Module 1 – Grundlagen der Fusion

FuseNet Lehrmaterialien für weiterführende Schulen

Handbuch für Lehrkräfte v.1.1

Allgemeine Einführung

Energie spielt in der heutigen Gesellschaft eine grundlegende Rolle. Technologie ist zunehmend auf dem Vormarsch und wird von immer mehr Menschen genutzt. Man geht davon aus, dass der weltweite Energiebedarf kontinuierlich steigen wird. Mit den bisherigen Methoden wird die Nachfrage irgendwann kaum mehr zu befriedigen sein. Diese Unterrichtsreihe stellt eine mögliche Energiequelle der Zukunft vor: die Kernfusion.

Die Reihe setzt sich aus fünf verschiedenen Modulen zusammen. Das erste Modul beginnt mit einer breit gefassten Annäherung an das Energieproblem und die damit verbundenen Bereiche der Physik, die für die Kernfusion relevant sind. In den folgenden vier Modulen wird dann jeweils ein bestimmter Aspekt der Fusion behandelt: Weg zur Fusion, Plasmakontrolle, Materialien in der Fusionstechnologie und Fusion in der Praxis. Diese Module können nach Abschluss des ersten Moduls in beliebiger Reihenfolge bearbeitet werden. Das Niveau der Unterrichtsreihe entspricht den Stufen 3-4 der ISCED-Skala (Sekundarbereich II - Postsekundarer nicht-tertiärer Bereich).

Verwendung der Module

Das Lehrbuch für Schüler*innen setzt sich aus verschiedenen Unterrichtsmaterialien zusammen: Die bunten Seiten –„Ergänzungsblätter“ – enthalten weiterführende Erklärungen zu den zugrundeliegenden Themen als optionale Ergänzung für den Unterricht.

Die Ergänzungsblätter in hellen Farben beinhalten Übungen für den Unterricht. Sie können für weiterführende Diskussionen und als Verständnistest für die Schüler*innen genutzt werden.

Als Ergänzung zu dem Modul gibt es weitere Übungen mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden, die von * – Einstiegsfragen – bis *** – komplexere Fragen – reichen.

Im Gesamtumfang eines Moduls sind enthalten:

- ein Lehrbuch für Schüler*innen
    - einschließlich Unterrichtsübungen
- Zusatzaufgaben
- eine PowerPoint-Präsentation
    - einschließlich Unterrichtsübungen
- Handbuch für Lehrkräfte
    - mit den folgenden Anhängen
        - Tabelle mit Konstanten und Umrechnungsfaktoren
        - Auflösung zu den Unterrichtsübungen
        - Auflösung zu den Zusatzaufgaben

Modul 1 – Grundlagen der Fusion, Handbuch für Lehrkräfte

Inhalt des Handbuchs für Lehrkräfte

Handbuch für Lehrkräfte v.1.1 1

Allgemeine Einführung 1

Kapitel 2: eng verwandte Themen oder Lektionen 2

Kapitel 4: Kurzzusammenfassung von Modul 1 3

15-minütige Einführung für fortgeschrittene Schüler*innen 6

1-stündige Lektion für durchschnittliche Schüler*innen 7

1-stündige Lektion für fortgeschrittene Schüler*innen 8

Kapitel 6: Verwendung der PowerPoint-Präsentation und der anderen Materialien 10

Für Lehrkräfte und Schüler*innen 11

Anhang A: Tabelle mit Konstanten und Umrechnungsfaktoren 13

Anhang B: Auflösung der Unterrichtübungen 14

Anhang C: Auflösungen zu den Zusatzaufgaben **v.1.0** 18

Kapitel 1: Lernziele

Dieses Modul befähigt die Schüler*innen

- den Zusammenhang zwischen dem Klimawandel und dem Energieproblem zu verstehen
- die Grundlagen der Fusion erklären zu können
- Fusionsgleichungen aufstellen zu können
- den Nutzen und die Zusammensetzung eines Plasmas erklären zu können
- die Grundlagen des magnetischen Einschlusses zu begreifen
- die Geometrie eines Tokamaks zu verstehen
- den Unterschied zwischen den drei Feldspulen des Tokamaks erklären zu können
- die Grundlagen von Magnetfeldern im Tokamak zu verstehen

Kapitel 2: eng verwandte Themen oder Lektionen

Die Inhalte dieses Moduls dienen dazu, Gelerntes zu veranschaulichen oder praktisch anzuwenden. Dieses Modul kann jedoch auch *ohne* Vorwissen begonnen werden. Das gilt insbesondere dann, wenn bereits Unterricht zu einem der folgenden Themen stattgefunden hat:

- Atomphysik
- Elektrizität
- Magnetismus
- das ideale Gasgesetz
- Energie und Energiespeicherung

Bei entsprechendem Vorwissen zu einem oder mehreren dieser Themen kann das Modul zur Wiederholung genutzt werden.

Kapitel 3: Themenüberblick Modul 1 nach Kapiteln

Modul 1 – Grundlagen der Fusion, Handbuch für Lehrkräfte

Das erste Modul beginnt mit einem breit gefassten Einstieg in das Energieproblem und die damit verbundenen physikalischen Themen:

1. Energie
    - Probleme und Lösungen des Energiebedarfs
        - Klimawandel
        - Bevölkerungswachstum
        - Freisetzung und Nutzung von Energie
    - Kernfusion
    - Kinetische Energie
2. Astrophysik
    - die Sonne
    - Atomphysik
        - Rutherfords Atommodell
        - Kernreaktionen unter Berücksichtigung von Wasserstoff
        - Isotope und Ionen
3. Plasma, der vierte Aggregatzustand
    - Gasparameter
        - Dichte
        - Temperatur
    - Elektrostatische Interaktion
        - Ladungen
        - Elektrische Felder
    - Geladene Teilchen in Magnetfeldern
        - Magnetfeld
        - Lorentzkraft
4. Konstruktion einer Fusionsmaschine
    - Elektrizität
        - Strom
        - Transformatoren
            - der ideale Transformator
    - Elektromagnetismus
        - Spulen
        - Induktionsspannung
        - Magnetischer Fluss
        - Magnetfeldstärke
        - Fusion durch magnetischen Einschluss
    - Geometrie eines Torus
        - Tokamak

Kapitel 4: Kurzzusammenfassung von Modul 1

Dieses Kapitel soll als Einführung oder zur Wiederholung ausgewählter Themen dienen, die ein Verständnis der Kernfusion und deren Kontext ermöglichen. Für die Verwendung im Unterricht ist lediglich geringes beziehungsweise kein Vorwissen zu den oben aufgeführten Themen erforderlich. Im ersten Kapitel wird Wissen über den Klimawandel vorausgesetzt, jedoch kein tiefergehendes

Verständnis des Treibhauseffekts oder des politischen Diskurses. Der Klimawandel dient als Ausgangspunkt zur Erläuterung eines weltweiten Energieproblems, das anschließend diskutiert wird.

Im zweiten Kapitel werden die Grundlagen der Kernphysik erklärt. Bei entsprechendem Vorwissen kann das Kapitel in erster Linie zur Wiederholung dienen. Wenn die Thematik noch nicht behandelt wurde, dient dieses Kapitel als Einführung. Elektrische Ladungen und die Rolle elektrischer Ladung in Atomen und Atomkernen werden auf Einstiegsniveau erklärt. Dieses Kapitel kann als Alternative zum regulären Lehrplan für die Einführung in die Kernphysik auf dem Niveau einer weiterführenden Schule herangezogen werden. Die Begriffe Temperatur und Dichte werden behandelt.

Im dritten Kapitel wird erläutert, was ein Plasma ist. Durch den Einfluss der Popkultur und Plasmabildschirme sollte der Begriff bereits bekannt sein. Wissenschaftliche Kenntnisse hingegen werden nicht vorausgesetzt. Schwerpunktthema ist erneut die elektrische Ladung und die daraus folgenden Anziehung und Abstoßung der geladenen Teilchen.

Nach der Einführung folgen zwei Hauptthemen, die den Tokamak betreffen: Die Geometrie und die Hauptmagneten, die das Magnetfeld im Inneren des Tokamaks erzeugen. Gemeint sind die toroidalen Feldspulen, der zentrale Solenoid und die Poloidalspulen. Das Zusammenspiel dieser Spulen erzeugt ein spiralförmiges Magnetfeld. Im entsprechenden Kapitel werden kurz der Aufbau und die Funktionsweise eines einfachen Solenoids erläutert. Wenn die Schüler*innen nicht mit dem Konzept der magnetischen Induktion vertraut sind, bietet sich der Einstieg über das entsprechende Ergänzungsblatt an.

Kapitel 5: Konzepte für den Basisunterricht

Der Basisunterricht kann nach vier möglichen Konzepten durchgeführt werden, abgestimmt auf das Vorwissen und den Zeitplan der Schüler*innen. Vorgesehen sind eine 15-minütige Unterrichtseinheit und eine 1-stündige Unterrichtseinheit, die sowohl durchschnittlichen als auch fortgeschrittenen Schüler*innen als Einführung in die Thematik der Fusion dient.

