackbox empfundene Begriff *thermische Energie* als Bewegungsenergie verstanden und somit inhaltlich greifbar. Wärme hingegen wird als die übertragene thermische, also die in eine mikroskopische Bewegung übertragene Energie, verstanden, sodass der Unterschied in der Bewegung mikroskopischer Teilchen der Prozess ist, der uns ein Objekt als *warm* empfinden lässt.

### 3.2.2. Feldenergie

Neben allen Arten von makro- und mikroskopischer Bewegung müssen die restlichen Energieformen auf Feldenergie zurückgeführt werden. Dazu wird jede Art von Wechselwirkung mit einem Feld in Verbindung gebracht (vgl. Abb. 2). Dabei stellen (bewegte) Ladungen, Magnete, Massen und Quarks Quellen dar, das Higgsfeld existiert ohne Quelle omnipräsent. Das magnetische, elektrische und das elektromagnetische Gesamtfeld sind bereits von der Grundidee Teil der Arbeit von Rückl [14]. Das Quarkfeld wird hier neu als gemeinsames Kernfeld bezeichnet und das Higgsfeld spielte bislang noch in keinem der dargestellten Ansätze eine Rolle.

Im Folgenden werden nun Beispiele für die Rückführung der traditionellen Energieformen auf die Felder des EFA gegeben.

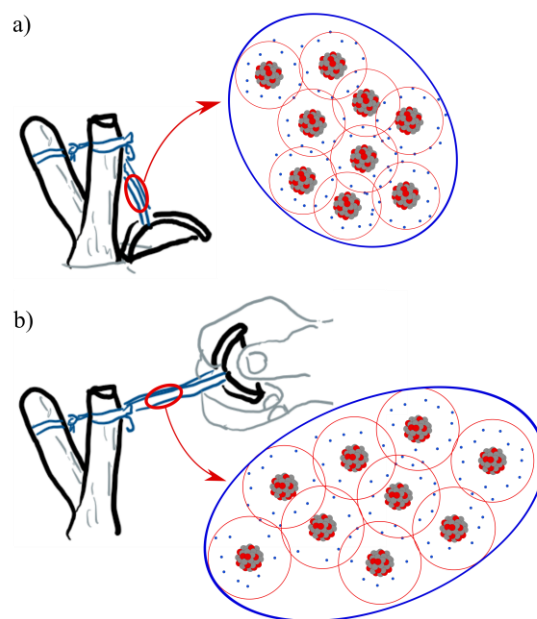
### 3.3. Beispiele

#### 3.3.1. Gravitationsfeld

Die potenzielle Energie eines Balles im Gravitationsfeld der Erde ist beispielsweise auf die Energie im Gesamtfeld (also das gesamte Gravitationsfeld) von Ball und Erde zurückzuführen. Denn auch hier gilt, dass das Zuschreiben einer Energie erst durch den Referenzkörper (Ball bzw. Erde) Sinn ergibt. Wenn man den Ball loslässt, wird ein Teil der Feldenergie in die Bewegung des Balles übertragen [1]. Im Rahmen des EFA wird dem Gravitationsfeld durch das Loslassen die Möglichkeit (der *Auslöser*) gegeben, sich entsprechend seiner Wechselwirkung (Tendenz) zu verändern und es zieht sich zusammen. So wird Energie an die Bewegung des Balles abgegeben; der Ball wird schneller und der Abstand der Quellen reduziert sich. Das gleiche Prinzip lässt sich auch auf die elliptische Bewegung eines Satelliten übertragen und dessen Schwankungen in der Schnelligkeit erklären.

#### 3.3.2. Atomare Felder

Feldenergien, die mit der Bindung zu Festkörpern aufgrund der Wechselwirkung von Atomen verknüpft sind, lassen sich didaktisch auf das elektrische Feld der beteiligten Atome reduzieren.<sup>2</sup> Hier wissen Schüler\*innen, dass Atome sich zu Festkörpern zusammenschließen und dafür (u. a.) die elektrischen Kräfte zwischen ihnen verantwortlich sind. So kann das Ausbilden von gebundenen Zuständen mit der Minimierung der Energie des atomaren Feldes plausibilisiert werden. Ein Anwendungsbeispiel ist das Spannen einer elastischen Schleuder (s. Abb. 4). Nach dem traditionellen Unterricht spricht man hier über die Energieübertragung oder -umwandlung von Spannenergie zu Bewegungsenergie, wenn ein mit der Schleuder beschleunigter Ball davonfliegt. Im Rahmen des EFA würde man die Blackbox *Spannenergie* durch Feldenergie des atomaren Feldes erklären. Die Minimierung dieser Energie sorgt dafür, dass die Schleuder im Ruhezustand ebenso wie alle stabilen Körper nicht auseinanderfällt. Um diesen Zustand zu verändern, also die Schleuder zu spannen, muss man dem Feld Energie zuführen. Das Gesamtfeld der Atome muss Energie aufnehmen, da es entgegen seiner Tendenz verändert („gezwungen“) wird. Das Loslassen der Schleuder ist dann der Auslöser, der dem Feld die Möglichkeit gibt, sich entsprechend seiner Wechselwirkung (Tendenz) zusammenzuziehen und dabei



