

# Handreichung

für das Unterrichtskonzept zum

## Energie-Feld-Ansatz

von Manuel Becker, M. Sc.

für Lehrpersonen

zur Anwendung in Klassen der Jgst. 10 bis 12 (Oberstufe) in allgemeinbildenden höheren Schulen.

Ansprechpartner: Manuel Becker, M. Sc.; Universität Wien, Zentrum für Lehrer\*innenbildung

## Übersicht

1.	Basisinformationen zur Handreichung .....	2
2.	Einführung: Phänomenologie .....	5
3.	Energie in Feldern.....	6
3.1	Grundbegriff des Feldes .....	6
3.2	Das Gesamtfeld .....	7
3.3	Tendenz des Gesamtfeldes .....	9
3.4	Energie im Gesamtfeld.....	10
4.	Energieübertragung .....	13
5.	Arten von Feldern und Bewegungen .....	18
5.1	Atomare Felder .....	18
5.2	Elektromagnetische Strahlung.....	21
5.3	Thermische Energie als mikroskopische Bewegungsenergie .....	23
6.	Moderne Physik .....	25
Einleitung.....		25
6.1	Quarkfelder .....	25
6.1	Higgsfeld .....	28
7.	Zusatz (falls Zeit übrig ist) .....	31
7.1	Beispiel Gravitationslinse .....	31
7.2	Beispiel: Gravitationsbedingte Rotverschiebung .....	32

# 1. Basisinformationen zur Handreichung

Sehr geehrte Lehrperson,

vielen Dank, dass Sie sich bereit erklären, das Konzept zum Energie-Feld-Ansatz in Ihrem Unterricht zu erproben! Um Ihnen die Planung der Unterrichtssequenz zu erleichtern und dieser eine Struktur vorzugeben, soll Sie die vorliegende Handreichung unterstützen. Im Folgenden werden dazu einige Hinweise als Basisinformationen gegeben.

## **Zur Handreichung**

Die hier beschriebene Umsetzung des Konzeptes ist für vier Einzelstunden als Lehr-Lern-Einheit (LLE) konzipiert. Davor und danach soll noch jeweils eine Unterrichtsstunde für den zwecks Evaluation begleitenden Prä- bzw. Posttest zur Verfügung stehen. In dieser Handreichung geht es nicht um die fachliche Klärung oder Darstellung von Argumentationen für die didaktische Rekonstruktion, sondern um die reine Darstellung der LLE. Die Handreichung umfasst also die Darstellung der ausgearbeiteten Inhalte, insbesondere die Konzeptideen, und Kontexte (Beispiele, Erklärungen und Aufgaben) der LLE, welche zu Vermittlung der Konzeptideen herangezogen werden, sowie Anforderungen und nützliche Hinweise zur Implementation im Unterricht. Dabei stellen die Konzeptideen das Grundgerüst des Konzeptes dar und sind also die Inhalte, welche die Schüler\*innen am Ende der Unterrichtssequenz verstanden haben sollten. Dies soll mit Hilfe der Testinstrumente überprüft werden.

## **Hinweis zu Materialien:**

Ihnen wird neben dieser Handreichung eine Zusammenstellung an Versuchsmaterialien bereitgestellt, welche Ihnen bei der Durchführung der Experimente helfen sollen. Darüber hinaus erhalten Sie Präsentationsfolien mit Abbildungen bzw. Kurzvideos zur visuellen Unterstützung ihres Unterrichts. Außerdem gibt es Arbeitsblätter für die Schüler\*innen. Für die Lehrperson gibt es ein entsprechendes Lösungsblatt (Hinweis: Die Musterlösungen sind sauber ausformuliert; bei der Bearbeitung reichen auch Stichpunkte von den Schüler\*innen; die Lösungen könnten mündlich gesammelt und verglichen werden). Die Testinstrumente (Prä- und Posttest) werden Ihnen natürlich auch bereitgestellt.

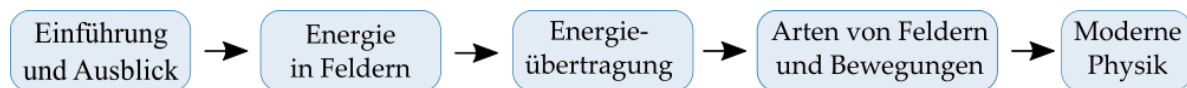
## **Zu Anpassungen und Spielraum der Lehrperson:**

Die in der Handreichung angegebenen Erklärungen sind exemplarisch und dürfen sinngemäß geringfügig abgeändert werden, solange die fachlichen Aussagen sowie die Konzeptideen erhalten bleiben. Dabei sind auch Begrifflichkeiten von Bedeutung und nur zu ändern, wenn explizit Synonyme oder Alternativen angegeben sind. Ansonsten sollten die inhaltlichen Aussagen so weit wie möglich beibehalten werden. Abgesehen von den Konzeptideen und wesentlichen Begriffen sind sprachliche Anpassungen möglich und im Stil der Lehrperson adaptierbar. So wird z. B. die methodische Gestaltung des Unterrichts der Lehrperson überlassen, damit der Unterricht möglichst seine Originaldynamik zwischen Lehrperson und Schüler\*innen behält und authentisch wirkt. Die Terminologie wesentlicher Begriffe (z. B. Gesamtfeld, Tendenz, Minimierung) und Logik (roter Faden und Aufbau) der Erklärungen sowie die Verwendung der Kontexte sollen dabei möglichst beibehalten werden. Das heißt, bei der Umsetzung bleibt den Lehrpersonen insofern ein Spielraum, als dass diese Aspekte in ihrer Sinnhaftigkeit bestmöglich beibehalten und vermittelt werden.

**Zum Farbschema:**

Das Farbschema soll Sie als Lehrperson dabei unterstützen, die Handreichung im Unterricht zu implementieren. **Hellblaue Kästen** beinhalten die Konzeptideen, auf welche in dem jeweiligen Abschnitt eingegangen wird. Sie stellen den Inhalt also in komprimierter Form als Überblick dar und verdeutlichen damit, welche Inhalte vermittelt werden sollen und worauf der Fokus liegt. Die einzelnen Konzeptideen bzw. die wesentlichen Begriffe sind für eine bessere Übersicht im Text **blau** dargestellt. Weitere Punkte, die wesentlich erscheinen sind fett geschrieben. In **hellgrauen Kästen** befinden sich erläuternde bzw. zusammenfassende Hinweise zum Inhalt sowie zur Umsetzung des Konzeptes im Unterricht. **Rote Kästen** geben Informationen zu potenziellen Schwierigkeiten beim Lernen der Konzeptideen und Hinweise darauf, worauf die Lehrperson achten sollte.

Bei Aufgaben sollen die Schüler\*innen zunächst selbst mit Hilfe der Arbeitsblätter überlegen (z. B. kurze Arbeits-/Gruppenphase). Anschließend sollen die Ergebnisse besprochen und zu einer im Rahmen des Konzeptes angemessenen Erklärung geführt werden.

**Grundstruktur des Unterrichtskonzeptes und Umsetzung für den Unterricht**

Die Unterrichtssequenz gliedert sich in fünf Teile: Zunächst wird eine kurze phänomenologische Einordnung des Themas und ein Ausblick auf das zu Erwartende gegeben. Anschließend beginnt das Konzept mit der Klärung des Grundbegriffs „Feld“ sowie der Einführung des Gesamtfeldes als Energieträger. Darauf aufbauend wird die Energieübertragung mit der Feldveränderung verknüpft. Es folgt die Einordnung von atomarem und elektromagnetischem Feld sowie der thermischen Energie in das Konzept. Abschließend werden Quarkfelder und das Higgsfeld eingeführt, um den Zusammenhang von Feldenergie und Masse zu erläutern.

Es bietet sich an, die vier Teile auf jeweils eine Unterrichtsstunde aufzuteilen; Abweichungen sind natürlich möglich, die Reihenfolge sollte aber beibehalten werden.

**Limitationen**

Natürlich deckt der Energie-Feld-Ansatz nicht alle Fragen zum Themas Energie ab. Er bietet eine Grundlage für die Beschreibung von Phänomenen mit Feldern. Das vorliegende Konzept und seine beschriebene Implementation sind ein Ausgangspunkt, der vielen – aber nicht alles – abdeckt. Beispielsweise wird auf die folgenden Fragen nicht direkt eingegangen. Dennoch sollen hier kurze Antworten für den Fall vorgeschlagen werden, dass diese Fragen im Unterrichte aufkommen:

- 1) Kann Energie auch zwischen Feldern oder Bewegungen übertragen werden?  
Ja, das ist auch eine Möglichkeit, z. B. wenn zwei sich bewegende Objekte kollidieren und dabei ihr Tempo ändern; oder wenn zwei Felder involviert sind.
- 2) Was ist mit einem Feld, das sich bewegt?  
Dieser Fall kann kompliziert sein. Im Fall von elektromagnetischer Strahlung wird nur über Feldenergie gesprochen, da es sich hier um ein masseloses Feld handelt.

Der kompliziertere Fall eines sich bewegenden Gesamtfeldes mit Masse (z. B. ein Sternsystem mit Translationsbewegung), käme es zu einer Kombination aus Feldenergie des Gravitationsfeldes und Bewegungsenergie der beteiligten Quellen. Solche Beispiele sollten aber zu Beginn nicht behandelt werden, zumal es möglicherweise andere Konzepte gibt, die sich in komplizierten Fällen besser eignen, um Bewegungen zu beschreiben.

- 3) Was ist mit dem Photon; ist das Welle oder Teilchen? (siehe auch unten)

Das Photon wird hier wegen seiner fehlenden Masse zur elektromagnetischen Strahlung eingeordnet; und zwar als Feld-„Paket“, das Feldenergie trägt.

- 4) Was ist mit dem Higgsfeld; das hat im Gegensatz zu den anderen Feldern keine Quelle?

Das stimmt, das Higgsfeld ist omnipräsent und braucht keine Quelle. Es wird im Kontrast zu den anderen Feldern auch als solches ausgezeichnet. Da dieses spezielle Feld erst am Ende des Konzeptes erscheint, sollte es möglich sein, Schüler\*innen hier den besonderen Charakter zu verdeutlichen. Außerdem ist die Physik des Higgsfeldes komplizierter und so soll hier nur der Zusammenhang mit der Masse von Elementarteilchen besprochen werden. Kernaussage ist hier, dass auch diese Masse als Energie den Ursprung in einem Feld findet.

### **Infos und Anweisungen zu Prä- und Posttest**

Es gibt einen Prätest und einen Posttest. Beide werden Ihnen übergeben und bedürfen ca. einer Schulstunde Erhebungszeit. Der Prätest soll vor Beginn der Unterrichtssequenz und der Posttest danach bearbeitet werden.