Das Anfängerkonzept kann angewendet werden, wenn mehrere oder alle Themen neu für die Schüler*innen sind. Die Konzepte für Fortgeschrittene richten sich an Schüler*innen, die die wichtigsten Themen im Zusammenhang mit Fusion bereits kennen. Sie haben deswegen eine kürzere Einführung und bieten mehr Raum für Diskussionen und Übungen.

Die Konzepte für Fortgeschrittene sind exemplarisch und die Auswahl der Themen und/oder Kapitel kann an die Klasse angepasst werden.

Im Praxisteil jeder Lektion können die Schüler*innen Audiodateien anhören, Diskussionen führen, Fragen stellen und Übungen bearbeiten.

15-minütige Einführung für durchschnittliche Schüler*innen

Diese Lektion soll einerseits den Klimawandel und das Energieproblem erklären und andererseits Begeisterung und Neugierde für die Thematik wecken.

Das benötigte Material deckt nur das erste Kapitel des Moduls von Seite 1 bis Seite 8 einschließlich der Unterrichtsübung 1.1 ab. Desweiteren können die Folien 1 bis 6 der PowerPoint-Präsentation sowie das Video „Do we need nuclear energy to stop climate change?“ und Zusatzübungen des Schwierigkeitsgrads * verwendet werden. Das Ergänzungsblatt enthält weiterführende Lektüre.

Modul 1 – Grundlagen der Fusion, Handbuch für Lehrkräfte

Nach der Vorstellung des Themas kann eine Diskussion im Klassenverband oder eine Gruppendiskussionen mit anschließender Präsentation der Ergebnisse geführt werden. Im Anschluss an die Einführung und/oder Diskussion können die Schüler*innen im Lehrbuch lesen, Übungen bearbeiten oder sich mit Themen ihrer Wahl beschäftigen.

Zur Unterrichtsvorbereitung:

- Download der PowerPoint-Präsentation
- Verteilung des Moduls und der Übungen an die Schüler*innen
- Vorbereitung der Unterrichtsübung 1.1 (jeweils landesspezifisch, siehe Anhang B)

Dauer	Aufgabe der Lehrkraft	Materialien	Aufgabe der Schüler*innen
3 min	Einführung des Themas	Kapitel 1 PowerPoint-Folie: 1 und 2 Und/Oder Video *Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?*	Zuhören
5 min	Besprechung der Unterrichtsübung 1.1	Kapitel 1 PowerPoint: Folie 3 und 4	Offene Diskussion im Klassenverband/ in Kleingruppen à 4 Personen
3 min	Vorstellung von Kapitel 1: *Das Energieproblem*	Kapitel 1 PowerPoint: Folie 5 und 6	Zuhören, Fragen stellen
5 min		Modul 1 Zusatzübungen A.1 bis A.3	Lektüre von Kapitel 1 einschließlich des Ergänzungsblatts. Bearbeitung der Übungen allein/in Paararbeit zu Hause oder im Unterricht

Modul 1 – Grundlagen der Fusion, Handbuch für Lehrkräfte

15-minütige Einführung für fortgeschrittene Schüler*innen

Diese Lektion dient drei Zielen: Erstens stellt sie eine Einführung in den Klimawandel und das Energieproblem dar. Zweitens sollen Begeisterung und Neugier für das Thema geweckt werden. Drittens dient sie zur kurzen Wiederholung eines oder mehrerer Themen rund um Probleme der Energieversorgung.

Das benötigte Material umfasst das erste Kapitel des Moduls von Seite 1 bis 8, einschließlich der Unterrichtsübung 1.1. Danach kann Material aus beliebigen Kapiteln entnommen werden, z.B. Kapitel 3 - Plasma. Desweiteren können die Folien 1 bis 6 und 18 bis 29 der PowerPoint-Präsentation und die Zusatzaufgaben der Kategorien ** und *** verwendet werden. Dies sind die Aufgaben A.1 bis A.3 und A.9 bis A.10. In Kapitel 7 sind einige YouTube-Videos als ergänzende Quellen aufgelistet.

Zur Unterrichtsvorbereitung:

- Download der PowerPoint-Präsentation
- Ausgabe des Moduls und der Übungen an die Schüler*innen
- Vorbereitung der Unterrichtsübung 1.1 (landesspezifisch, siehe Anhang B)

Die Schüler*innen sollen zuhören, diskutieren und die Übungen bearbeiten. Nach der Einführung können sie im Lehrbuch lesen, Übungen bearbeiten oder ihr Wissen zu einem beliebigen Thema vertiefen. Ausgewählte Lerninhalte können auch in Lerngruppen diskutiert werden.

Dauer	Aufgabe der Lehrkraft	Materialien	Aufgabe der Schüler*innen
1 min	Einführung ins Thema	Kapitel 1 PowerPoint: Folien 1 und 2	Zuhören
3 min	Besprechung der Unterrichtsübung 1.1	Kapiel 1 PowerPoint: Folien 3 und 4	Offene Diskussion im Klassenverband/in Kleingruppen à vier Personen
2 min	Präsentation von Kapitel 1: *Das Energieproblem*	Kapitel 1 PowerPoint: Folien 5 und 6	Zuhören, Fragen stellen
4 min	Präsentation eines beliebigen Kapitels, z.B. Kapitel 3 - *Plasma*	Kapitel 3 PowerPoint: Folien 18 bis 21	Zuhören, Fragen stellen
2 min	Besprechung der Unterrichtsübung 1.3	Kapitel 3 PowerPoint: Folien 22 und 23	Schnelle Antwort!
5 min	Präsentation eines beliebigen Kapitels, z.B. Kapitel 3 -*Plasma*	Kapitel 3 PowerPoint: Folie 24 bis 29	Zuhören, Fragen stellen
		Modul 1 Zusatzaufgaben: A.1 bis A.3 und A.9 bis A.10	Lektüre des Kapitels allein/ in Paararbeit zu Hause oder im Unterricht

Modul 1 – Grundlagen der Fusion, Handbuch für Lehrkräfte

1-stündige Lektion für durchschnittliche Schüler*innen

Diese einstündige Lektion soll Begeisterung und Neugier für das Thema wecken und eine intensive Beschäftigung mit den zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhängen der Fusion ermöglichen. Unterricht für Anfänger*innen sollte sich auf die Vorgänge im Inneren eines Atoms und das Verständnis von Kernreaktionen konzentrieren und die Themen Plasma und Magnetfelder lediglich streifen.

Das benötigte Material erstreckt sich über das gesamte Modul 1, wobei der Schwerpunkt auf den Kapiteln 1 und 2 und einem Teil von Kapitel 4 liegt. Zusatzaufgaben der Niveaus * und eventuell ** können ergänzend eingesetzt werden. Das Ergänzungsblatt enthält weiterführende Lektüre für die Schüler*innen. Die gesamte PowerPoint-Präsentation kann genutzt werden.

Zur Unterrichtsvorbereitung:

- Download der PowerPoint-Präsentation
- Ausgabe des Moduls und der Übungen an die Schüler*innen
- Vorbereitung der Unterrichtsübung 1.1 (landesspezifisch, siehe Anhang B)

Je nach den Bedürfnissen der Schüler*innen können entweder alle Themen in einer zusammenhängenden Lektion oder in vier separaten Einheiten vermittelt werden. Jede Einheit beinhaltet eine Einführung in eines der Kapitel und lässt Raum für Diskussionen im Klassenverband sowie für Übungen.

Dauer	Aufgabe der Lehrkraft	Materialien	Aufgabe der Schüler*innen
3 min	Vorstellung des Themas	Kapitel 1 PowerPoint-Folien: 1 und 2 Und/Oder Video *Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?*	Zuhören
5 min	Besprechung von Unterrichtsübung 1.1	Kapitel 1 PowerPoint: Folien 3 und 4	Offene Diskussion im Klassenverband/ in Kleingruppen à 4 Personen
3 min	Präsentation von Kapitel 1: *Das Energieproblem*	Kapitel 1 PowerPoint: Folien 5 und 6	Zuhören, Fragen stellen
5 min		Modul 1 Zusatzaufgabe A.1	Bearbeitung allein/ in Paararbeit/ im Klassenverband
10-15 min	Präsentation von Kapitel 2: *Fusion im Inneren unserer Sonne* bis Unterrichtsübung 1.2	Kapitel 2 PowerPoint-Folien: 7 bis 13	Zuhören, Fragen stellen
5 min	Besprechung der Unterrichtsübung 1.2	Kapitel 2 PowerPoint Folie: 14 bis 15	Offene Diskussion im Klassenverband/in Kleingruppen à 4 Personen.
2 min	Präsentation von Kapitel 2: *Fusion im Inneren unserer Sonne*	Kapitel 2 PowerPoint-Folie: 16 und 17	Zuhören, Fragen stellen

5 min		Modul 1 Zusatzaufgabe A.4	Bearbeitung allein/ in Paararbeit/ im Klassenverband
10-15 min	Vorstellung Kapitel 3:	Kapitel 3 PowerPoint-Folie: 18 bis 21 Und Video *Ted-ed – Solid, liquid, gas and … plasma*	Zuhören, Fragen stellen
2 min	Besprechung von Unterrichtsübung 1.3	Kapitel 3 PowerPoint-Folie: 22 und 23	Offene Diskussion, sobald die Schüler*innen ihre Wahl getroffen haben
5-7 min		Kapitel 3 PowerPoint-Folie: 24 bis 27	Zuhören, Fragen stellen
2 min	Besprechung Unterrichtsübung 1.4	Kapitel 3 PowerPoint-Folie: 28 und 29	Offene Diskussion, sobald die Schüler*innen ihre Wahl getroffen haben

1-stündige Lektion für fortgeschrittene Schüler*innen

Diese einstündige Lektion soll Begeisterung und Neugier für das Thema wecken und zur intensiven Auseinandersetzung mit den zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhängen der Fusion anregen. Fortgeschrittene Schüler*innen sollten mit einer kurzen Wiederholung der bekannten Themen beginnen und sich dann intensiv den Plasmen und Magnetfeldern widmen.