**Abb.4:** Das Gesamtfeld der Atome einer Schleuder vergrößert sich vom entspannten (a) zum gespannten Zustand (b). Dazu muss Energie in die attraktive Wechselwirkung der Atome und damit in das Gesamtfeld übertragen werden, sodass sich der mittlere Abstand der Atome vergrößert; die Schleuder wird gedehnt.

die ihm zugeführte Energie wieder abzugeben. Diese wird an die Bewegung des Balles übertragen, der davonfliegt. Auf diese Weise können die Konzeptideen makroskopischer Gesamtfelder (Magnetfelder, elektrische Felder, Gravitationsfelder) mit dem gleichen Prinzip auf die mikroskopische Ebene erweitert werden.

Ebenso kann der Begriff *chemische Energie* mit Inhalt gefüllt werden, wenn man annimmt, dass die gemeinte Energie diejenige ist, welche bei einer chemischen Reaktion frei werden kann. Die Energiedifferenz entstammt in diesem Fall dann dem elektrischen Gesamtfeld aufgrund der Wechselwirkung der Atome. Wenn sich die chemische Bindung in einem Prozess in der Form ändert, dass der Bindungszustand danach weniger Energie benötigt, so wird die Energie durch die Änderung der Wechselwirkung und damit durch die Veränderung des Gesamtfeldes frei. Die chemische Energie im traditionellen Unterricht wird im EFA also als Energie eines atomaren (mikroskopischen) Feldes aufgefasst, die bei Prozessen durch eine Feldveränderung frei wird. So kann auch dieser Begriff für Schüler\*innen inhaltlich angereichert und verständlicher gefasst werden.

#### 3.3.3. Elektromagnetisches Feld

Ähnlich verhält es sich mit der Solarenergie, welche im Wesentlichen Energie im elektromagnetischen Feld ist. Die Besonderheit ist hier nur, dass sich das Feld von den entsprechenden Quellen räumlich gelöst hat und somit ausbreitet. Im Fall eines Lichtstrahls kann man also von einem gebündelten Feld

<sup>2</sup> Hier wird das elektromagnetische Feld zwecks Vermeidung von Verwechslung mit der elektromagnetischen Strahlung auf das elektrische Feld reduziert, da die Bindung von Elektronen und Kernen aufgrund ihrer unterschiedlichen Ladung für Schüler\*innen eine plausible Vorstellung darstellt.



oder im Fall eines einzelnen Photons von einer kleinsten sich ausbreitenden Einheit Feldenergie sprechen.

### 3.3.4. Nukleares Feld

Analog zu den klassischen Feldern kann man auch ein Feld für Nukleonen definieren. Um hier aber Energieübertragung durch Prozesse der starken und elektromagnetischen Wechselwirkung gemeinsam betrachten zu können, wird das sogenannte *Quarkfeld* eingeführt. Dieses entspricht im Wesentlichen dem Gluonfeld, ergänzt um die elektromagnetische Komponente. Auf diese Weise muss keine strikte Unterscheidung vorgenommen werden, wenn es darum geht, die Energieübertragung aus dem Gluonfeld oder dem elektromagnetischen Feld der Quarks zu erklären. Für Schüler\*innen kann dies insbesondere am Beispiel des Alpha-Zerfalls die Erklärung erheblich vereinfachen, ohne dabei zu viel Einbuße beim fachlichen Verständnis zu riskieren. Das bedeutet, dass jedem Quark als Quelle ein Feld zugeordnet wird, das sogenannte Quarkfeld (s. Abb. 5). Die Energie dieses Feldes stellt dann aufgrund der Energie-Masse-Äquivalenz auch zum Großteil die Masse eines Nukleons und damit eines Kerns und unserer Materie dar. Ändert sich also ein Kern, z. B. bei der Kernspaltung oder -fusion, so kann der damit verbundene Massendefekt im Zusammenhang mit der Bindungsenergie als die vom Kern abgegebene Energie des Quarkfeldes beschrieben werden. Zerfällt ein Kern, sodass die Massen der Tochterkerne in Summe die Masse des Mutterkerns unterschreiten, so kann die Massendifferenz als vorher im Quarkfeld des Mutterkerns gespeicherte Energie in die Bewegung der Zerfallsprodukte übertragen werden. Schüler\*innen kann so der traditionelle Begriff der (nuklearen) Bindungsenergie tiefer erläutert werden, denn die Bindung der Kerne ebenso wie deren Masse lassen sich zum Großteil durch die Energie im Quarkfeld beschreiben [17]. Weiters wird dadurch eine Verbindung zwischen Masse und Energie geschaffen. Zwar ist die Gleichung