Auf der ersten Seite des Tests sollen die Schüler\*innen drei kurze Angaben machen, aus denen dann ein anonymisierter Code erstellt wird, sodass ihre Testbögen anonymisiert sind, aber dennoch für den Vergleich der Ergebnisse von Prä- und Posttest zugeordnet werden können. Die Angaben sind die folgenden:

1. Erster und zweiter Buchstabe des Vornamens der Mutter oder Erziehungsberechtigten
2. Erster und zweiter Buchstabe der Stadt, in der man wohnt
3. Monat, in dem man geboren wurde

Für die Einordnung der Leistung wird am Ende des Prätests noch nach der letzten Zeugnisnote in Physik und dem allgemeinen Interesse an physikalischen Themen gefragt.

### **Letzte Anmerkung:**

Ziel des Energie-Feld-Ansatzes ist es, die traditionellen Energieformen auf Energie in Bewegungen und Feldern zurückzuführen. Das bedeutet, dass man im Verlauf über traditionelle Energieformen (elektrische, mechanische, potenzielle, chemische, Kernenergie, etc.) sprechen kann, diese allerdings in jedem Fall in das Konzept einbetten sollte. Nur so kann einheitlich deutlich werden, dass die Beschreibung mit Feldern einen bedeutenden Mehrwert für die Beschreibung von Phänomenen besitzt; nämlich dass die „Begriffshülsen“ der traditionellen Energieformen inhaltlich angereichert werden.

## 2. Einführung: Phänomenologie

Dieser Teil dient der Einordnung und Motivation des Themas für die Schüler\*innen. Es sollen die folgenden zwei Grundgedanken aufgegriffen und ins Bewusstsein gerufen werden:

- Die Gesamtenergie unserer Welt ist erhalten.
- Die Betrachtung der Energie für die Beschreibung eines Phänomens nützlich.

(Folie 2 der Präsentation)

### Vorschlag für die Einführung:

Energie kennt ihr (die Schüler\*innen) bereits aus dem bisherigen Schulunterricht. Dabei habt ihr (vermutlich) verschiedene **Formen von Energie** kennengelernt, wie z. B. elektrische, kinetische, potenzielle, Wärme, Solar- oder auch Strahlungsenergie. Grundsatz war dabei immer, dass Energieformen ineinander umgewandelt bzw. übertragen werden können, die **Gesamtenergie** (eines Systems) 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 unbekannten 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 spielt die Betrachtung und das Wissen über die Energie also eine bedeutende Rolle.



## Überblick: Was erwartet uns in den nächsten Stunden?

An dieser Stelle bekommen die Schüler\*innen einen Überblick über die nächsten Stunden. Dieser Teil soll sie kognitiv auf den Konzeptwechsel einstimmen und ihr Interesse wecken.

Wir lernen in den nächsten Unterrichtsstunden ein Konzept kennen, dass die **bisherigen Energieformen zusammenfasst und nurmehr zwischen Bewegungsenergie und Feldenergie unterscheidet**. Dabei werden wir verschiedene Felder kennenlernen, wie z. B. elektrische, magnetische oder auch Kernfelder und wir werden sehen, dass damit die Beschreibung von Prozessen übersichtlicher wird und wir dazu folglich nur nach Bewegungen bzw. **Feldern suchen** müssen. Wir werden sehen, wie man die Energieübertragung zwischen Feldern und Bewegungen bei fast allen Phänomenen betrachten kann und dass die **Beschreibung einfacher** wird, wenn man zuerst alle involvierten Felder identifiziert. Was wir lernen, wie man mit dem Konzept **auch modernste Phänomene** beschreiben kann, wie z. B. die Bewegung eines Satelliten um die Erde, die Spaltung und Fusion von Kernen sowie die Vernichtung und Entstehung von vielleicht sogar noch unbekannten Teilchen.

## 3. Energie in Feldern

In diesem Teil 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.

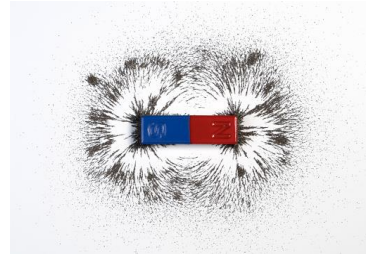
### 3.1 Grundbegriff des Feldes

Konzeptideen:

- Jede Quelle hat ein Feld. (Bewegte) Ladungen, Magnete, Massen und Quarks sind Quellen eines Feldes.
- Felder kann man weder direkt sehen noch anfassen. Sie sind (sofern möglich) von ihrer Quelle unendlich weit ausgebreitet.

(Folien 3 und 4 der Präsentation)

Felder kennt ihr schon aus verschiedenen Bereichen, z. B. das Magnetfeld eines Stabmagneten, das man mit Eisenspänen auch sichtbar machen kann.<sup>1</sup> Wir wissen auch, dass auch Ladungen ein Feld: ein elektrisches Feld. Ebenso gibt es Gravitationsfelder. Wie die einzelnen Felder aussehen, ist uns gar nicht so wichtig; wichtig ist nur, dass es diese gibt. Sie sind also **real**, auch wenn man sie **weder sehen noch anfassen kann**.



Allen Feldern gemeinsam ist, dass es stets eine **Quelle** gibt. Beispielsweise ist eine Ladungen immer Quelle eines elektrischen Feldes<sup>2</sup>, ein Magnet ist Quellen eines Magnetfeldes und eine Masse ist Quelle eines Gravitationsfeldes.

### 3.2 Das Gesamtfeld

Konzeptideen:

- Zwei (oder mehr) Quellen wechselwirken miteinander über ihre Felder. Die Felder überlagern sich dabei zu seinem Gesamtfeld als Konstellation aus Quellen und der Wechselwirkung zwischen ihnen.
- Jedes Gesamtfeld trägt Energie. Für die Betrachtung der Energie spielen die Einzelfelder keine Rolle mehr, sondern nur noch deren Überlagerung: das Gesamtfeld.

(Folien 5 bis 10 der Präsentation)

Zur Zeichnung und Erläuterung des Gesamtfeldes:

Zuerst stellt man die Quellen dar (Magnete, Ladungen oder Massen). Dann wird je ein Kreis um die Quellen gezeichnet, welche sich in der Mitte überlappen. Die Größe ist dabei nicht wichtig, nur das Prinzip. Anschließend wird ein Gesamtfeld außen herum gezeichnet **und** die Einzelfelder durchgestrichen. Dabei sollte man erläutern, dass die nurmehr das Gesamtfeld relevant ist, da dieses später die Energie trägt.

Gibt es zwei Quellen gleicher Art<sup>3</sup>, so wechselwirken sie über ihre Felder miteinander. Dabei bildet sich ein sogenanntes **Gesamtfeld**<sup>4</sup> 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 diese für uns keine Rolle mehr. Man kann sich das auch graphisch darstellen.

<sup>1</sup> Falls das nicht der Fall ist, kann auch eine passende Alternative angedeutet werden. Hier geht es darum, dass die Schüler\*innen daran anknüpfen können, was sie bereits kennen und dass sie wissen, was wir hier unter einem Feld verstehen.

<sup>2</sup> auf Nachfrage von Schüler\*innen: eine bewegte Ladung sind auch Quelle eines Magnetfeldes

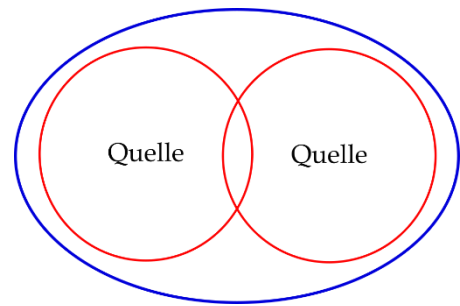
<sup>3</sup> man kann auch sinngemäß „gleiche Quellen“ oder „Quellen gleicher Eigenschaft“ sagen

<sup>4</sup> Wenn Schüler\*innen im Unterricht sinngemäß „gesamtes Feld“ oder „gemeinsames Feld“ sagen, ist das auch in Ordnung.

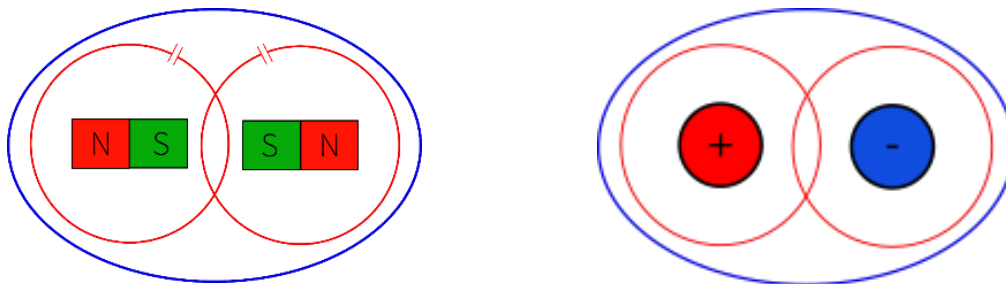


**Beispiel: Darstellung des Gesamtfeldes bei zwei Magneten**

Bei zwei Magneten zeichnet man um jeden Magneten einen Kreis; dieser stellt das Magnetfeld dar. Natürlich ist das Feld eigentlich unendlich groß, sofern das möglich ist, aber da wir das nicht zeichnen können, stellen wir uns das vor. Darstellen können wir das durch die einzelnen Kreise. Da die Felder unendlich weit ausgedehnt sind, überlagern sie sich auch überall, das skizzieren wir dadurch, dass sie sich hier überlappen<sup>5</sup>. Insgesamt ergibt sich dann ein Gesamtfeld, das wir durch eine Ellipse um beide Magnete herum darstellen. Diese Visualisierung ist zwar sehr limitiert, sie hilft uns aber dabei, sich die Situation besser vorstellen zu können. Folglich kann man dieses Prinzip auch auf andere Felder wie elektrische Felder bei Ladungen oder auf Gravitationsfelder bei Massen übertragen.



**Abbildung 1. Gesamtfeld zweier Quellen (allgemein ).**



**Abbildung 2. Gesamtfeld zweier Magnete (links) und zweier Ladungen (rechts). Zur Veranschaulichung, dass nurmehr das Gesamtfeld relevant ist, kann man die beiden Einzelfelder auch durchstreichen (s. links)**

**Achtung!**

Eine Fehlvorstellung von Schüler\*innen ist, dass sich die Einzelfelder nur dann überlagern, wenn sich die Quellen nahe sind. Das sollte mit dem Argument der (wenn möglich) unendlichen Ausdehnung verhindert werden; dennoch sollte darauf geachtet werden, dass dieser Punkt deutlich wird.

Es sollte außerdem darauf verzichtet werden, Feldlinienbilder zu zeigen, da diese den Fokus von der Konzeptidee des Gesamtfeldes nehmen. Es ist sinnvoll, das Gesamtfeld auf die angegebene Weise darzustellen, um die Feldvorstellung einfach zu halten und auf die wesentlichen Aspekte (Quellen, Einzelfelder, Überlagerung zum Gesamtfeld) zu fokussieren.