Das benötigte Material erstreckt sich über das gesamte Modul 1, wobei der Schwerpunkt auf den Kapiteln 1, 3 und 4 liegt. Das Ergänzungsblatt sollen sich die Schüler*innen im Selbststudium erarbeiten. Außerdem können Zusatzaufgaben der Niveaus ** und *** erledigt werden. Die gesamte PowerPoint-Präsentation kann genutzt werden.

Zur Unterrichtsvorbereitung:

- Download der PowerPoint-Präsentation
- Ausgabe des Moduls und der Übungen an die Schüler*innen
- Vorbereitung der Unterrichtsübung 1.1 (landesspezifisch, siehe Anhang B)

Wenn die Themen der Klasse bereits bekannt sind, können Lehrkraft und Schüler*innen im Unterricht die Rollen tauschen. Die Lehrkraft stellt Fragen und die Schüler*innen sind angehalten, die Themen zu erläutern. Wenn die Klasse damit nicht einverstanden ist, soll eine Gruppendiskussion im Unterricht geführt werden. Die Unterrichtsübungen können eingesetzt werden, um den Schüler*innen einen Vorgeschmack auf das Kapitel zu geben; vor der Präsentation des Kapitels sollen sie miteinander diskutieren.

Dauer	Aufgabe der Lehrkraft	Materialien	Aufgabe der Schüler*innen
2 min	Vorstellung des Themas	Kapitel 1 PowerPoint-Folie: 1 und 2	Zuhören

3 min	Besprechung der Unterrichtsübung 1.1	Kapitel 1 PowerPoint-Folie: 3 und 4	Offene Diskussion im Klassenverband/in Kleingruppen à 4 Personen.
2 min	Vorstellung Kapitel 1: *Das Energieproblem*	Kapitel 1 PowerPoint: Folie 5 und 6	Zuhören, Fragen stellen
5 min	Beginn der Besprechung von Unterrichtsübung 1.2	Kapitel 2 PowerPoint: Folie 14 und 15	Offene Diskussion im Klassenverband/in Kleingruppen à 4 Personen.
10 min	Lehrkraft und Schüler*innen tauschen die Rollen Nur die Folien zu den bekannten Themen aus Kapitel 2 sollen gezeigt werden. Die Schüler*innen sollen die Fusion im Inneren unserer Sonne erklären. Zuhören/Fragen stellen	Kapitel 2 PowerPoint-Folie: 7 bis 11	Die Schüler*innen sollen (kurz) das Thema und die Folien erklären
5 min	Präsentation Kapitel 2: *Fusion im Inneren unserer Sonne*: Fusionskriterien	Kapitel 2 PowerPoint-Folie: 12, 13, 16 und 17	Zuhören, Fragen stellen
5 min	Präsentation Kapitel 3: *Plasma* bis Unterrichtsübung	Kapitel 3 PowerPoint: Folie 18 bis 21	Zuhören, Fragen stellen
3 min	Besprechung Unterrichtsübung 1.3	Kapitel 3 PowerPoint: Folie 22 und 23	Offene Diskussion im Klassenverband
5 min	Präsentation Kapitel 3: *Plasma* nach Unterrichtsübung	Kapitel 3 PowerPoint: Folie 24 bis 27	Zuhören, Fragen stellen
5 min	Besprechung Unterrichtsübung 1.4	Kapitel 3 PowerPoint: Folie 28 und 29	Offene Diskussion im Klassenverband
15 min	Vorstellung Kapitel 4:	Kapitel 4 PowerPoint: Folie 30, 31, 36, 39 bis 45, sowie 48	Zuhören, Fragen stellen
Hausaufgaben	*Unterrichtsübung 1.5, 1.6 und 1.7*	*Kapitel 3 PowerPoint: Folie 32 bis 35, 37 und 38 und 46 und 47*	

Kapitel 6: Verwendung der PowerPoint-Präsentation und der anderen Materialien

Auf der Website https://fusenet.eu/education/material stehen (für jedes Modul) PowerPoint-Folien zur Verfügung.

Die PowerPoint umfasst das gesamte Modul, einschließlich der Unterrichtsübungen und Auflösungen, und ist für den Gebrauch im Unterricht bestimmt. Zur Vertiefung der Themen steht zusätzliches Bildmaterial zur Verfügung. In Kapitel 7 werden außerdem themenrelevante YouTube-Lehrvideos des Kanals *PhET Simulations* vorgestellt. Dort findet sich auch eine Übersicht des zusätzlichen Materials. Der Einsatz der PowerPoint-Präsentation kann thematisch an die Unterrichtsinhalte angepasst werden.

Zur Einführung in die verschiedenen Themen von Modul 1 kann den Schüler*innen pro Thema eine Vorbereitungsübung als Hausaufgabe gegeben werden. Dies könnten eine oder mehrere der zusätzlichen mit * markierten Übungen sein. Für die Vorbereitung kann auch einiges aus dem Bereich „Weitere Quellen für Unterricht und Freizeit“ verwendet werden.

Kapitel 7: Weiterführende Links für Unterricht und Freizeit als Ergänzung zu Modul 1

Für Lehrkräfte

Im Folgenden stellen wir Ihnen einige (englischsprachige) Websites vor. Sie können von Lehrkräften, die dieses Modul unterrichten, zur Wissensvertiefung und intensiveren Einarbeitung in die Thematik genutzt werden. Diese Ressourcen können auch im Unterricht eingesetzt werden, müssen dann aber an das Niveau der Schüler*innen angepasst werden. Einige Seiten behandeln die Themen aus dem vorliegenden Modul oder verwandte Themen. Auf manchen Seiten finden Sie außerdem Bildmaterial, Übungen (mit und ohne Auflösung) und ergänzende Unterrichtsskripte. Kurzbeschreibungen der Website-Inhalte stehen unter der jeweiligen URL:

a. FuseNet-Website - https://www.fusenet.eu/education/material
   Hier finden Sie die restlichen Module sowie Forschungsarbeiten, Kurse und Experimente aus Themenbereichen mit Bezug zu dieser Unterrichtsreihe.

b. MIT Open Course Ware - https://ocw.mit.edu/courses/simulations-applets-and-visualizations/#materials-science-and-engineering
   In der Website-Rubrik „Materials Science and Engineering“ gibt es Unterrichtsskripte, alte Prüfungen und Übungen zu Kernfusion und Kernspinresonanz.

c. EUROfusion - https://www.euro-fusion.org/ Auf dieser Website gibt es eine eigene Rubrik für Schüler*innen und Lehrkräfte. Dort finden Sie weiteres Basiswissen zu den einzelnen Themen sowie ein Q&A zum Thema Fusion. Außerdem gibt es dort Folien und PowerPoint-Präsentationen zur kostenlosen Nutzung. Die Website kann

ebenfalls von den Schüler*innen als Informationsquelle genutzt werden, aber hier sind die Information besser auf sie abgestimmt. Die Inhalte sind sowohl für ein durchschnittliches als auch für ein fortgeschrittenes Lernniveau geeignet.

d. Fusion for energy - https://fusionforenergy.europa.eu/
Diese Website bietet schöne Animationen zum Thema Fusion und den Grundlagen der Fusion, die die verschiedenen Themen von Modul 1 und auch das ITER-Projekt gut erklären. Allerdings verlangsamen diese Animationen die Website manchmal.

Für Lehrkräfte und Schüler*innen

Die im Folgenden aufgelisteten Seiten bieten Inhalte zur Vertiefung der Themen des ersten Moduls oder Möglichkeiten zur Wissenserweiterung. Einige können anstelle einer Präsentation oder als Ergänzung zur Präsentation eines oder mehrerer Kapitel verwendet werden. Alle *Phet*-Simulationen - für die keine Registrierung notwendig ist - sollten in Windows ausgeführt werden. Die zugehörigen Links sind in den entsprechenden Kapiteln aufgeführt. Kurzbeschreibungen der Website-Inhalte und Vorschläge stehen unter der jeweiligen URL:

Kapitel 1: Energie und ihre Bedeutung für die Welt

- Kurzgesagt - in a nutshell: Do we need nuclear energy to stop climate change?
https://www.youtube.com/watch?v=EhAemz1v7dQ
Dauer: 10 Minuten.
Der erste Teil des Videos kann als Einführung in das Modul verwendet werden, bis 2:49 oder 6:00 können Sie es als Einführung und Teil der Erklärung von Kapitel 1 verwenden.