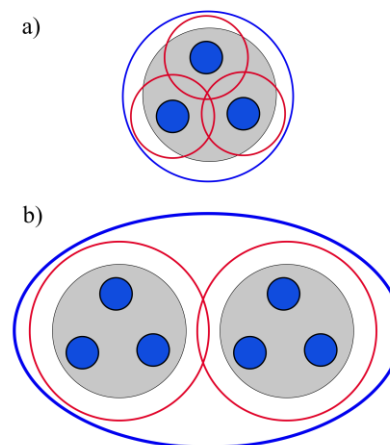
$$E = m \cdot c^2 \quad \{2\}$$

bereits aus dem traditionellen Unterricht bekannt, aber selten wird sie auch mit der Ursache der Masse von Materie oder gar der Feldenergie in Verbindung gebracht.<sup>3</sup>

### 3.3.5. Higgsfeld

Ein geringer Teil der Kern- und Atommasse kann nicht durch das Quarkfeld erklärt werden. Dieser Teil ist die Ruhemasse der Elementarteilchen, also der Elektronen und Quarks selbst. Um den Ursprung dieser Masse und folglich auch der Energie dieser „kleinsten Teilchen“ im Rahmen des EFA einer Bewegungs- oder Feldenergie zuzuordnen, wird das

<sup>3</sup> In einem weiteren Schritt könnte man auch die Bewegungsenergie mit der Masse verknüpfen, hier wird aber auf die Energie der Nukleonen und die Ruheenergie der Elementarteilchen fokussiert.



**Abb.5:** Quarkfeld als Überlagerung einzelner Quarkfelder zum Gesamtfeld (a) und Überlagerung der Quarkfelder einzelner Nukleonen zu einem gesamten Quarkfeld eines Kerns (b)

Higgsfeld eingeführt. Dieses wird als omnipräsent im Universum beschrieben und — im Gegensatz zu den anderen Feldern — braucht dies keine Quelle. Seine Rolle ist, dass es den Elementarteilchen durch die Wechselwirkung mit ihnen eine Energie verleiht, die sich dann als ihre Masse äußert. Anwendungsbeispiele dafür sind Annihilationsprozesse, Paarerzeugung oder auch Kollisionen am LHC. Bei ersterem kann beispielsweise die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) erläutert werden, bei der Positron und Elektron annihilieren und deren Energie (aus der Ruhemasse durch das Higgsfeld) in das elektromagnetische Feld der entstehenden Strahlung übertragen wird. Für den Kontext des LHC können Proton-Proton Kollisionen und die Energien der dabei entstehenden Teilchen besprochen werden.

Insgesamt bietet der EFA ein Konzept, bei dem mit den dargestellten Konzeptideen sowohl makro- als auch mikroskopische Prozesse fächerübergreifend beschrieben werden können. Die Konzeptideen stellen also für Schüler\*innen ein Werkzeug dar, auf das sie bei Erklärungen zurückgreifen können.

### 3.4. Spezifika des EFA

In Abgrenzung zu Nordine et al. [1] geht der EFA nicht explizit auf den Systemcharakter von Feldern ein. Im EFA wird die aktive Rolle des Feldes als Akteur in physikalischen Prozessen hervorgehoben und für den Energietransfer genutzt. Diese Ausrichtung unterscheidet den EFA neben anderen sprachlichen sowie inhaltlichen Unterschieden auch von den Arbeiten von Rückl [14]. Dazu zählen u.a. (hier seien nur einige Abgrenzungen genannt) auch die konsistente Modellierung des Gesamtfeldes als Überlagerung von Einzelfeldern, die Tendenz des Feldes im Zusammenhang mit der Energieminimierung (auch für Bindungszustände) sowie die Einführung und Verknüpfung von Quark- und Higgsfeld zur Erklärung der Masse von Materie sowie von nuklearen und subnuklearen Prozessen.