<sup>5</sup> Wenn die Schüler\*innen im Folgenden „überlappen“ statt „überlagern“ sagen, ist das in Ordnung. Des Weiteren ist es für die Erklärung sinnvoll, die Einzelfelder bei der Konstruktion durchzustreichen und damit zu verdeutlichen, dass im Folgenden nur das Gesamtfeld eine Rolle spielt. Wenn die Schüler\*innen diese allerdings nicht durchstreichen, die Aussage aber erkennen, ist das in auch in Ordnung. Das Durchstreichen dient also eher der Veranschaulichung.

**Aufgaben** (zeichnen und beschreiben; Arbeitsblatt 1, Aufgabe Teil 1):

- 1) *Luftballons*: Wie ergibt sich das Gesamtfeld bei zwei elektrostatisch aufgeladenen Luftballons? <sup>6</sup>

*Lösung: Die elektrischen Einzelfelder der Luftballons (je ein Kreis um die Luftballons) überlagern sich und bilden ein Gesamtfeld (Ellipse um die Konstellation). Zeichnung siehe Lösung Arbeitsblatt.*

- 2) *Satellit und Erde*: Wie ergibt sich das Gesamtfeld bei einem Satelliten, der sich in einer beliebigen Entfernung zur Erde befindet?

*Lösung: Das Gravitationsfeld des Satelliten und das Gravitationsfeld der Erde (je ein Kreis um beide) überlagern sich zu einem Gesamtfeld (Ellipse um die Konstellation). Zeichnung siehe Lösung Arbeitsblatt.*



**Abbildung 3. Zwei elektrostatisch aufgeladene Luftballons (links) und die Konstellation Satellit & Erde (Globus von pixaby.com).**

### 3.3 Tendenz des Gesamtfeldes

Konzeptidee:

Das Gesamtfeld ergibt sich aus der Wechselwirkung der Quellen bzw. Einzelfelder. Deshalb tendiert es entsprechend dieser Wechselwirkung dazu, sich zusammenzuziehen oder auseinanderzudrücken.

(Folien 12 bis 16 der Präsentation)

Die Tendenz des Feldes kennen wir bisher auch als Kraft.<sup>7</sup> Wir wissen nun, dass sich das Gesamtfeld aus zwei (oder mehr) sich überlagernden Einzelfeldern ergibt. Dieses Gesamtfeld besitzt dann die **Tendenz**, sich **entsprechend seiner Wechselwirkung zusammenzuziehen oder auseinanderzudrücken**. Das bedeutet: Wenn sich das Feld durch zwei sich anziehende Quellen (z. B. Massen oder zwei ungleichnamige Ladungen) ergibt, dann tendiert es dazu sich in Richtung der Wechselwirkung (wir kennen das auch als **Kraft**) zu verändern. Bei sich anziehenden Ladungen gibt es also ein Gesamtfeld, das dazu tendiert, sich zusammenzuziehen.<sup>8</sup> Umgekehrt tendiert das Gesamtfeld zweier sich abstoßender Ladungen dazu, sich auseinanderzudrücken.<sup>9</sup>

<sup>6</sup> Hier kann man darauf hinweisen, dass dies passiert, wenn man z. B. einen Luftballon an einem Katzenfell reibt.

<sup>7</sup> Es wäre wünschenswert, wenn die Schüler\*innen dennoch über die Tendenz des Feldes und die Energieübertragung anstelle der Kraft argumentieren würden.

<sup>8</sup> sinngemäßes wie „kontrahieren“, „schrumpfen“ oder „verkleinern“ ist auch angemessen

<sup>9</sup> sinngemäßes wie „expandieren“, „wachsen“ oder „vergrößern“ ist auch angemessen

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.

### 3.4 Energie im Gesamtfeld

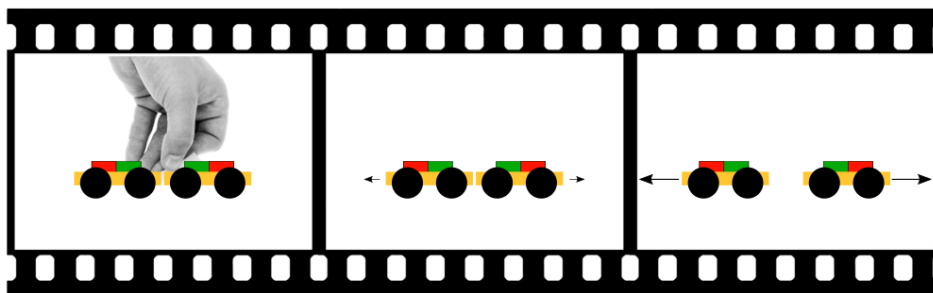
Konzeptideen:

- Das Gesamtfeld trägt Energie, nicht die Einzelfelder.
- Ein Gesamtfeld kann Energie aufnehmen oder abgeben.
- Energie kann also zwischen Feldern und Bewegungen übertragen werden.

#### Beispiel: *Magnetwägen*

An dieser Stelle wird das Experiment der beiden Magnetwägen gezeigt. Dabei wird die folgende Beschreibung geboten bzw. die Schüler\*innen gebeten, diese zu formulieren.

Das Experiment funktioniert wie folgt: Zwei Stabmagnete liegen auf je einem Experimentierwagen in sich abstoßender Konstellation. Die beiden Magnetwägen werden aneinandergedrückt, mit einer Hand festgehalten und den Schüler\*innen nach Beschreibung des Aufbaus die **Frage** gestellt, was wohl passieren wird, wenn man die beiden Wägen loslässt. Hier sollten die Schüler\*innen kurz die Gelegenheit haben, zu antworten. Dann lässt man los; die beiden Wägen fahren auseinander. (Folie 12 der Präsentation)



**Abbildung 4. Abstoßende Magnetwägen; die beiden sich abstoßenden Magnetwägen werden zusammengehalten und dann losgelassen.**

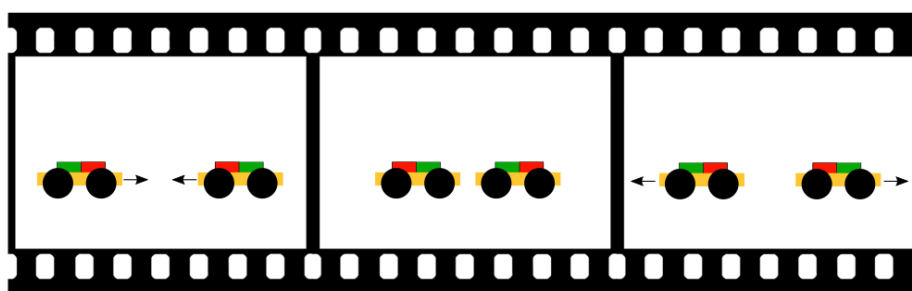
Schauen wir uns ein Beispiel für ein sich veränderndes Feld an:

Wir haben hier zwei Magneten auf Wägen in abstoßender Konstellation. Sie werden gerade noch zusammengehalten. Was passiert wohl, wenn ich sie loslasse?

Sie fahren auseinander. Die Frage ist nun: Woher war vorher die Bewegungsenergie, die sie am Ende haben, wenn sie sich voneinander entfernen (rhetorische Frage)? **Ein Magnet ist Quelle eines Magnetfeldes.** Die beiden **Magnetfelder überlagern sich zu einem Gesamtfeld.** Hier stoßen sich die beiden Magnete ab, das heißt wir haben eine abstoßende Wechselwirkung, also ein **Gesamtfeld, das sich ausdehnt.** Und jetzt kommt der für unser neues Konzept entscheidende Punkt: **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. Das Gesamtfeld trägt also Energie und diese kann **aus dem Feld in Bewegungsenergie übertragen werden.** Wenn man die beiden Magnetwägen also loslässt, dann gibt das Feld Energie an die Bewegung der beiden Magnetwägen ab.

**Beispiel:** *Übertragung auf die umkehrenden Magnetwägen*

An dieser Stelle wird das Experiment der beiden Magnetwägen in leicht abgeänderter Form beschrieben: Die Wägen werden aus einem Abstand angestoßen, sodass sie aufeinander zu fahren, in der Mitte aufgrund der magnetischen Abstoßung umkehren und sich wieder entfernen (**Achtung:** sie sollten sich in der Mitte nicht treffen, damit Schüler\*innen nicht von einem elastischen Stoß ausgehen; es sollte also im Umkehrpunkt ein Abstand zu sehen sein) . Die Erklärung ist analog zu oben und soll nach Möglichkeit von den Schüler\*innen formuliert werden. Hier kann man selbst erklären oder die Schüler\*innen erklären lassen. (Folie 13 der Präsentation)



**Abbildung 5.** Umkehrende Magnetwägen; die Abbildung zeigt die Startsituation des „Aufeinanderzufahrens“.

Schauen wir uns dazu noch an, was passiert, wenn die Magnetwägen aufeinander zufahren:

Hier fahren jetzt die beiden Magnetwägen von gerade aufeinander zu, weil sie angestoßen wurden. Sie haben also Bewegungsenergie. Jeder Magnet hat als Quelle ein Magnetfeld und die beiden Felder überlagern sich (weil die Felder den gesamten Raum durchdringen) zu einem **Gesamtfeld; das trägt grundsätzlich Energie**. Wenn die beiden Wägen nun aufeinander zu fahren, wird Energie aus der Bewegung der Magnete in das Feld übertragen, bis sie in der Mitte keine Bewegungsenergie mehr besitzen. Da hat dann das Gesamtfeld die gesamte Energie aufgenommen. Da das Feld nach wie vor aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung dazu tendiert, sich auseinanderzudrücken, überträgt es (sobald es die gesamte Energie hat) die Energie zurück in die Bewegung der Magnetwägen; sie werden wieder schneller. **Genauso funktioniert das mit allen Feldern: Ein Gesamtfeld kann Energie aufnehmen oder abgeben**. Dabei nimmt das Feld Energie aus einer Bewegung auf oder gibt Energie in die Bewegung ab.

**Aufgaben** (mündliche Fragestellung und Diskussion der Aufgabe Teil 2 von Arbeitsblatt 1):

Die Aufgaben richten sich nach den bereits bekannten Beispielen und Abbildungen. Hier soll auf die Frage eingegangen werden, woher die Energie in die Bewegung übertragen wird bzw. wo sich diese zu Beginn befindet. Dazu sollen zwei Veranschaulichungen gezeigt werden:

- 1) *Luftballons*: Zwei Luftballons werden mit Luft befüllt und an einem Fell (oder Stoff) gerieben, sodass sie sich beide elektrostatisch aufladen. Dann wird ein Ballon auf dem Tisch platziert und der andere langsam an diesen herangeführt. Man sieht, dass sich der freie Ballon wegbewegt. (Folie 14 der Präsentation)
- 2) *Satellit und Erde*: Man zeigt die angegebene Simulation („Schwerpunkt und Umlaufbahnen“. Dabei wählt man „Modell“ und die Konstellation Erde und Satellit aus. Dann bereitet man die Bewegung des Satelliten so vor, dass sich dieser auf einer Ellipse um die Erde bewegt. Dabei sollte deutlich erkennbar sein, dass er ein einem Punkt besonders nah und an einem anderen weit entfernt ist. Es ist von Vorteil, den „Pfad“ ein und die „Geschwindigkeit“ aus zu stellen. [https://phet.colorado.edu/sims/html/gravity-and-orbits/latest/gravity-and-orbits\\_de.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/gravity-and-orbits/latest/gravity-and-orbits_de.html) (Folie 15 der Präsentation)

- 1) *Luftballons*: Woher kommt die Energie, welche der Luftballon am Ende in seiner Bewegung besitzt?