Kapitel 2: Fusion im Inneren unserer Sonne

- *Simulation - Atome, Ionen und Ladung*
https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_en.html
Zum Einstieg kann *Phet Simulations* verwendet werden, um zu verstehen, wie die einzelnen Atome aufgebaut sind und wie sie heißen. Durch Hinzufügen von Elektronen/Protonen zu dem Modell lassen sich die Ionen und die Ladung bestimmen. Die Simulation ist sehr einfach und kann auch von durchschnittlichen Schülern verwendet werden.
- *Simulation - Verhältnis zwischen Druck, Volumen und Temperatur*
https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_en.html
Die erste „ideale“ Simulation veranschaulicht die Wechselwirkung von Druck und Temperatur. Die Parameter können während des Prozesses geändert werden. Für die Nutzung in diesem Modul bietet es sich an, das Volumen als Konstante festzulegen.

Kapitel 3: Plasma und elektrische Felder

- *Phet - Wirkung von Ladungen innerhalb eines Feldes*
https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html
Die Schüler*innen können eine oder mehrere Ladungen in einem Feld platzieren, woraufhin die elektrischen Feldlinien erscheinen. Wenn man weitere Ladungen hinzufügt, reagiert das Feld auf diese Änderungen.

- *Simulation – Hockey im elektrischen Feld*
  https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html
  Für Spaß im Unterricht: Das Hockeyspiel im elektrischen Feld hat drei Level. Es müssen Ladungen platziert werden, um den Puck ins Tor zu befördern.
- *Ted-ed - Solid, liquid, gas and … plasma* von Michale Murillo
- https://www.youtube.com/watch?v=tJplytSR-ww
  Dauer: 3:15
  Ein kurzes YouTube-Erklärvideo zum Thema Plasma. Sehr anschaulich. Mit ergänzenden Erklärungen der Lehrkraft für durchschnittliche Schüler sowie für fortgeschrittene Schüler geeignet.

  Kapitel 4: Konstruktion einer Fusionsmaschine
  - *Kurzgesagt - in a nutshell: Fusion power explained*
  https://www.youtube.com/watch?v=mZsaaturR6E
  Dauer: 6:15
  In diesem YouTube-Video werden die Prinzipien der Trägheitsfusion und des magnetischen Einschlusses erklärt. Bei einem kurzen Rundgang wird eine Fusionsmaschine gezeigt und deren Potenzial erläutert. Dies kann als kurze Zusammenfassung/Einführung für das gesamte Modul verwendet werden.
  - TSG Physics Lenz's law with copper pipe
  https://www.youtube.com/watch?v=N7tIi71-AjA
  Dauer: 1:39 Minuten
  Dieses YouTube-Video ohne Ton zeigt das Ergebnis der magnetischen Induktion beim Vergleich einer kleinen Eisenkugel und eines kugelförmigen Magneten beim Fall durch ein Kupferrohr. Nach dem Experiment wird das Ergebnis kurz erklärt.
  - Simon Lloyd- Demonstration der Lenz'schen Gesetzgebung mit einem Kupferrohr und einem Neodym-Magneten
  https://www.youtube.com/watch?v=nrkOZsECrZI
  Dauer: 2:40 Minuten
  Ein längeres YouTube-Video, das ebenfalls das Ergebnis der magnetischen Induktion zeigt. Das Prinzip wird hier ausführlicher erklärt, so dass sich das Video auch für durchschnittliche Schüler*innen eignet.

Anhang A: Tabelle mit Konstanten und Umrechnungsfaktoren

Größe	Grüße	Umrechnung in SI-Einheiten
Energie[1]	1 Kalorie	4,184 J
Energie[3]	1 t RÖE*	$4{,}2 * 10^{10}$ J
Energie[1]	1 kWh*	$3{,}6 * 10^{6}$ J
Masse[1]	1 Tonne	$1{,}0 * 10^{3}$ kg
Masse [1]	1 amu/u/ame	$1{,}66 * 10^{-27}$ kg
Temperatur[1]	0 °C	273,15 K
Druck[1]	1 bar	$1{,}0 * 10^{5}$ Pa

Tabelle A.1 Umrechnungsfaktoren

*diese Größen sollen die Schüler*innen in Übung A.2 kennenlernen

Größe	
Kerntemperatur der Sonne [2]	$1{,}571*10^{7}$ K
Oberflächentemperatur der Sonne[1]	5780 K
(Mittel) Dichte der Sonne[2]	1408 kg/m^3
Dichte des Kerns [2]	$1{,}622*10^{5}$ kg/m^3
Druck im Kern der Sonne[2]	$2{,}477*10^{11}$ bar
Oberflächentemperatur der Erde [1]	295 K
(Mittel) Dichte der Erde[2]	5514 kg/m^3
Masse eines Elektrons[1]	$9{,}109 *10^{-31}$ kg
Ladung eines Elektrons[1]	$1{,}602*10^{-19}$ C
Masse eines Protons[1]	$1{,}673*10^{-27}$ kg
Ladung eines Protons[1]	$1{,}602*10^{-19}$ C
Masse eines Neutrons[1]	$1{,}675*10^{-27}$ kg

Tabelle A.2 Konstanten

[1] Noordhoff uitgevers & NVON (2021). *Binas HAVO/VWO Informatieboek 6de editie (6e havo/vwo)* (01 ed.). Groningen, Nederland: Noordhoff Uitgevers.

[2] Sun Fact Sheet. (2018). Abgerufen am 13. Juli 2021 auf https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html

[3] IEA Einheitenumrechner und Glossar für geläufige Energieeinheiten. Von https://www.iea.org/reports/unit-converter-and-glossary.

Anhang B: Auflösung der Unterrichtübungen

Unterrichtsübung 1.1
Länderspezifische Antworten!

Allgemeine Informationen unter: https://ourworldindata.org/energy-mix
Länderspezifische Informationen unter: https://ourworldindata.org/energy#energy-country-profiles
Für Deutschland: https://ourworldindata.org/energy/country/germany#energy-mix

Neben dem Energiemix werden hier auch Informationen über die verschiedenen Energiequellen, den Fortschritt bei der Dekarbonisierung und den Energieverbrauch in hoher Datendichte vorgestellt.

Unterrichtsübung 1.2
Energiedichte, geordnet vom höchsten zum niedrigsten Wert
Deuterium – Uran – Kohle – Öl – Benzin – Ethanol – Holz – Wasserstoff (Gas)

Die Energiedichte von Deuterium hängt von den Reaktionsbedingungen ab. Die höchste Energiedichte herrscht allerdings in Fusionsreaktionen vor. Sie ist sogar größer als bei Spaltungsreaktionen. Bei einer Fusionsreaktion wird weniger Energie freigesetzt als bei einer Spaltung, weil spaltbare Atome viel größer sind als die kleinen Atome, die bei der Fusion verwendet werden. Allerdings ist die Energie pro Masseneinheit (pro Nukleon) bei der Fusion viel größer. Würde man also theoretisch eine bestimmte Menge Deuteriumkerne alle auf einmal verschmelzen lassen, würde mehr Energie freigesetzt werden als bei der Spaltung der gleichen Menge Urankerne. Die drei fossilen Brennstoffe (Kohle, Öl, Benzin) haben eine relativ ähnliche Energiedichte.
Die Maximalwerte wurden hier von den unten aufgeführten Zahlen übernommen:
Uran: 1 539 842 000 MJ/L[3]
Kohle: 34-42 MJ/L (Anthrazit), oder 26-49 MJ/L (bituminös)[4]
Öl: 37 MJ/L[5]
Benzin: 34,2 MJ/L[6]
Ethanol: 24 MJ/L[7]
Holz: 2,56-21,84 MJ/L[8]
Wasserstoff (Gas): 0,01005-0,01188 MJ/L[9]

Unterrichtsübung 1.3
Antwort B

Aufgrund von Rekombinationsreaktionen können freie Elektronen und Ionen zu einem neutralen Atom (Gasteilchen) rekombinieren. Dabei wird Licht emittiert. Je nach Art der Ionen sind verschiedene Rekombinationsreaktionen möglich. Da Ionen (und Atome) bestimmte Energieniveaus haben, unterscheiden sich ihre Phasenübergänge. Je nach Art der Teilchen hat also das Plasma eine andere Farbe. Aufgrund der Rekombination ist ein Plasma in der Regel instabil, da die Plasmateilchen zu neutralen (Gas-)Teilchen rekombinieren. Um das Plasma stabil zu halten, müssen die Gasteilchen ständig ionisiert werden. Wenn ein neu gebildetes neutrales Teilchen mit einem ionisierten Teilchen zusammenstößt, besteht die Möglichkeit, dass das neutrale Teilchen wieder ionisiert wird.
Zu Antwort A: Nicht alle Plasmen haben eine hohe Temperatur; es gibt auch kalte Plasmen. Erhitzung ist eine Methode zur Ionisierung von Gasen, aber es gibt noch weitere, die in diesem Modul nicht behandelt werden. Kalte Plasmen können trotzdem leuchten.
Zu Antwort C: Außer in Sternen finden in der Natur keine Kernreaktionen in Plasmen statt. Die meisten Kernreaktionen emittieren kein Licht, d.h. bei der D-D- oder D-T-Fusion werden keine Photonen freigesetzt.