#### 4. Bisherige Ergebnisse

Die bisherigen Ergebnisse der Evaluation von zwei Zyklen von Akzeptanzbefragungen zeigen, dass Schüler\*innen die Grundidee des Konzeptes annehmen und auch als sehr hilfreich und sinnvoll einschätzen. Es wurden dreizehn Schüler\*innen der elften und zwölften Schulstufe mittels Akzeptanzbefragungen interviewt. Alle befragten geben an, dass der Ansatz im Vergleich zum traditionellen Schulunterricht „verständlicher“ oder „logischer“ sei und man so verstehe, wie die Energieformen zusammenhängen. Die Auswertung der Daten zeigt, dass sowohl die Grundidee als auch die Idee des Gesamtfeldes verstanden wird und von den Schüler\*innen auf Anwendungsbeispiele übertragen werden kann.

#### 5. Fazit

Nach dem EFA lassen sich die traditionellen Energieformen auf Bewegungsenergie und Feldenergie reduzieren. Auf diese Weise kann Energie als Gesamtkonzept verständlicher und gleichzeitig inhaltlich konsistenter vermittelt werden.

Schüler\*innen gelingt es, die Konzeptideen des EFA zu verstehen und verwenden diese sowohl für makro- als auch mikroskopische Prozesse für ihre Erklärungen. Das Konzept wird in den nächsten Monaten weiter evaluiert und weiterentwickelt, um diese ersten Befunde zu erweitern und die damit zusammenhängenden Lernendenvorstellungen zu identifizieren.

#### 6. Literatur

- [1] Nordine, J. C., Fortus, D., Krajcik, J. S., Neumann, K., & Lehavi, Y. (2019): Modelling energy transfers between systems to support energy knowledge in use. In: *Studies in Science Education*, 54(2), S. 177–206
- [2] Quinn, H. (2014). A physicist's musings on teaching about energy. In: R.F. Chen, A. Eisenkraft, D. Fortus, J. Krajcik, K. Neumann, J. Nordine, & A. Scheff (Hrsg.): *Teaching and learning of energy in K-12 education*, New York, NY: Springer, S. 15–36
- [3] Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., Komorek, M. (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3 (3), S. 3–18
- [4] Jung, W. (1992): Probing acceptance, a technique for investigating learning difficulties. In: *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies*. Kiel: IPN, S. 278–295.
- [5] Kuckartz, U. (2014): *Qualitative text analysis. A guide to methods, practice & using software*. Los Angeles: SAGE
- [6] National Research Council. (2012): *A framework for K-12 science education: Practices, crosscutting concepts, and core ideas*. National Academies Press
- [7] Nordine, J. C., Krajcik, J. S., & Fortus, D. (2011): Transforming energy instruction in middle school to support integrated understanding and future learning. In: *Science Education*, 95(4), S. 670–699
- [8] Swackhamer, G. (2005): Cognitive resources for understanding energy. Url: <http://modeling.asu.edu/modeling/CognitiveResources-Energy.pdf>, Stand: 06/2021
- [9] Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras-Martí, A., Guisasola, J., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., ... Vilches, A. (2007): Teaching of energy issues: A debate proposal for a global reorientation. In: *Science & Education*, 16(1), S. 43–64
- [10] Hecht, E. (2003): An historico-critical account of potential energy: Is PE really real? In: *The Physics Teacher*, 41(8), S. 486–493.
- [11] Driver, R., & Warrington, L. (1985): Students' use of the principle of energy conservation in problem situations. In: *Physics Education*, 20, S. 171–176.
- [12] Neumann, K., Viering, T., Boone, W. J., & Fischer, H. E. (2013): Towards a learning progression of energy. In: *Journal of Research in Science Teaching*, 50(2), S. 162–188
- [13] Fortus, D., Kubsch, M., Bielik, T., Krajcik, J., Lehavi, Y., Neumann, K., ... & Touitou, I. (2019): Systems, transfer, and fields: Evaluating a new approach to energy instruction. In: *Journal of research in science teaching*, 56(10), S. 1341–1361
- [14] Rückl, E. (1991): *Feldenergie: ein neues didaktisches Konzept*. BI-Wiss.-Verlag.
- [15] Hopf, M. (2009): Physikdidaktik als nutzerorientierte Grundlagenforschung. In: *PLUS LUCIS*, 1-2, S.3-8
- [16] Uhden, O. (2016): Verständnisprobleme von Schülerinnen und Schülern beim Verbinden von Physik und Mathematik. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 22(1), S. 13–24
- [17] Yang, Y. B., Liang, J., Bi, Y. J., Chen, Y., Draper, T., Liu, K. F., & Liu, Z. (2018): Proton mass decomposition from the QCD energy momentum tensor. In: *Physical review letters*, 121(21), 212001.