**Lösung: aus dem Gesamtfeld der elektrischen Einzelfelder der Luftballons.**

- 2) *Satellit und Erde*: Wenn sich der Satellit der Erde nähert, wird er schneller. Woher kommt die Energie für diese schnellere Bewegung?

**Lösung: aus dem Gesamtfeld der beiden einzelnen Gravitationsfelder von Erde und Satellit.**

## 4. Energieübertragung

Hier wird erläutert, wie die Übertragung von Energie mit der Veränderung von Feldern zusammenhängt und woran man das erkennt. Insbesondere die Richtung der Energieübertragung (in ein Feld oder aus einem Feld) soll dabei verdeutlicht werden.

### Konzeptideen:

- Wenn Energie in ein oder aus einem Feld übertragen wird, dann verändert sich das Feld. Das merkt man das daran, dass...
  - ... sich eine Bewegung verändert.
  - ... sich ein Feld zusammenzieht oder auseinanderdrückt.
  - ... der Abstand der Quellen sich ändert.
- Ein Feld gibt dabei immer Energie ab, wenn es sich entsprechend seiner Tendenz (Wechselwirkung) verändert. Umgekehrt nimmt es Energie auf (Richtung der Energieübertragung).
- Die Tendenz eines Feldes führt dazu, dass es sich zu einem Zustand minimaler Energie verändert, sofern es die Möglichkeit dazu hat.

### Indikatoren

Wir schauen uns nun an, woran man erkennt, wann und in welche Richtung Energie übertragen wird. Zunächst aber noch eine Anmerkung: Wenn wir bei der Betrachtung der Energie im Folgenden über Felder sprechen, dann **meinen wir damit stets das Gesamtfeld**, da nur dieses Energie trägt.

Grundsätzlich gibt es drei Indikatoren, an denen man das erkennt:

1. Eine Bewegung verändert sich, d. h. etwas wird schneller oder langsamer.
2. Der Abstand von Quellen ändert sich, d. h. ein Feld dehnt sich aus oder zieht sich zusammen.
3. Immer dann, wenn ein Feld sich in Richtung der Wechselwirkung (Kraft) verändert, gibt es Energie ab. Wenn es sich entgegen der Wechselwirkung verändert, nimmt es Energie auf (Richtung der Energieübertragung).

**Beispiel:** Umkehrende Magnetwagen**Achtung!**

Schüler\*innen könnten die „Stärke des Feldes“ als Indikator für die Richtung der Energieübertragung verwenden, z. B. die Formulierung „wenn das Feld schwächer/stärker wird“. Dies geschieht meist, wenn sich der Abstand der Quellen ändert, z. B. bei Erde und Satellit. Darauf sollte allerdings verzichtet werden, da sich zwar in einigen Fällen die Kraft ändert, dies aber nicht unmittelbar mit der Richtung der Energieübertragung zusammenhängt. Auch dass die Kraft geringer wird, wenn Energie abgegeben wird, stimmt nicht in allen Fällen (z. B. Vergleich von anziehenden Massen mit abstoßenden Ladungen). Hier sollte also darauf geachtet werden, dass die **Veränderung des Feldes/Abstands entsprechend/in Richtung der Tendenz** zu einer **Energieabgabe** führt. Argumentationen über die Stärke des Feldes oder die simple Kraft sind dabei nicht zielführend.

Hier wird nun ein Beispiel erläutert, das die Schüler\*innen bereits kennen, um den Fokus auf die Beobachtung anhand der drei Indikatoren zu richten. Da dieser Teil intuitiv ist, kann er nach Möglichkeit schnell behandelt werden. Die Schüler\*innen sollten nur in jedem Fall verstehen, dass man die Veränderung eines Feldes und demnach auch die Energieübertragung anhand dieser drei Indikatoren beschreiben kann. **Wichtig** ist, dass man die Richtung der Energieübertragung (in ein Feld oder aus einem Feld) richtig mit der Veränderung des Feldes entsprechend seiner Tendenz verknüpft.

Der Fokus sollte dabei immer auf der Beantwortung der folgenden Fragen liegen:

1. Woran erkennt man, dass Energie übertragen wird?
2. Woran erkennt man, wohin bzw. in welche Richtung die Energie übertragen wird?  
(Als Grund dafür gilt die Überlegung zur Tendenz als Indikator für die Richtung der Energieübertragung.)

Schauen wir uns dazu nochmal das Beispiel mit den umkehrenden Magnetwagen an: Wenn die Magnete aufeinander zu fahren, werden sie durch die abstoßende Wechselwirkung langsamer und geben deshalb **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 (egal welches) bei **Veränderungen in Richtung der Wechselwirkung** immer Energie abgibt; also, wenn sich ein abstoßendes Feld ausdehnt oder ein anziehendes Feld zusammenzieht. Wenn es sich andererseits entgegen der Wechselwirkung verändert, dann nimmt es Energie auf. Folglich tendiert ein Feld also immer zum **Zustand minimaler Energie**. Um es von außen zu verändern, muss man ihm also in der Regel Energie zuführen.



**Erweiterung: Schwingende Magnetringe**

Falls es zeitlich knapp wird, kann dieses Beispiel auch übersprungen werden. Es ist allerdings spannend, da hier zwei Felder und Bewegungsenergie verknüpft werden. (Folie 16 der Präsentation)

Bei einem etwas komplizierteren Beispiel spielen **magnetisches Feld, Bewegungsenergie und Gravitationsfeld** eine Rolle: die schwingenden Magnetringe. Zunächst werden die zwei Ringe in abstoßender Konstellation zusammengehalten; hier trägt das Magnetfeld Energie und tendiert dazu, sich auseinanderzudrücken. Wenn man loslässt, bekommt es die Möglichkeit dazu und der obere Magnetring fliegt nach oben; **Energie wird in die Bewegung übertragen**. Gleichzeitig wird aber auch Energie in das Gravitationsfeld von Magnetring und Erde übertragen, während der Ring sich nach oben bewegt. Dieser wird dann wieder langsamer, bis die gesamte Bewegungsenergie ins Gravitationsfeld übertragen wurde. Dann nähern sich Ring und Erde aufgrund der **Tendenz des Gravitationsfeldes** wieder. Unten angelangt steckt dann die Energie wieder im Magnetfeld der Ringe und der obere Ring schwingt wieder nach oben. So wiederholt sich der Prozess.

**Aufgaben** (mündliches Besprechen/Diskutieren auf Grundlage von Arbeitsblatt 2):

Bei diesen Aufgaben sollen die bereits bekannten Kontexte mit besonderer Hinsicht auf die folgenden zwei Fragen erneut besprochen werden:

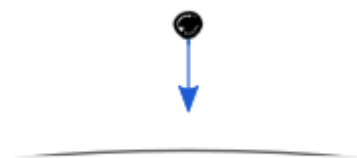
1. Woran erkennt man, dass Energie übertragen wird?
2. Woran erkennt man, in welche Richtung (wohin; z. B. in ein Feld oder aus einem Feld) die Energie übertragen wird?
3. Wie hängt das mit der Tendenz des Feldes zusammen?

**1. Luftballons**

Lösung: Man erkennt es daran, dass sich die Luftballons entfernen (Abstand ändert sich) und der eine Ballon schneller wird (Tempo der Bewegung ändert sich). Das Gesamtfeld der abstoßenden Ballons tendiert dazu, sich auseinanderzudrücken (auch: vergrößern). Die Veränderung entsprechend dieser Tendenz führt zur Energieabgabe des Feldes an die Bewegung.

**2. Satellit und Erde**

Lösung: Man erkennt es daran, dass sich Satellit und Erde entfernen bzw. annähern (Abstand ändert sich) und der Satellit langsamer bzw. schneller wird (Tempo der Bewegung ändert sich). Für den Fall, dass sich der Satellit nähert: Das Gesamtfeld tendiert dazu, sich zusammenzuziehen (auch: verkleinern). Die Veränderung entsprechend dieser Tendenz führt zur Energieabgabe des Feldes an die Bewegung; der Satellit nähert sich und wird schneller.

**3. Fallender Ball:**<sup>10</sup> Hier soll diskutiert werden, wie sich die Energieübertragung**Abbildung 6. Fallender Ball.**

<sup>10</sup> Als Hinweis kann man den Schüler\*innen bewusst machen, dass es hier um das Gesamtfeld geht.



beschreiben lässt, wenn ein Ball aus der ruhenden Hand fallengelassen wird.<sup>11</sup> (Folie 17 der Präsentation)

Lösung: Man erkennt es daran, dass sich der Ball der Erde nähert (Abstand ändert sich) und dabei schneller wird (Tempo der Bewegung ändert sich). Das Gesamtfeld tendiert dazu, sich zusammenzuziehen (auch: verkleinern). Die Veränderung entsprechend dieser Tendenz führt zur Energieabgabe des Feldes an die Bewegung; der Ball wird schneller und nähert sich der Erde.

#### Achtung!

Bei der Energieübertragung bei Satellit und Erde nehmen manche Schüler\*innen an, dass der Satellit am entferntesten Punkt Energie bekomme, um „Schwung“ zu holen oder auch, dass er beim Entfernen von der Erde Energie bekäme. Diese Beschreibung entspricht nicht der angemessenen Beschreibung durch das Konzept, weswegen bereits hier darauf geachtet werden sollte, dass die Schüler\*innen die Richtung der Energieübertragung nicht verwechseln. Außerdem sollte Fachsprache verwendet werden; in jedem Fall zumindest klar sein, was die Schüler\*innen meinen, wenn sie den „Schwung“ beschreiben.

Auch das Beispiel des fallenden Balles ist erfahrungsgemäß schwierig für Schüler\*innen, da sie meist nicht daran denken, dass sowohl Ball als auch Erde Quellen eines Gravitationsfeldes sind. Erst das Gesamtfeld als Überlagerung der beiden trägt Energie und kann diese dann an die Bewegung des Balles (also den Ball) abgeben, wenn dieser nach unten beschleunigt. Hier sollte also darauf geachtet werden, dass die Bedeutung des Gesamtfeldes bewusst ist.

---

<sup>11</sup> Falls die Frage gestellt wird, warum sich nur der Ball bewegt: Der Ball wird nicht „stärker angezogen“, sondern die Wechselwirkung zwischen Ball und Erde ist gleich groß. Aufgrund seiner geringeren Masse wird der Ball allerdings stärker beschleunigt. Das gleiche Prinzip gilt für Erde und Satellit.