Unterrichtsübung 1.4

---

[3] *Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density*
[4] *Quelle: ebenda*
[5] *Quelle: ebenda*
[6] *Quelle: ebenda*
[7] *Quelle: ebenda*
[8] *Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_content_of_biofuel)*
[9] *Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density*

a. Der Strom fließt aus dem Papier heraus
   Das Magnetfeld ist gegen den Uhrzeigersinn gekrümmt

Mithilfe der Rechtsschraubenregel lässt sich feststellen, dass das Magnetfeld gegen den Uhrzeigersinn um den Draht rotiert, wenn die Stromrichtung aus dem Papier heraus führt. Wenn die Stromrichtung in das Papier hinein führt, rotiert das Magnetfeld im Uhrzeigersinn um den Draht.

b. Die Richtung des Magnetfelds im Inneren der Schleife verläuft aus dem Papier **heraus**.
   Die Richtung des Magnetfelds im Innern der Schleife verläuft **in** das Papier **hinein**.

Wenn wir eine stromführende kreisförmige Drahtschleife gegen den Uhrzeigersinn ziehen, lässt sich anhand der Rechtsschraubenregel feststellen, dass das Magnetfeld innerhalb der Drahtschleife aus dem Papier heraus und das Magnetfeld außerhalb der Drahtschleife in das Papier hinein verläuft.

c. Weil beide Teilchen unterschiedlich geladen sind und sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen, ist die Ausrichtung des Magnetfelds für beide Teilchen gleich.

Wenn man die Kreisbahn des Elektrons auf Papier zeichnet und sich dieses Elektron im Uhrzeigersinn bewegt, dann verläuft das Magnetfeld innerhalb des Kreises aus dem Papier heraus und außerhalb des Kreises in das Papier hinein.
Wenn wir die Kreisbahn des Protons auf dem Papier zeichnen und sich dieses Proton gegen den Uhrzeigersinn bewegt, dann ist das Magnetfeld genau dasselbe wie beim Elektron. Das Magnetfeld innerhalb des Kreises verläuft aus dem Papier heraus, das Magnetfeld außerhalb des Kreises verläuft in das Papier hinein. Das liegt daran, dass das Proton anders geladen ist: Würden sich ein Elektron und ein Proton in dieselbe Richtung bewegen, würden sie entgegengesetzte Magnetfelder erzeugen. Wenn wir die Richtung und die Ladung umkehren, ergibt sich die gleiche Situation wie zuvor.
Die Richtungen sind genau dieselben wie bei der kreisförmigen Drahtschleife, die einen Strom führt, der ebenfalls gegen den Uhrzeigersinn fließt! Wenn die Stromrichtung mit der Bewegungsrichtung des Protons (eines positiven Teilchens) übereinstimmt, dann hat auch das Magnetfeld genau die gleiche Richtung. Schickt man einen Strom durch einen kreisförmigen Draht, passiert genau dasselbe wie wenn sich geladene Teilchen auf einer Kreisbahn bewegen. Daher haben die Magnetfelder die gleiche Richtung.

d. Das Magnetfeld verläuft immer lotrecht zur Stromrichtung

Das Magnetfeld verläuft immer lotrecht zur Bewegungsrichtung der Ladungen (und damit auch immer lotrecht zur Stromrichtung).

Unterrichtsübung 1.5

a. Fertige eine Skizze eines Torus mit einem langen großen Radius und einem kurzen kleinen Radius an. Wie sieht das aus?

Ein Donut

b. Skizziere nun einen Torus mit einem kurzen großen Radius und einem langen kleinen Radius. Warum ist dieser schwieriger zu zeichnen?

   Der Donut ähnelt einer Kugel. Der Kleine Radius kann nicht größer sein als der Hauptradius (sonst ist es kein Torus mehr!).

c) Was würde passieren, wenn du den großen Radius immer kleiner machst und den kleinen Radius groß lässt? Welche Form erhältst du dann?

Wenn man zulässt, dass der Kleine Radius den Hauptradius übersteigt, erhält man im Extremfall eine Kugel.

d) Betrachte nun die Seitenverhältnisse der beiden Skizzen von (a) und (b). Was passiert, wenn sich das Seitenverhältnis ändert?

Der Torus ändert seine Form.

e) Was ist das kleinstmögliche Seitenverhältnis für einen Torus?

Der Kleine Radius kann nicht größer sein als der Hauptradius. Wenn sie gleich sind, erhalten wir das kleinstmögliche Seitenverhältnis, nämlich 1.

Unterrichtsübung 1.6

A. Toroidaler Querschnitt:

B. Poloidaler Querschnitt:

C. 3D-Ansicht:

a. Ansicht von oben: ein runder Donut
   Längs durchgeschnitten: zwei Kreise
b. Die poloidale Richtung verläuft lotrecht zum poloidalen Querschnitt. Die toroidale Richtung verläuft lotrecht zum toroidalen Querschnitt.

Stelle einen Vergleich mit den Querschnitten eines Zylinders an: Wenn man einen Querschnitt entlang der z-Richtung (von oben nach unten) ausführt, erhält man eine rechteckige Fläche, die lotrecht zur z-Richtung verläuft. Führt man einen Querschnitt in der anderen Richtung aus (entweder poloidal oder radial, was in beiden Fällen zum gleichen Querschnitt führt), erhält man einen kreisförmigen Querschnitt in lotrechtem Verlauf zur poloidalen Richtung.

Die toroidalen Feldmagneten sind in poloidaler Richtung um den Torus gruppiert. Die Magneten bilden also Schleifen im poloidalen Querschnitt und somit eine Stromschleife in der poloidalen Richtung, die für ein Magnetfeld in der toroidalen Richtung sorgt: Deswegen nennt man sie toroidale Feldmagneten.

Unterrichtsübung 1.7

a. Toroidale Feldspulen liegen im poloidalen Querschnitt des Tokamaks

Die poloidal ausgerichteten Magneten erzeugen ein Magnetfeld, das lotrecht zum poloidalen Querschnitt, d.h. in der toroidalen Richtung, verläuft. Demzufolge erzeugen diese Magneten ein Magnetfeld in der toroidalen Richtung => toroidale Feldspulen (auch wenn diese in der poloidalen Fläche liegen).

b. Poloidale Feldspulen liegen an der Ober- und an der Unterseite des Torus. Der zentrale Solenoid befindet sich im Loch des Donuts.

Die poloidalen Feldspulen liegen in einem verschobenen toroidalen Querschnitt; allerdings verläuft das Magnetfeld in poloidaler Richtung. Der zentrale Solenoid befindet sich im Zentrum des Tokamaks und ist ein Solenoid.

Unterrichtsübung 1.8

a. Induktion hängt von der Ladung des magnetischen Flusses ab, doch kontinuierliche Änderungen sind aufgrund von Einschränkungen durch die Magneten nicht möglich. Deswegen wird der zentrale Solenoid gepulst betrieben.

Magnetische Induktion ist das Resultat einer Änderung des magnetischen Flusses. Änderungen des magnetischen Flusses sind nur begrenzt möglich. Man beginnt mit einer bestimmten Stromstärke, die bis zu einem gewissen Wert erhöht werden kann. Solange Steigerungen (oder Verminderungen) möglich sind, tritt Induktion auf und der Tokamak läuft weiter. Wenn sich der magnetische Fluss nicht weiterhin stetig ändern kann, hört die Induktion auf und das poloidale Feld verschwindet.

b. Im gepulsten Betrieb ist die Energiefreisetzung unterbrochen. Ein Fusionsreaktor soll aber permanent laufen. Daher ist ein gepulster Betrieb nicht ideal.

Anhang C: Auflösungen zu den Zusatzaufgaben **v.1.0**

Zusatzaufgabe A.1

a. Recherchiere das Äquivalent eines Joules in SI-Einheiten. Was drückt diese Einheit aus? Vergleiche sie mit den Einheiten für Geschwindigkeit (m/s) und Beschleunigung (m/s^2).

1 J = 1 kgm2/s^2 gibt an, wie viel Energie benötigt wird, um die Masse von 1 kg auf einer Strecke von 1 m mit 1 m/s^2 zu beschleunigen.

Dabei gilt:
Arbeit (definiert als Energie, die durch Krafteinwirkung entlang eines Weges auf ein Objekt oder von einem Objekt übertragen wird) = Kraft · Weg
Die entsprechende Formel lautet: N · m oder kgm/s^2 · m

1 Joule kann also auch als die Energie interpretiert werden, die sich aus der konstanten Einwirkung einer Kraft entlang einer bestimmten Strecke ergibt. Das Verhältnis von Energie, Geschwindigkeit und Beschleunigung ist daher:

Änderung der Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitraum = Beschleunigung
Beschleunigung x Masse = Kraft

b. [Multiple choice] Welche der folgenden Antworten entspricht ungefähr 1 Joule Energie?

D, alle oben genannten.

c. Wie hoch schätzt du den Gesamtenergieverbrauch auf der Welt ein? Recherchiere den Gesamtenergieverbrauch der Welt in Joule und vergleiche ihn mit deiner Schätzung. Hast du gut geschätzt?