---

## Überleitung

Hier wird an die Eingangsinformation angeknüpft, um beispielhaft zu motivieren, dass man klassische Phänomene auch mit Hilfe des Konzeptes über Felder beschreiben kann. (Folie 18 der Präsentation)

### Konzeptidee:

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

Wie wir bisher gesehen haben, gibt es also Energie in Feldern und Energie in Bewegungen. Aber wie hängt das jetzt mit den Energieformen zusammen, die wir aus der Schule kennen?

Die Antwort darauf ist einfach und zentral für den Ansatz: **Es gibt in Wirklichkeit keine anderen Energieformen, sondern immer nur Feldenergie und Bewegungsenergie.** Das heißt, man kann alle Energieformen, die wir so kennen, auf Felder und Bewegungen zurückführen.

Schauen wir uns dazu die Beispiele vom Anfang an:

- a) Bei der **Achterbahn** wird potenzielle Energie in Bewegungsenergie umgewandelt, würde man nach dem traditionellen Ansatz aus der Schule sagen. Die Frage ist aber: Was ist denn eigentlich die **potenzielle Energie**? Wie wir bei den Beispielen von **Satellit und Erde** sowie dem fallenden Ball gesehen haben, ist die Energie, die dabei in Bewegung übertragen wird die Energie, die das **Gravitationsfeld** abgibt. Das ist hier bei der Achterbahn genauso. Also wenn der Wagen von oben herunterfährt, dann gibt das Gravitationsfeld (also die Überlagerung der Felder von Wagen und Erde) einen Teil seiner Energie an die Bewegung ab. Dabei wird der Wagen schneller und **das Feld zieht sich zusammen**; der Wagen nähert sich der Erde.
- b) Beim **Kernkraftwerk** funktioniert das ähnlich: Wir erhalten **elektrische Energie**, die vorher in nuklearen Prozessen frei wurde. Die Energie, die wir nutzen, ist elektrische Energie, oder - mit Feldern ausgedrückt – **Energie im elektrischen Feld der Ladungen in unseren Kabeln und Geräten**. Die Energie hat das elektrische Feld aus den nuklearen Prozessen im Kraftwerk aufgenommen, wo entsprechend **Energie von einem anderen Feld abgegeben** wurde. Welches Feld das genau ist, und wie man den Ansatz auch auf der **atomaren und nuklearen Ebene** verstehen kann, wollen wir uns im Folgenden anschauen.

## 5. Arten von Feldern und Bewegungen

Hier werden die mikroskopischen Felder von Atomen eingeführt sowie die elektromagnetische Strahlung und die thermische Energie in das Konzept eingebettet.

Konzeptideen:

- In jedem Festkörper gibt atomare (elektrische) Felder.
- Die Bindung von Molekülen und Festkörpern entsteht durch die Tendenz des Feldes zur Minimierung der Feldenergie.

### 5.1 Atomare Felder

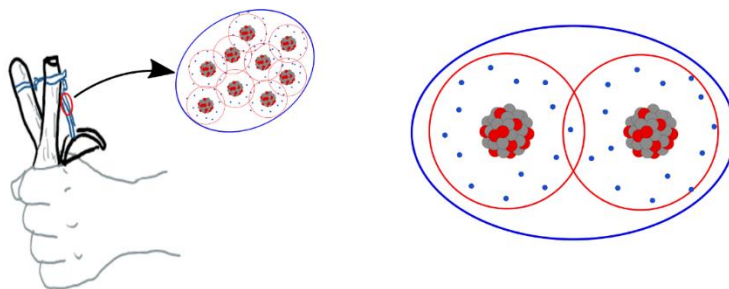
**Beispiel:** *Schleuder*

Bei diesem Beispiel kann man die Abbildung der Schleuder zeigen oder auch ein Gummiband für die Demonstration verwenden. Jedenfalls sollte man die Abbildung mit den atomaren Feldern bei der Erklärung herzeigen. (Folien 19 bis 21 der Präsentation)

Schauen wir uns dazu zunächst ein Alltagsbeispiel an: Eine elastische Schleuder. Wenn man einen Ball in eine Steinschleuder spannt und dann loslässt, so fliegt der Ball davon. Dabei erhält er **Bewegungsenergie**. **Aber wo kommt die her?**

Sie kommt aus dem Band der Schleuder. Traditionell würde man sagen hier wird **Spannenergie** umgewandelt. Wir wissen aber nach unserem neuen Ansatz, dass es nur Bewegungsenergie und Feldenergie gibt. Also ist die Frage: **Wo finden wir hier eine Bewegung oder ein Feld?**

Wenn wir uns die Schleuder genauer ansehen, dann wissen wir, dass sie aus **Atomen** besteht, welche durch die Überlappung ihrer elektrischen Felder ein elektrisches Gesamtfeld haben. Dieses **Gesamtfeld trägt Energie**. Wenn man nun das Band der Schleuder spannt, dann zieht man das Gesamtfeld der Atome auseinander. Jetzt haben wir aber gelernt, dass ein Feld, immer wenn die Möglichkeit hat, seine **Energie minimiert**. Das ist auch der Grund dafür, dass Atome sich z. B. zu **Festkörpern** binden und **nicht einfach auseinanderfallen**. Denn um so einen Festkörper, wie beispielsweise eine Schleuder, zu verändern, muss man zunächst



**Abbildung 7. Gesamtfeld von zwei Atomen (rechts) bzw. mehreren Atomen des Gummibandes einer Schleuder (links).**

Energie in das Feld stecken, damit man es verändern kann. Ohne dem Feld also Energie von außen zuzuführen, wird es sich nicht verändern und damit ist der Festkörper stabil. Das kennen wir als **Bindung** bzw. **Bindungsenergie**.

Also immer, wenn wir die Konstellation von Atomen verändern, müssen wir zunächst Energie in das elektrische Feld stecken, weil wir es entgegen seiner anziehenden

An dieser Stelle kann ein Festkörpermodell oder z. B. ein Tisch zur Hilfe genommen werden, um zu demonstrieren, dass man Energie in das Gesamtfeld der Atome übertragen muss, um einen stabilen Festkörper zu verändern.

Wechselwirkung verändern. Das machen wir, wenn wir die Schleuder spannen. Wenn man die gespannte Schleuder dann loslässt, zieht sich das Feld wieder zusammen und die Energie wird frei. Das Band gibt diese **Energie dann an die Bewegung des Balls** ab.

Wir sehen also hier **zwei Dinge**: Erstens, dass es **nur Bewegungsenergie und Feldenergie** gibt – in diesem Fall makroskopische Bewegung des Balles und Energie im **mikroskopischen Feld der Atome** – und 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.

### Beispiel: Muskelkontraktion

Hier bietet es sich an, eine Abbildung zu zeigen oder die Analogie zur Schleuder herzustellen. Alternativ kann man auch mit einem eigenen Arm argumentieren; hier ist Spielraum bei der Umsetzung. (Folien 22 und 23 der Präsentation)

Schauen wir uns dazu noch ein Beispiel an, bei dem das ähnlich funktioniert: Die Muskelkontraktion des Menschen. Stellt euch vor, ihr werft einen Ball. Der Ball erhält dabei (genauso wie bei der Schleuder) Bewegungsenergie. Diese **muss aus einer anderen Bewegung oder einem Feld kommen, aber wie?**

Dazu kann man sich überlagern, wie eine Muskelkontraktion funktioniert. Dabei laufen **im Körper chemische Reaktionen** ab, bei denen Moleküle, also **Konstellationen von Atomen, umgebaut** werden. Dieser Umbau ändert die Konstellation der Atome untereinander und damit ihr **Gesamtfeld**. Die Energie, die das Feld abgibt, wird in die Bewegung des Armes bzw. der Hand und damit an die Bewegung des Balles übertragen. Dazu

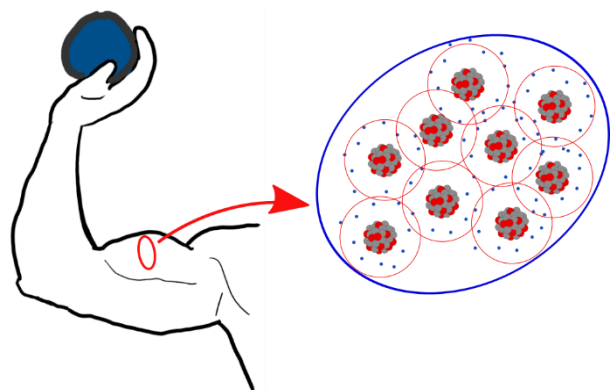


Abbildung 8. Gesamtfeld der Atome im menschlichen Körper (z. B. Muskel).

braucht es (ähnlich wie beim Loslassen der Schleuder) ein **Auslöser**, hier das Signal unseres Gehirns für das „Wegwerfen“. Mit diesem Auslöser laufen dann die Reaktionen ab, bei denen sich die chemischen Verbindungen und damit die atomaren Strukturen ändern und das Gesamtfeld die **Energie abgeben kann**. Dem Feld wird dann also ermöglicht, seine Energie weiter zu minimieren. Diese Energie wird dann in die makroskopische Bewegung des Armes und damit des Balles übertragen.

Das ist auch der Grund dafür, warum wir unserem Körper **immer wieder Nahrung**, also **neue chemische Verbindungen**, zuführen müssen, damit er seine Körperfunktionen aufrechterhalten kann. Denn ohne die neuen Moleküle kann keine Feldenergie mehr aus der Veränderung von Atom-Konstellationen bei chemischen Prozessen frei werden.

**Aufgaben** (Besprechung auf Grundlage von Arbeitsblatt 3, Aufgaben 1 und 2):

1. *Automotor*: Beim Losfahren eines Autos wird Energie in die Bewegung des Autos übertragen. Dies geschieht, indem der Motor Treibstoff verbrennt. Aber woher genau kommt die Energie, die dabei frei wird? (Tipp: wo ist diese vorher, wenn das Auto noch steht?)

Lösung: Im Motor wird Treibstoff verbrannt. Dabei verändert sich die Konstellation der Atome (Moleküle reagieren und verändern sich und ihre Abstände). Die Verbrennung gibt dabei dem Gesamtfeld der Atome die Möglichkeit, sich zu verändern; dabei gibt es Energie ab, welche über weitere Prozesse zur Bewegung der Zylinder und damit der Räder führt.

2. *Feuerwerk*: Bei der Explosion eines Feuerwerks wird Energie in die Bewegung der auseinanderfliegenden Partikel sowie in das Licht übertragen. Woher kommt diese her bzw. wo ist sie, kurz bevor der Feuerwerkskörper explodiert?<sup>12</sup> (Folie 25 der Präsentation)

Lösung: Das (elektrische) Feld der Atome/Partikel der Rakete gibt die Energie an die Bewegung der Teilchen und das Licht (elektromagnetisches Feld) ab. Das Anzünden zu Beginn ist dabei der Auslöser für die Veränderung des Feldes entsprechend seiner Tendenz.



**Abbildung 9. Feuerwerk**  
(von pixabay.com).

---

<sup>12</sup> Falls hier als Antwort kommt, dass die Energie in der Bewegung der Rakete steckt, kann argumentiert werden, dass das zwar stimmt, aber nicht ausreicht: Woher kommt der Großteil der Energie?

---

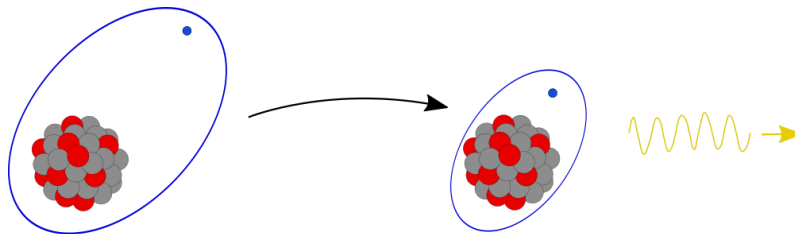
## 5.2 Elektromagnetische Strahlung

Konzeptidee:

Elektromagnetische Strahlung ist Feldenergie. Ein Lichtstrahl (als räumlich gebündeltes Feld) trägt Feldenergie.

(Nur auf Nachfrage: Ebenso trägt ein Photon als Feld-Paket (räumlich konzentriertes Feld) auch Feldenergie.)

Die Zuordnung von elektromagnetischer Strahlung als Feldenergie wird über das Atom und dessen Abstrahlung motiviert. Dabei kann man z. B. die nebenstehende Abbildung verwenden. Wichtig ist hier, dass man die Strahlung als Feldenergie von der Bewegungsenergie abgrenzt. (Folien 26 und 27 der Präsentation)



**Abbildung 10. 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.**

Wir wollen uns noch eine weitere Energieform anschauen, die man mit diesem Ansatz einbetten kann: die Strahlungsenergie der elektromagnetischen Strahlung.

Dazu stellen wir uns vor, **wie denn eigentlich elektromagnetische Strahlung (also z.B. Licht) entsteht**: Wenn man ein Atom betrachtet, dann haben wir dort den Kern und die Elektronen, die sich um diesen bewegen. Da sowohl der Kern als auch die Elektronen **elektrisch geladen** sind, haben sie 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 dem Kern **verändert**, dann verändern sich auch die Felder. Dabei zieht sich das Feld in Richtung der Wechselwirkung zusammen und gibt Energie ab. Diese Energie muss irgendwo hin und – in der Tat – wir beobachten, dass das Atom elektromagnetische Strahlung, z.B. als Licht, abstrahlt. Diese Strahlung trägt also die abgegebene Energie. Nun ist die Frage: **Ist dies Feldenergie oder Bewegungsenergie?**

Auf den ersten Blick könnte man ja meinen, dass es sich um Bewegungsenergie handelt, da sich das Licht bewegt. Allerdings ist das **Licht** im **Gegensatz zu bewegenden Objekten kein Teilchen**, denn es besitzt **keine Masse**. Es ist vielmehr eine **Überlagerung des abgestrahlten elektrischen und magnetischen Feldes**. Das bedeutet, dass die elektromagnetische Strahlung, so wie der Name sagt, ein elektromagnetisches Feld ist und dementsprechend **Feldenergie** trägt.

Auch wenn elektromagnetische Strahlung in **gebündelter** Form, z. B. einem **Lichtstrahl oder Laserstrahl**, vorkommt, so ist es immer noch **Feldenergie**, nur eben **gebündelt**.



**Beispiel: Mikrowelle**

Das Beispiel *Mikrowelle* kann mündlich behandelt werden.

Falls Schüler\*innen fragen, wie dies mit dem Photon zusammenhängt, kann folgendes geantwortet werden:

Das Gleiche gilt für das Photon, denn dieses ist nichts anderes als die kleinste Einheit Feldenergie. Im Gegensatz zu Objekten mit Bewegungsenergie hat dieses aber – genau wie der Lichtstrahl – keine Masse, also auch keine Bewegungsenergie, sondern nur Feldenergie.

**Achtung!**

Manche Schüler\*innen schreiben der elektromagnetischen Strahlung eher Bewegungsenergie zu, da für sie intuitiver ist, dass diese sich „bewegt“ bzw. „ausbreitet“. Um dieser Vorstellung zu begegnen, sollte man die Strahlung von der Bewegung von Objekten bzw. Teilchen abgrenzen; indem man betont, dass Strahlung wie z. B. Licht keine Masse besitzt und deshalb auch keine Bewegungsenergie. Zusätzlich kann erläutert werden, dass es sich um die Überlagerung eines magnetischen und elektrischen Feldes handelt, welche sich ausbreiten. Die Ausbreitung ist also auf den „unendlichen“ Charakter des Feldes zurückzuführen und nicht auf die Bewegung eines quasi-Objektes. Das gleiche gilt im Photonenbild.

Schauen wir uns dazu das Beispiel mit der **Mikrowelle** von eben an. Dabei hat die Bewegung der Atome der Nahrung Energie erhalten. Diese muss irgendwo herkommen: Wenn man die Mikrowelle einschaltet, dann erzeugen wir ein elektromagnetisches Feld (die Mikrowellen), das dann Feldenergie trägt und die Mikrowelle und damit auch die **Nahrung durchsetzt**. Wenn dieses Feld dann mit der Nahrung wechselwirkt, dann werden die Atome der Nahrung zur **Bewegung angeregt** und erhalten dabei ihre Energie. Diese Energie gibt das elektromagnetische Feld der Mikrowelle ab.

**Aufgabe:** *Metall schneiden mit einem Laser* (Besprechung auf Grundlage von Arbeitsblatt 3, Aufgabe 3)

Von wo nach wo wird Energie übertragen, wenn ein Laser (ähnlich einem starken Lichtstrahl<sup>13</sup>) auf eine Metallplatte trifft und diese schneidet? (Folie 26 der Präsentation)

**Lösung:** Die Energie des elektromagnetischen Feldes des Laserstrahls wird bei der Wechselwirkung mit der Metallplatte



**Abbildung 11. Lasercutter**  
(von pixabay.com)

<sup>13</sup> Hier wird bewusst das Wort „elektromagnetisch“ bzw. „Feld“ vermieden, da die Schüler\*innen über den Ausdruck „ähnlich... Licht“ selbst auf diese Verbindung schließen sollen. Am Ende kann nach Wunsch auch aufgelöst werden, dass es sich dabei nicht um optische Wellenlängen handeln muss.

in die Rekonfiguration<sup>14</sup> der Atome/Teilchen dieser. Außerdem kommt es zur Erwärmung von Platte und Umgebung (diese Art der Energie, bekannt als thermische Energie, werden wir im Folgenden betrachten).

Achtung!

Manche Schüler\*innen assoziieren einen Laserstrahl mit einem Teilchenstrahl. Hier sollte unbedingt klar kommuniziert werden, dass es sich um elektromagnetische Strahlung handelt, sofern Schüler\*innen diese Fehlvorstellung äußern.

### 5.3 Thermische Energie als mikroskopische Bewegungsenergie

Die Thermische Energie wird als mikroskopische Bewegungsenergie eingeführt und dies über das Beispiel des schwingenden mathematischen Pendels eingeführt. Dabei liegt der Fokus auf der Betrachtung der Energieübertragung an die Luftatome sowie an die Atome der Halterung.

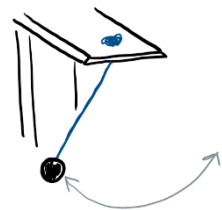
Um im Experiment auch zu zeigen, dass das Pendel nicht unendlich lange schwingt (was den Schüler\*innen aber bewusst sein sollte), sollte hier nach Möglichkeit auch ein vorbereitetes Pendel in einfachster Form demonstriert werden. (Folien 28 bis 31 der Präsentation)

Konzeptidee:

Thermische Energie ist mikroskopische Bewegungsenergie. Wird ein Objekt heißer, bewegen sich dessen Atome schneller.

Wie ist das eigentlich **thermische Energie**? Wie kann man das in unseren Ansatz einordnen?

Dazu schauen wir uns die Bewegung eines Pendels an. Das Pendel schwingt raus und runter. Dabei wird ständig Energie aus dem Gravitationsfeld von Kugel und Erde in die Bewegung der Kugel übertragen und wieder zurück. Aber da der Prozess **nicht ganz reibungsfrei** von statten geht, wird das Pendel mit der Zeit immer weniger hoch kommen bzw. 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 sein, die wir **offenbar auf den ersten Blick nicht sehen**. Nun haben wir aber gerade zuvor gelernt, dass es auch mikroskopische Felder und Bewegungen gibt, nämlich die der **Teilchen, aus denen die Materie besteht**. Schauen wir da also genauer nach:



<sup>14</sup> Umstrukturierung oder Änderung der Konstellation ist auch angemessen.



Hier sollte das Argument unbedingt graphisch unterstützt werden, z. B. mit Hilfe des BB-Bags. (Folien 28 und 29 der Präsentation; Video zum BB-Bag)

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.

Die Energieübertragung an der Aufhängung sollte visuell auch mit Hilfe des BB-Bags oder mit der nebenstehenden Abbildung veranschaulicht werden. (Folie 30 der Präsentation)

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 sich an der Stelle, wo die Schnur gerieben hat, leicht erwärmt wurde. Immer wenn etwas warm wird, kann man das dadurch erklären, dass die Atome sich schneller bewegen (**mikroskopische Bewegungsenergie**).

**Aufgaben** (Besprechung auf Grundlage von Arbeitsblatt 3, Aufgaben 4 und 5):

1. *Kugelbahn*: Eine Metallkugel wird auf einer U-förmigen Metallbahn losgelassen und rollt hin-und-her. Dabei gelangt sie immer weniger weit hoch, bis sie schließlich unten in der Mitte der Bahn zum Stillstand kommt. Was passiert mit der Energie, welche die Kugel am Anfang noch in ihrer Bewegung hat und am Ende offenbar verschwunden ist? (Folie 31 der Präsentation)

Lösung: Die Bewegungsenergie der Kugel wird während des Prozesses durch Reibung an die (mikroskopische) Bewegung der Bahnatome bzw. -moleküle sowie die Atome der Kugel selbst übertragen. Diese Bewegung der Atome kann dann als Erwärmung der Bahn sowie der Kugel wahrgenommen werden.<sup>15</sup>

2. *Erwärmung von Nahrung*: Wenn wir unsere Speisen in der Mikrowelle erwärmen, wird ihr Energie zugeführt. Wo finden wir diese Energie am Ende wieder, wenn das Essen erwärmt wurde?<sup>16</sup>

Lösung: Die Strahlung der Mikrowelle versetzt die Atome/Moleküle des Essens in Bewegung. Diese (mikroskopische) Bewegung nehmen wir als Erwärmung wahr.

---

<sup>15</sup> Eine Argumentation über die Erwärmung der Luft ist auch passend, stellt aber einen kleineren Beitrag dar.