Der gesamte (primäre) Energieverbrauch der Welt im Jahr 2021 wurde auf 595,15 Exajoule bzw. 595,15 × 10^{18} Joule geschätzt.[10]

Zusatzübung A.2

a. Woher hast du die Daten? Woher weißt du, ob diese Daten vertrauenswürdig sind? Erkläre, warum du dieser Information vertraust.

-

b. In welchen Einheiten sind die Daten angegeben?

-

c. Vergleiche die Einheiten Joule (J), Kilowattstunden (kWh) und Tonnen Rohöleinheiten (t RÖE). Wie viele Joule machen eine Kilowattstunde aus? Wie viele Joule entsprechen einer t RÖE? Wie viel Joule entsprechen einer Mt RÖE?

[10] Vgl. *BP Statistik des weltweiten Energieverbrauchs 2022 (S. 8)*

1 kWh = 3 600 000 Joule; 1 t RÖE = 41,868 × 10^9 Joule (beziehungsweise 41.868 GJ); 1 Mt RÖE = 41,868 × 10^{15} Joule oder 41,868 PJ.

d. Was ist Primärenergie?

Energie in der Form, in der sie in einer statistischen Energiebilanz zuerst verbucht wird, bevor eine Umwandlung in sekundäre oder tertiäre Energieformen erfolgt. Zum Beispiel kann Kohle in synthetisches Gas umgewandelt werden, das wiederum in Elektrizität umgewandelt werden kann; in diesem Beispiel ist Kohle Primärenergie, synthetisches Gas ist Sekundärenergie und Elektrizität ist Tertiärenergie.[11]

Primärenergie ist also eine Energieform, die in der Natur vorkommt und die noch keinem von Menschen durchgeführten Umwandlungsprozess unterzogen wurde. Das heißt, es handelt sich um die Energie natürlicher Brennstoffe, die vom Menschen nicht verändert oder umgewandelt wurden. Beispiele hierfür sind Kohle, Erdgas und natürliches Uran. Diese können dann in sekundäre Energie umgewandelt werden, indem sie in einen besser nutzbaren Energieträger umgewandelt werden, wie z. B. Benzin, das aus Erdöl gewonnen wird. Wenn das Benzin zur Erzeugung von Elektrizität verwendet wird, handelt es sich bei der Elektrizität um Tertiärenergie. Die Primärenergie wird häufig zur Berechnung des gesamten Primärenergiebedarfs (PEV) eines Landes verwendet, der ein gängiges Maß für den Vergleich von Ländern auf der Grundlage ihrer Energieressourcen ist.

e. In den meisten Ländern dominieren die sogenannten **fossilen Brennstoffe** die Energieversorgung. Vergleiche einige Länder miteinander: Welchen prozentualen Anteil machen jeweils regenerative Energiequellen wie Sonnen- und Windenergie aus?

Das hängt vom jeweiligen Land ab. In fast allen Ländern dominieren die fossilen Brennstoffe noch immer den Energiemix.

f. Wird ein großer Teil des Energiemixes aus nachhaltigen Quellen gewonnen? Wie steht es mit regenerativen Quellen?

Der Begriff „nachhaltig“ wird unterschiedlich ausgelegt. Neben regenerativen Energieformen werden häufig auch die Kernspaltung oder Biokraftstoffe in diese Kategorie eingeordnet, wobei dies von Vorschriften und der jeweiligen Definition abhängt. Deswegen wird der Anteil der nachhaltigen Energiequellen oft größer angegeben als der Anteil der erneuerbaren Energien. Einige Länder nutzen viel Kernenergie und haben daher geringere CO2-Emissionen als Länder, die einen größeren Anteil an Sonnen- und Windenergie nutzen, aber immer noch stark auf fossile Brennstoffe angewiesen sind. Die Gesellschaft bestimmt, was akzeptabel ist und was als wirklich nachhaltig angesehen wird.

Zusatzaufgabe A.3

Hinweis: *Da das Hauptziel dieser Übung darin besteht, ein Gefühl für den Energieverbrauch zu bekommen, sind die nachstehend gegebenen Antworten nicht exakt. Es gibt viele verschiedene (manchmal sogar widersprüchliche) Quellen für Energiewerte in großen Maßstäben, weil es schwierig ist, Energie auf einer solchen Ebene zu messen. So kommt man möglicherweise zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Solange aber der Lösungsweg plausibel ist, wäre die Antwort auch*

[11] Vgl.: *U.S. Energy Information Administration, https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=Primary%20energy).*

dann noch in Ordnung, wenn man eine falsche Zahl mit einem richtigen Wert vertauscht. Es kommt also auf die Argumentation und nicht auf die genauen Zahlen an.

a. Schätze die verbrauchte Energie in Joule für einen Haushalt, eine Stadt, ein Land und die Welt.

Daten von: *ODYSSEE-MURE, Our World in Data* und University of Ontario. Der durchschnittliche Energieverbrauch pro Wohnung (d. h. Haus/Haushalt) variiert je nach europäischem Land.[12]

Im Jahr 2019 wurden in Europa durchschnittlich 1,3 t RÖE/Wohnung verbraucht.
Das entspricht 1,3 t RÖE/Wohnung × 41,868 GJ/t RÖE = 54,4 GJ/Wohnung.
Im Durchschnitt verbraucht ein Haushalt in Europa also schätzungsweise 54,4 GJ/Jahr.

Weil europäische Städte sich in ihrer Größe und ihrem Verbrauch unterscheiden, ist es schwierig, einen Durchschnittswert für eine Stadt in Europa zu ermitteln. Man kann jedoch eine grobe Schätzung vornehmen, indem man den berechneten Durchschnittswert pro Haushalt auf eine bestimmte Stadt und die dortige Anzahl der Haushalte anwendet.
Nehmen wir als Beispiel die Stadt Berlin mit fast 2 Millionen Haushalten[13], so erhalten wir:
54,4 GJ/Jahr × 2 000 000 = 54,4 × 1015 Joule, also etwas mehr als 1 Mt RÖE.

Vergleicht man dies mit einem online angegebenen Wert von 263,2 PJ = 263,2 × 1015 Joule[14], weicht der geschätzte Wert etwa um das Fünffache ab. Wenn man bedenkt, dass Deutschland im Jahr 2021 einen Energieverbrauch von etwa 286 Mt RÖE hatte[15] und dass Berlin eine der größten Städte in Deutschland ist und es etwa 2000 Städte in Deutschland gibt, scheint die Schätzung angemessen zu sein.

Schließlich wird der Energieverbrauch der gesamten Welt auf 580 Millionen Terajoule geschätzt. Das sind 580 Millionen Billionen Joule oder etwa 13865 Millionen Tonnen Öleinheiten (Mt RÖE).

b. Schätze den Gesamtenergieverbrauch der Industrie und den Gesamtenergieverbrauch der Einzelpersonen auf diesem Planeten.

In der verwendeten Datenquelle[16] ist die Energie auf die fünf Sektoren Verkehr, Industrie, Haushalte, gewerbliche und öffentliche Dienstleistungen und Sonstige aufgeteilt. So wird ersichtlich, welcher Anteil am Gesamtenergieverbrauch auf die verschiedenen Sektoren entfällt. Da hier sowohl Haushalte als auch Industrie enthalten sind, können wir diese Bereiche leicht miteinander vergleichen. Auf der Grundlage der Daten aus dem Jahr 2017 ergeben sich für Europa die folgenden Zahlen:

- Kommerzielle und öffentliche Dienstleistungen: 154 Mt RÖE
- Haushalte: 288 Mt RÖE
- Industrie: 261 Mt RÖE
- Verkehr: 326,9 Mt RÖE

---

[12] Quelle: https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/average-energy-consumption-dwelling.html).
[13] Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Demographics_of_Berlin.
[14] Quelle: https://www.cleanenergywire.org/factsheets/energy-use-city-berlin
[15] Quelle: https://www.enerdata.net/estore/energy-market/germany
[16] *Quelle: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/final-energy-consumption-by-sector-10/assessment (Hinweis: Die neueste Version enthält keine sektorspezifischen Daten mehr, daher verwenden wir eine archivierte Version).*

- Andere: 30,1 Mt RÖE

Das ergibt eine Gesamtsumme von 1060 Mt RÖE im Jahr 2017 für Europa (Anmerkung: Dies ist der Endenergieverbrauch, nicht der Primärenergieverbrauch: 1060 Mt RÖE scheinen wenig im Vergleich zu den 286 Mt RÖE, die wir in der vorherigen Frage für Deutschland allein gefunden haben - was wiederum zeigt, wie sehr die Zahlen variieren. Es ist nicht immer klar, wie die Abweichung zustandekommen. Sie könnte zum Beispiel darauf zurückzuführen sein, dass einmal die Endenergie und einmal die Primärenergie betrachtet wurde.) Wenn man den Energieverbrauch von Einzelpersonen hauptsächlich am Verbrauch der Haushalte festmacht (und den Verkehr vernachlässigen, da Gewerbe/Industrie das höchste Verkehrsaufkommen verursachen), ergibt sich: 288/1060 × 100 = 27 %. Verfährt man mit der Industrie ebenso, ergibt sich: 261/1060 x 100 = 25%. Dies hängt allerdings stark von der jeweiligen Definition des individuellen Energieverbrauchs und des Energieverbrauchs der Industrie ab, d.h. die Zahlen können sehr unterschiedliche Dinge aussagen.