<sup>16</sup> Es genügt, dieses Beispiel mündlich mit den Schüler\*innen zu besprechen.

## 6. Moderne Physik

In diesem Teil werden die bisherigen Konzeptideen auf die Felder von Quarks und das Higgsfeld erweitert. Dabei soll insbesondere der Zusammenhang von Energie und Masse verdeutlicht werden. Für die Veranschaulichung dienen stets Abbildungen. (Folien 32 bis 40 der Präsentation)

### Einleitung

Wir haben jetzt einige Energieformen auf Bewegungsenergie und Feldenergie zurückführen können. Unser Ansatz, dass es nur diese beiden Arten von Energie gibt und man damit alle Phänomene erklären kann, scheint also so weit Sinn zu ergeben. Um dies noch weiter zu überprüfen, wollen wir uns nun als letzten Punkt noch den Zusammenhang von Energie und Masse über die Energie-Masse-Äquivalenz ansehen.

### Beispiel: LHC des CERN

Wir haben eingangs bereits gehört, dass bei **Kollisionsversuchen** im LHC am CERN neue Teilchen entstehen; „quasi aus dem Nichts“. Natürlich geht das nicht so einfach, denn die Teilchen haben eine Energie, die nicht aus dem Nichts entstehen kann. Es entstehen also massive Teilchen. Aber wie geht das? Wie können nur aus Energie Teilchen entstehen? Woher kommt die Masse der Teilchen?



Anscheinend sind Energie und Masse miteinander verknüpft. Ihr habt bestimmt bereits schon einmal über Einsteins berühmte Formel  $E = m c^2$  gehört. Diese stellt eben diese Verknüpfung her. Um zu verstehen, wie Energie und Masse darüber zusammenhängen, wollen wir uns im Folgenden anschauen, wie man dies in unserem Ansatz mit Feldenergie und Bewegungsenergie verstehen kann. (Folie 32 der Präsentation)

### 6.1 Quarkfelder

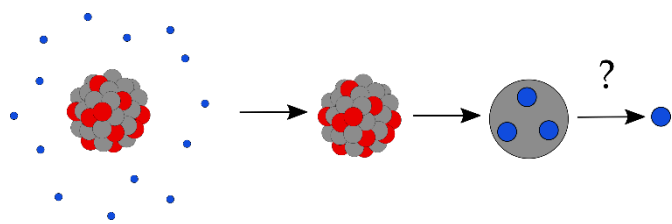
#### Konzeptidee:

- Quarks (die Bestandteile der Protonen und Neutronen) sind Quellen eines Feldes (das sogenannte Quarkfeld).
- Das Gesamtfeld von Quarkfeldern trägt Energie. Die Energie des gesamten Quarkfeldes der Protonen und Neutronen in einem Kern entspricht der Masse des Kerns.
- Wenn sich das Quarkfeld verändert, ändert sich auch die Energie und also die Masse.

Ein einfaches Beispiel, um sich über die Masse Gedanken zu machen ist die Waage. Wenn wir uns **morgens auf die Waage stellen**, dann erfahren wir unsere Masse. Wie finden wir heraus, ob diese nun auch Energie ist bzw. wenn das so ist; ist sie dann Feldenergie oder Bewegungsenergie?

Hier soll zunächst der Aufbau der Materie erläutert werden, damit alle Schüler\*innen ein Verständnis davon erhalten können, dass Quarks die Grundbausteine der Nukleonen, also der Protonen und Neutronen sind. So kann dann der Zusammenhang zu der Masse der Nukleonen geschaffen werden. (Folie 34 der Präsentation)

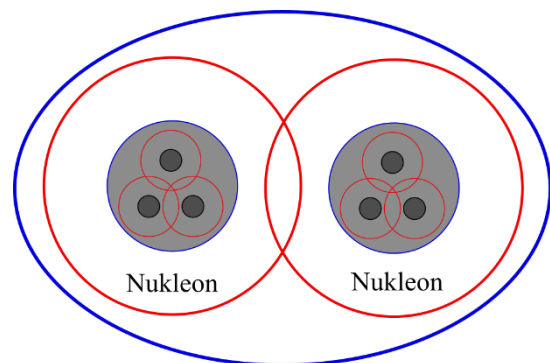
Um zu verstehen, wo unsere Masse und auch die Masse der am LHC erzeugten Teilchen herkommt schauen wir nun etwas tiefer **in die Materie** hinein. Wir bestehen aus Molekülen, die wiederum aus Atomen bestehen. Die Atome bestehen aus Elektronen und einem Atomkern. Der Atomkern ist im Vergleich zu den Elektronen viel schwerer, das heißt unsere Masse kommt hauptsächlich durch die Masse



**Abbildung 12. Aufbau der Materie (schematisch); vom Atom über den Atomkern und den Nukleonen (Protonen und Neutronen) zu den Quarks als Elementarteilchen.**

unserer Atomkerne zu Stande. Die Atomkerne wiederum bestehen aus Nukleonen, den Protonen und Neutronen. Die Masse all dieser Nukleonen macht unsere Masse 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 drei Quarks. Nun würde man also vermuten, dass die **Masse der drei Quarks** zusammen die Masse eines Protons oder Neutrons ergibt. 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 von uns her?**

Die Antwort ist tatsächlich das, was wir gesucht haben, nämlich **Energie**. Die **Quarks sind nämlich Quellen eines Feldes, das wir noch nicht kennen (das sogenannte Quarkfeld)**. Das funktioniert genauso wie die Felder, die wir schon 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 ( $E = mc^2$ ), ist **Energie gleich Masse** und die fehlenden 90 Prozent unserer Masse ist in Wirklichkeit Energie, die im Quarkfeld steckt. Das Besondere hier ist also, dass sich die Feldenergie als Masse äußert. (Folie 34 der Präsentation)



**Abbildung 13. Gesamtfeld der Quarks als Einzelfeld der Nukleonen sowie deren Gesamtfeld in einem modellhaften Kern.**

Mit Hilfe dieser Energie kann man auch verstehen, warum Kerne nicht auseinanderfallen. Denn die positiven Protonen im Atomkern stoßen sich einander ab. Dadurch, dass sich die Quarkfelder der Nukleonen im Kern aber überlagern und die **Energie des Quarkfeldes minimiert** ist (ähnlich wie wir das auch von der **Bindung** der Atome kennen), fällt der Kern nicht auseinander, sondern ist stabil. Das nennt man auch die **Bindungsenergie** des Kerns.

Wenn sich dann ein Atomkern z. B. durch einen **äußeren Einfluss (einen Auslöser)** verändert und das Feld in einen **Zustand mit noch weniger Energie** übergehen kann, dann ändert sich das **Quarkfeld** und **gibt Energie ab**. Diese Energie wird dann in diesem nuklearen Prozess frei. Man merkt das auch dadurch, dass die Masse geringer wird; man nennt das den **Massendefekt**.

Also immer, wenn sich in einem Prozess die Masse eines Kerns ändert und scheinbar Masse verliert (Massendefekt), dann ändert sich in Wirklichkeit das Quarkfeld und seine Energie. Die Energie, die das Feld abgibt, bemerken wir dann als Abgabe von Masse: Es geht scheinbar Masse verloren.

### Beispiel: Alpha-Zerfall

Ein Beispiel dafür ist der **Alpha-Zerfall**. Dabei gibt ein Atomkern ein Alpha-Teilchen ab, also zwei Protonen und zwei Neutronen, und wird dadurch zu einem kleineren Kern. Das Alpha-Teilchen hat dabei Bewegungsenergie. Die Frage ist nun, wo kommt die her?

Antwort: Aus dem **Massenunterschied**. Der Kern am Ende 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 also als Massenunterschied (wir kennen das auch als Massendefekt) und an der Bewegungsenergie des Alpha-Teilchens. (Folie 35 der Präsentation)

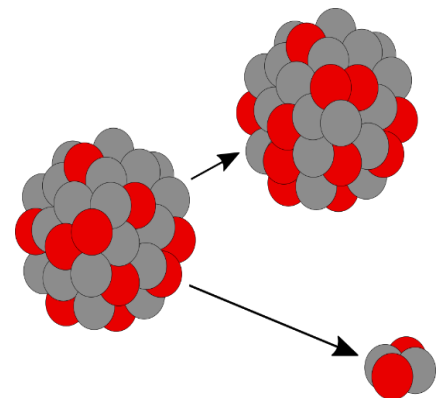


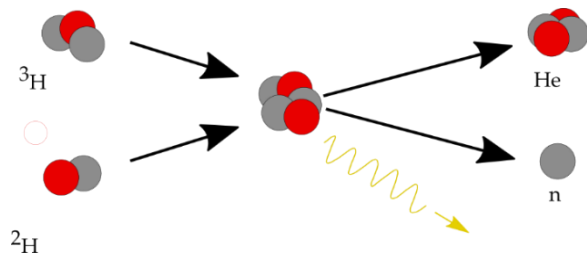
Abbildung 14. Alpha Zerfall (schematisch).

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

**Aufgabe: Kernfusion**

Bei der Fusion werden zwei Wasserstoffkerne zu einem gemeinsamen Kern verschmolzen. Dabei ist der entstehende freie Heliumkern (He) leichter als die beiden einzelnen zusammen. Zusätzlich wird ein Neutron (n) freigesetzt und es entsteht Strahlung (z. B. in der Sonne). Warum geht hier scheinbar Masse

„verloren“ und woher kommt die Bewegungsenergie und die Energie des Lichtes? (Folie 36 der Präsentation)



**Abbildung 15. Kernfusion (schematisch).**

**Lösung:** Die Bewegungsenergie von Heliumkern und Neutron sowie die Feldenergie der Strahlung entspricht der Massendifferenz. Das ist die Energie, die das Quarkfeld abgibt. [ODER: Die Energie des Quarkfeldes (des fusionierten Kerns) teilt sich auf das Quarkfeld (d. h. die Masse) des Heliumkerns und des Neutrons sowie auf die Feldenergie der Strahlung auf.]

## 6.1 Higgsfeld

Konzeptidee:

- Die Masse der Elementarteilchen kommt durch das Higgs-Feld.
- Dieses durchsetzt das gesamte Universum.

Der letzte Aspekt, den wir uns ansehen wollen, ist die Frage, **woher denn nun aber die Masse der Elementarteilchen kommt**. Also die Masse der Quarks selbst und die Masse der Elektronen. Wenn wir diese Frage auch mit der Energie von Feldern oder Bewegungen erklären können, dann scheint unser Ansatz **unsere gesamte Welt** (so wie wir sie kennen) **zu beschreiben**. Also: woher kommt die Masse der Elementarteilchen?

Wir haben gelernt, dass **Masse das gleiche wie Energie** ist. Das bedeutet: die Masse von Elektronen und Quarks ist im Grunde nur Energie. Und wie zuvor kommt sie durch ein Feld zu Stande; das **Higgsfeld**. Dies ist ein Feld, das unser **gesamtes Universum durchsetzt** und immer existiert. Durch die **Wechselwirkung der Elektronen und Quarks mit dem Higgsfeld** erhalten diese Teilchen (auch wenn sie sich nicht bewegen) ihre **Ruheenergie**. Diese Energie ist ihre **Masse**. Das Higgsfeld ist also notwendig, damit die Elementarteilchen ihre Masse bekommen. Auf diese Weise kann man die Masse der Elementarteilchen, also deren Energie, auf das fundamentale **Higgsfeld** zurückführen.