Versuche eine Quelle für die beiden vorherigen Fragen a und b zu finden.

c. Welche Quellen hast du genutzt?

Alle verwendeten Quellen sind in den obigen Antworten angegeben.

d. Stimmt sie mit den gegebenen Antworten überein?

Bei den Antworten wurde möglichst auf Plausibilität geachtet, zum Beispiel beim Vergleich der Werte für den Verbrauch der Stadt Berlin anhand des durchschnittlichen Haushaltsverbrauchs und der online gefundenen Zahl. Da wir hier mit groben Schätzungen arbeiten, können Antworten, die bis zu einem Faktor von ^{10} voneinander abweichen, als ausgesprochen plausibel gelten. Weichen die Antworten um wesentlich größere Faktoren voneinander ab, stimmen entweder die Daten aufgrund falscher Definitionen nicht überein oder bei der Berechnung wurden Fehler gemacht beziehungsweise Dinge übersehen.

e. Was fällt dir auf?

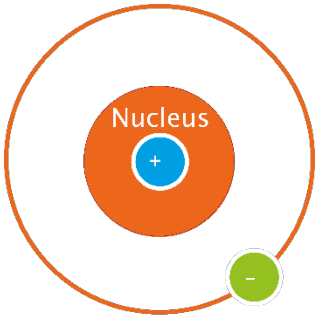
Die Übung macht deutlich, dass es sehr schwierig ist, den Energieverbrauch der Welt oder sogar nur eines einzelnen Landes oder einer einzelnen Stadt zu ermitteln. Die Probleme ergeben sich aus dem durchschnittlichen Charakter der Berechnung, wobei einige Haushalte viel mehr verbrauchen als andere und einige Städte größer sind oder mehr verbrauchen als andere. Den Verbrauch auf allen Ebenen (also für alle verschiedenen Arten von Brennstoffen/Quellen) zu ermitteln ist sehr schwierig und wird noch schwieriger, je mehr man die Betrachtung erweitert. Es könnte sein, dass einige Länder ihren Energieverbrauch anders erfassen, andere Berechnungen oder Ausnahmen verwenden. Daher wird es in der Berichterstattung oder im Journalismus immer viele verschiedene Zahlen geben, von denen einige sehr zutreffend, andere dagegen weniger genau sein können. Die Verwendung zuverlässiger Quellen ist am besten, aber manchmal schwierig, wenn man nach sehr spezifischen Daten sucht. Angesichts der großen Menge an Daten, die online zu finden sind, kann es sehr schwierig sein, zu wissen, welchen Daten man vertrauen kann. Wenn Sie unsicher sind, sollte man versuchen, Daten von vertrauenswürdigen Einrichtungen wie etwa Staatsregierungen oder europäischen Organisationen zu finden.

Zusatzaufgabe A.4

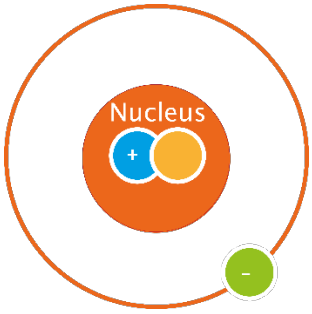
a. Welche Art von Atom ist in Abbildung 4 des Lehrbuchs für Schüler*innen dargestellt? Finde heraus, wofür dieses Isotop verwendet wird.

Beryllium. Beryllium wird in vielen verschiedenen Bereichen eingesetzt, z. B. in Röntgenröhren, die als Strahlungsfenster verwendet werden, aber auch wegen seines geringen Gewichts in vielen Bauteilen, z. B. in der Luft- und Raumfahrt. Dieses Material spielt eine sehr wichtige Rolle in der Kerntechnik! Es wird als Neutronenreflektor bei der Kernspaltung verwendet und wird künftig in Fusionsreaktoren als Material für Komponenten der ersten Wand eine bedeutende Funktion haben.

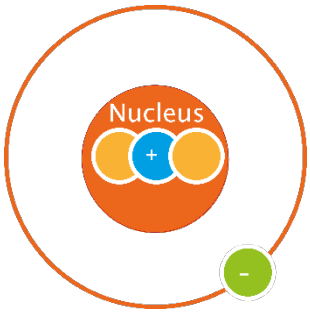
b. Fertige analog zu Abbildung 4 eine schematische Zeichnung eines Wasserstoffatoms an.



c. Fertige analog zu Abbildung 4 eine schematische Zeichnung eines Deuteriumatoms an.



d. Fertige analog zu Abbildung 4 eine schematische Zeichnung eines Tritiumatoms an.



Zusatzübung A.5

Energieskalen: Vergleiche den Energiegehalt eines Mars-Riegels mit den folgenden Energiequellen: Benzinverbrennung, Kohlekraft, Kernspaltung und Kernfusion. Tipp: Bestimme zunächst die Größenverhältnisse zwischen Kalorien, Kcal und Joule.

Die Einheiten Kalorien und kcal werden oft synonym verwendet, aber sie sind nicht dasselbe! 1 kcal = 4184 Joule. Ein Mars-Riegel wiegt 51 Gramm und hat laut Verpackung einen Energiegehalt von 450 kcal/100 g. Daraus lässt sich der Energiegehalt eines Mars-Riegels wie folgt berechnen: 450 kCal/100 g x 51 Gramm/Mars = 229,5 kCal/Mars. Also 230 kcal pro Mars-Riegel. Kcal ist eine Einheit für Energie und kann demnach in Joule oder Wattstunden umgerechnet werden (1000 Wh = 1 kWh). Wenn wir ein kcal in Wh oder Joule umrechnen, erhalten wir: 1 kcal = 1,162222 Wh = 4184 Joule.

Die Berechnung des Energiegehalts eines Mars-Riegels in verschiedenen Einheiten ergibt dann: 230 kcal/Mars = 962 320 Joule/Mars = 267,31106 Wh/Mars. Wenn wir die Energiedichte eines Mars berechnen, wollen wir den Energiegehalt Joule/kg wissen: (962 320 Joule/Mars) / (51 x 10-3 kg/Mars) = 18,87 MJ/kg. Nun wollen wir diesen Wert mit dem Energiegehalt von Benzin, Kohle und den Brennstoffen für Kernspaltung und Kernfusion vergleichen, wobei wir Uran als Spaltmaterial und D-T als Fusionsmaterial verwenden. Auf Wikipedia[17] sind die Energiedichten wie folgt angegeben:
- Benzin: 46,4 MJ/kg
- Kohle: 26-33 MJ/kg
- Uran: 83 620 000 MJ/kg
- Deuterium-Tritium-Fusion: 337 387 388 MJ/kg
- Mars-Riegel:18,87 MJ/kg

Man sieht hier, dass in einem Mars-Riegel eine ganze Menge Energie steckt. Da wir diese Energie jedoch nicht einfach freisetzen können, ist er natürlich keine brauchbare Energiequelle. Im menschlichen Körper laufen viele chemische Prozesse ab, um die Energie aus ihm zu gewinnen, während Benzin oder Kohle zur Energiefreisetzung einfach verbrannt werden können. Uran und D-T haben eine viel höhere Energiedichte als der Mars-Riegel oder die fossilen Brennstoffe, da in Kernreaktionen viel mehr Energie steckt als in chemischen Reaktionen. Die Brennstoffe für die Kernfusion haben eine höhere Energiedichte als die Kernspaltung (wobei zu beachten ist, dass Uran sehr schwer ist - ein Kilogramm Uran ist also nicht sehr viel Brennstoff, während ein Fusionsreaktor mit wenigen Gramm Brennstoff auskommt.)

Zusatzübung A.6

a. Schlage die Begriffe „Fusion“ und „Spaltung“ im Duden nach und beschreibe den Unterschied zwischen Fusion und Spaltung auf atomarer Ebene.

Fusion, auch Kernfusion
Verschmelzung zweier leichter Atomkerne zu einem schweren, wobei Energie frei wird

Spaltung, auch Kernspaltung
(besonders durch äußere Einwirkung, z. B. durch schnelle Neutronen, durch energiereiche Gammastrahlen, [künstlich] verursachte) Zerlegung von Atomkernen unter Freisetzung extrem hoher Energiemengen

Der Unterschied liegt in der Vereinigung zweier Kerne zu einem schwereren im Gegensatz zur Spaltung eines (schweren) Kerns in zwei kleinere Teile. Daher sind auch die Bezeichnungen sinnvoll: Bei der Fusion wird etwas zusammengefügt, bei der Spaltung gespalten.

b. Versuche anhand der Bindungsenergie zu beschreiben, warum schwerere Atomkerne instabiler sind.