### Beispiel: Paarerzeugung

Die Paarerzeugung ist ein Beispiel zum Einstieg, das verdeutlichen soll, wie Energie und Masse durch das Higgsfeld zusammenhängen. Ausgehend davon sollten Schüler\*innen beschreiben können, wie Entstehung und auch Vernichtung von Elementarteilchen mit dem Higgsfeld zusammenhängen. (Folie 38 der Präsentation)

Schauen wir uns ein Beispiel an, wo das eine Rolle spielt: Zum Beispiel bei der **Entstehung von Elementarteilchen**. 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 konzentriert sich deren Feldenergie im Treffmoment und wir haben Energie im Gesamtfeld, die theoretisch auch in andere Feldenergie oder Bewegungsenergie übertragen werden kann. 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, wo zwei elektromagnetische Felder in zwei Elementarteilchen, ein Elektron und ein Positron, umgewandelt werden. Das **Positron ist das Antiteilchen des Elektrons**. Das 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.

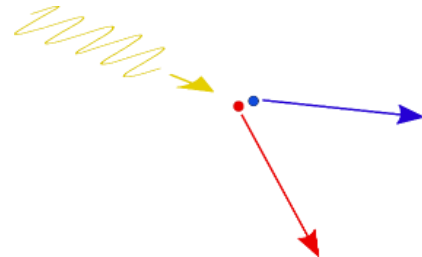


Abbildung 16. Paarerzeugung (schematisch).

### Aufgabe: PET (Annihilation)

In der Medizin wird die PET verwendet, um Tumore im Körper zu lokalisieren. Dazu 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.<sup>17</sup> Wenn man diese misst, dann kann man ihren Weg zurückverfolgen und den Tumor lokalisieren. Aber warum geht das? Wo war hier die Energie der Strahlen vorher (als es noch die Teilchen gab) und wo ist sie am Ende? (Folie 38 der Präsentation)

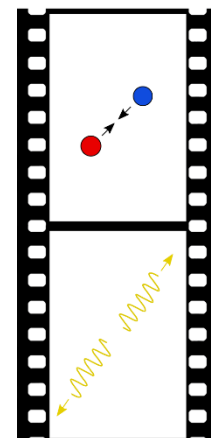


Abbildung 17. Annihilation bei der PET (schematisch).

<sup>17</sup> Dabei befinden sich Elektron und Positron nahezu in Ruhe, weshalb man nicht die Bewegungsenergie betrachten muss.



Lösung: Zu Beginn haben Positron und Elektron eine Masse und also Energie durch das (die Wechselwirkung mit dem) Higgsfeld. Wenn diese sich gegenseitig vernichten, wird die Energie in das elektromagnetische Feld der Strahlung übertragen.

**Aufgabe oder Beispiel:** *Teilchenerzeugung am LHC* (je nach Zeit als Aufgabe oder Diskussion)

Falls man möchte, kann man hier auch noch andeuten, dass diese Effekte (Erzeugung und Vernichtung von Elementarteilchen) auch bei Kollisionsversuchen am LHC des CERN stattfinden. Um zu verstehen, welche Teilchen dabei entstehen können, muss man die dafür nötige Energie kennen. (Folie 40 der Präsentation)

Im Teilchenbeschleuniger LHC am CERN werden Protonen mit hoher Geschwindigkeit aufeinander geschossen. Dabei treffen sie als Teilchen mit besonders großer Bewegungsenergie aufeinander.

- 1) Wie verteilt sich die Gesamtenergie vor dem Treffmoment auf Bewegungen und Felder?

Lösung: Zu Beginn gibt es die Bewegungsenergie der Teilchen sowie die Energie im Quarkfeld der Protonen und die Energie durch die Masse der Quarks selbst durch das Higgsfeld.



**Abbildung 18.**  
**Teilchenentstehung am LHC**  
**(CERN) (von pixabay.com).**

Die Feldenergie und Bewegungsenergie im Treffmoment kann zur Entstehung neuer Elementarteilchen führen, die sich wiederum auch zu größeren Teilchen zusammensetzen können. Beobachten kann man das dann mit Detektoren, welche die einzelnen Teilchen nachweisen.

- 2) Wie könnte sich die Energie nach dem Treffmoment verteilen, wenn wir diese Situation mit Bewegungsenergie und Feldenergie beschreiben wollen?

Lösung: Energie verteilt sich auf die Massen und also Energie der neuen Elementarteilchen durch (die Wechselwirkung mit dem) Higgsfeld. Außerdem gibt es deren Bewegungsenergie. Möglicherweise gibt es noch Energie im elektromagnetischen Feld entstehender Strahlung. Ergänzung: weiter: Wenn sich Quarks zu einem neuen Teilchen zusammensetzen, gibt es Energie in deren Quarkfeld.

## 7. Zusatz (falls Zeit übrig ist)

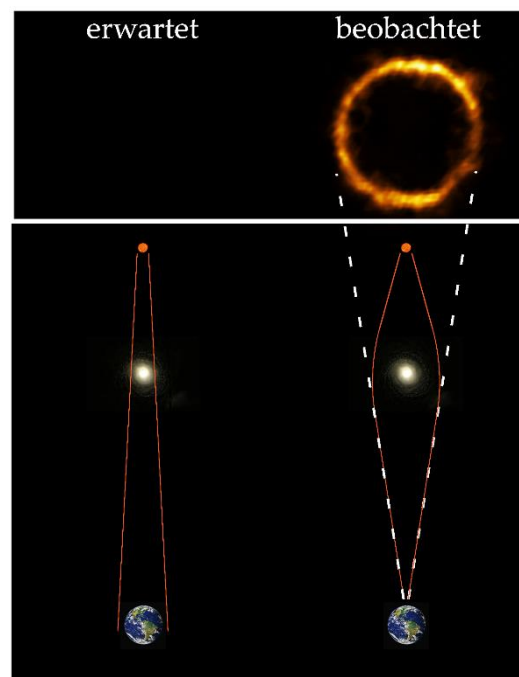
Falls am Ende noch Zeit übrig bleibt, können zwei Beispiele gezeigt oder diskutiert werden, die sich auf den Zusammenhang von Masse und Energie beziehen:

1. Die Gravitationslinse erläutert das Verhalten von elektromagnetischer Strahlung, die von Masse und damit der Gravitation beeinflusst wird. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass in der ART die Energie nicht nur grundlegend für das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Massen ist, sondern auch für die Wechselwirkung zwischen Feldern (und Massen).
2. Die gravitationsbedingte Rotverschiebung thematisiert ein ähnliches Prinzip. Dabei wird die Energie zwischen elektromagnetischem Feld und Gravitationsfeld übertragen, wodurch die Strahlung Energie abgibt.

### 7.1 Beispiel Gravitationslinse

Wir schauen uns nun noch ein kurzes Phänomen als Ausblick in die Astronomie an — die **Ablenkung** von Licht an einem schwarzen Loch:

Zwischen unserer Erde und einer weit entfernten Galaxie liegt ein Schwarzes Loch, z. B. der Kern unserer Galaxie (der Milchstraße). Normalerweise würde man **erwarten, dass das Licht, das diese Galaxie aussendet, nicht zu uns gelangen kann**, wenn das schwarze Loch den Weg versperrt. Tatsächlich sieht man aber einen Ring (Einsteinring genannt). Dieser Ring liegt genau in der Blickrichtung der Galaxie und entsteht durch das Licht, das von ihm ausgesendet wird. Die Frage ist also: Wie kommt das Licht der Galaxie zu uns, wenn er durch das schwarze Loch verdeckt wird? Die Antwort auf die Frage lieferte uns **Einstein** mit seiner heutzutage **gut bestätigten allgemeinen Relativitätstheorie**. Nach dieser Theorie wird das Licht **durch die Gravitation des schwarzen Loches abgelenkt**. Aber wie geht das? Gravitation wirkt doch nur auf Masse und Licht hat doch keine Masse, oder? Habt ihr eine Idee, wie man das erklären könnte? (Folie 40 der Präsentation)<sup>18</sup>



**Abbildung 19. Gravitationslinse:** Nach klassischer Physik erwartetes (links) und im Rahmen der ART bzw. in der Realität erhaltenes Abbild (rechts) einer Galaxie an einer Gravitationslinse. Bild der Gravitationslinse entnommen von [eso.org](http://eso.org) (ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Rizzo et al.); Bild der Erde von [pixabay.com](http://pixabay.com).

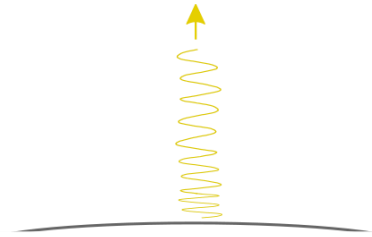
<sup>18</sup> auch interessant: Nobelpreis 2020 an Genzel, Penrose und Ghez für die Forschung zu schwarzen Löchern



Lösung: Da die elektromagnetische Strahlung Feldenergie besitzt (und Energie sich wie Masse verhält), wirkt die Gravitation auch auf die Strahlung (und sie wird abgelenkt/angezogen).<sup>19</sup>

## 7.2 Beispiel: Gravitationsbedingte Rotverschiebung

Wir betrachten nun noch ein letztes Phänomen, bei dem Energie übertragen wird: Die sogenannte **gravitationsbedingte Rotverschiebung**. Wenn man Licht bzw. einen Laserstrahl von der Erde aus nach oben richtet, dann kann man feststellen, dass die Frequenz der Strahlung kleiner wird, je weiter sich die Strahlung von der Erde entfernt; das Licht wird rötler (daher der Name Rotverschiebung). Wenn man sich die Beziehung  $E = h \cdot f$  zwischen Frequenz und Energie der Strahlung anschaut, dann stellt man fest, dass eine Verringerung der Frequenz auch eine Verringerung der Energie bedeutet. Das Licht gibt also Energie ab. Aber wohin „verschwindet“ die Energie? Könnt ihr hier die Energieübertragung erklären? (Folie 41 der Präsentation)<sup>20</sup>



**Abbildung 20. Rotverschiebung (schematisch).**

Lösung: Die Energie der elektromagnetischen Strahlung wird in das Gravitationsfeld übertragen. Das Gravitationsfeld nimmt dabei einen Teil der (Feld-) Energie der Strahlung auf.

<sup>19</sup> Eine Formulierung mit Gesamtfeld von Strahlung und schwarzem Loch ist hier auch akzeptabel.

<sup>20</sup> auch interessant: Nobelpreis 1961 an Rudolf Mößbauer für die Resonanzabsorption von Gammastrahlung (Mößbauer Effekt)