[17] *Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density#List_of_material_energy_densities*

Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen, aber die Masse eines Kerns ist immer kleiner als die Summe der Einzelmassen der Protonen und Neutronen. Die Differenz ist ein Maß für die Kernbindungsenergie, die den Kern zusammenhält. Die Bindungsenergie lässt sich anhand der Gleichung $E = mc^2$ berechnen, die für die nukleare Bindungsenergie wie folgt lautet: nukleare Bindungsenergie = Δmc^2, wobei Δm die Massendifferenz (oder den Massendefekt) darstellt und c^2 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zum Quadrat ist.[18]

In einem Atomkern wirken im Wesentlichen zwei Kräfte: die elektrische Abstoßung zwischen Teilchen mit gleicher Ladung (elektromagnetische Kraft), die bewirkt, dass sich Protonen gegenseitig abstoßen, und die starke Kernkraft, die, wie der Name schon sagt, sehr stark ist. Die elektromagnetische Kraft wird schwächer, je weiter die Teilchen voneinander entfernt sind, aber selbst bei für Protonen großen Entfernungen spüren sie ein anderes Teilchen und stoßen sich gegenseitig ab. Die starke Kernkraft wirkt nur bei sehr geringen Abständen: Wenn Protonen oder Neutronen sehr nahe beieinander sind, wirkt eine sehr starke Anziehungskraft, die sie eng zusammendrängt. Da die starke Kernkraft viel stärker ist als die elektrische Kraft (bei sehr geringen Abständen!), können Atomkerne existieren. Hinzu kommt, dass zwei Protonen sich gegenseitig abstoßen, aber wenn wir ein Neutron dazwischen schalten (also Proton-Neutron-Proton), ist die Abstoßung etwas geringer. Die starke Kraft zwischen Protonen und Neutronen ist die gleiche wie zwischen Protonen und Protonen oder Neutronen und Neutronen, aber die Neutronen lassen etwas mehr Platz zwischen den Protonen, d. h. man kann sagen, dass sie wie eine Art „Klebstoff" wirken. Je schwerer die Kerne werden, desto mehr Protonen haben wir und desto mehr Neutronen brauchen wir, da die Kernkraft über größere Entfernungen schnell schwächer wird.[19]

(Anmerkung: Protonen und Neutronen werden als Nukleonen bezeichnet, ein Kern besteht also aus Nukleonen.)

Die Nettobindungsenergie eines Atomkerns ist definiert als die atomare Anziehung abzüglich der Störenergie der elektrischen Kraft. Je schwerer die Kerne werden, desto langsamer wächst ihre Nettobindungsenergie pro Nukleon, bis sie bei Eisen ihren Höhepunkt erreicht. Wenn weitere Nukleonen hinzukommen, nimmt die gesamte Bindungsenergie der Kerne immer weiter zu (da jedes Nukleon die anderen anzieht), aber auch die gesamte Störenergie der elektrischen Kräfte nimmt zu. Bei den Elementen, die schwerer als Eisen sind, überwiegen die elektrischen Kräfte die Kernkräfte. Infolgedessen werden die schwereren Elemente instabiler.[20]

c. Betrachte den Graph: An welchem Punkt würde statt einer Fusion eine Spaltung stattfinden? Kannst du erklären warum das passiert?

Der Wechsel würde am höchsten Punkt der Kurve stattfinden, bei dem Element Eisen-56. Wenn leichtere Elemente bis zum Element Eisen-56 Energie miteinander verschmelzen, wird Energie freigesetzt, und wenn sich schwerere Elemente in leichtere aufspalten, wird Energie freigesetzt.

d. Welches Material würdest du aufgrund dieses Graphs in großen Mengen in sehr alten Sternen vermuten?

---

[18] *Quelle: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/nucbin.html.*
[19] *Vgl.: https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron%E2%80%93proton_ratio.*
[20] *Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_binding_energy.*

Eisen! Im Kern eines Sterns findet eine Fusion statt, die mit Protonen/Wasserstoff beginnt und schließlich mit schwereren Elementen fortgesetzt wird, wenn die leichten Elemente alle zu schwereren verschmolzen sind. Nach Eisen kann der Prozess nicht mehr weitergehen, und Eisen ist ein sehr stabiles Molekül. Aus diesem Grund sammelt sich Eisen im Kern sehr alter Sterne an.

Zusatzübung **A.7**

a. Berechne die durch den Massendefekt freigesetzte Energie mit der Einsteinschen Formel für eine D-T-Fusionsreaktion.

Diese Berechnungen können durchgeführt werden, indem man zunächst die Masse von u in kg umrechnet, dann $E=mc^2$ verwendet, um die Energie des Massendefekts in Joule zu erhalten, und dann diese Energie von Joule in MeV umrechnet. Der Einfachheit halber kann man sich jedoch auch den Umstand zunutze machen, dass die Masse in der Kernphysik manchmal bereits in Energieeinheiten angegeben wird.

Betrachten wir zunächst die D-T-Reaktion: D + T → α + n + Energie (17,6 MeV). Das Gewicht der einzelnen Komponenten wird in atomaren Masseneinheiten (u) angegeben.

Man kann die Masse eines Teilchens auch in Energieeinheiten angeben, und zwar mit der Formel MeV/c2, einer Umformulierung von $E=mc^2$. Damit gilt $m = E/c^2$.

Wir können also die Masse eines Teilchens auch durch seine Energie ausdrücken, indem wir die Einsteinsche Formel verwenden (oft wird der $/c^2$-Teil nicht einmal in der Einheit geschrieben). Da dies eine in der Kernphysik häufig verwendete Einheit ist, haben wir einen einfachen Umrechnungsfaktor: 1 u = 931,49410242 MeV/c^2.[21]

Betrachten wir nun die einzelnen Komponenten der Reaktion:

Die Masse eines Deuteriumatoms beträgt 2,01410177785 u, davon müssen wir aber die Masse des Elektrons abziehen, da die Reaktion nur zwischen den Kernen stattfindet: (2,01410177785 u - 0,000548579909 u) × 931,49410242 MeV/c2 = 1875,61 MeV. Für Tritium erhalten wir analog: (3,01604928 u - 0.000548579909 u) × 931.49410242 MeV/c^2 = 2808.92 MeV.

Wenn wir diese Berechnung für alle Komponenten der Reaktion durchführen, erhalten wir:

Vorher	
Deuterium-Atomkern	*1875,61 MeV*
Tritium-Atomkern	*2808,92 MeV*
Gesamtenergie vor der Reaktion	*4684,53 MeV*
Nachher	
Alphateilchen	*3727,38 MeV*
Neutron	*939,57 MeV*
Gesamtenergie nach der Reaktion	*4666,95 MeV*
Energiefreisetzung bei der Reaktion	*4684,53 – 4666,95 = 17,6 MeV*

Daraus ergibt sich, dass die 17,6 MeV bei der Reaktion freigesetzt werden.

b. Berechne die durch den Massendefekt freigesetzte Energie mit der Einsteinschen Formel für eine Kernspaltungsreaktion von Uran-235.

[21] *Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Dalton_(unit))*

Bei Uran-235 ist es etwas schwieriger, da dieses in viele verschiedene Reaktionsprodukte zerfallen kann. Je nach Reaktionsprodukt kann die freigesetzte Energie variieren, im Durchschnitt beträgt die Ausbeute jedoch 215 MeV. Nehmen wir die natürliche Zerfallsreaktion von U-235:

U-235 → Th-231 + α

Ein Uran-235-Kern zerfällt also spontan in einen Thorium-231-Kern und ein Alphateilchen. Man beachte, dass wir jetzt nicht 1, sondern 92 Elektronen abziehen müssen, um die Kernmasse anstelle der Atommasse zu erhalten! Also ist die Atommasse von U-235 = 235,0439299 u, und somit:

235,0439299 u - (92 × 0,000548579909 u) = 234,993460548 u,

234.993460548 u × 931.49410242 MeV/c2 = 218895.022608 MeV.

Die gleiche Berechnung für Thorium ergibt: 231,03630 u - (90 × 0,000548579909 u) = 230,986927808 u,

230.986927808 u × 931.49410242 MeV/c2 = 215162.960989 MeV.

Vorher	
Uran-Atomkern	*218895,02 MeV*
Gesamtenergie vor der Reaktion	*218895,02 MeV*
Nachher	
Alphateilchen	*3727,38 MeV*
Thorium-231 Atomkern	*215162,96 MeV*
Gesamtenergie nach der Reaktion	*218890,34 MeV*
Energiefreisetzung bei der Reaktion	*218895,02 – 218890,34 = 4,68 MeV*

Zusatzübung A.8

Wenn man die Temperatur im Kern der Sonne, die Temperatur an der Oberfläche der Sonne und die Dichte der Sonne mit der Temperatur und Dichte in einem Fusionsreaktor auf der Erde vergleicht, warum ist dann die erforderliche Temperatur in einem Fusionsreaktor auf der Erde viel höher?

Damit es zur Fusion kommt, sind drei Dinge von Bedeutung: die richtige Teilchendichte, die richtige Teilchentemperatur und ein guter Einschluss der Teilchen. Die Kombination aus Dichte und Temperatur muss stimmen, damit die Teilchen im Durchschnitt die besten Chancen haben, zu verschmelzen. Die Zeit des Einschlusses ist wichtig, denn wir wollen, dass die Fusion kontinuierlich stattfindet. In der Sonne ist der Einschluss im Kern aufgrund der Schwerkraft hervorragend. Dieser Einschluss ist viel besser als das, was wir auf der Erde mit Magneten erzeugen können. Gleichzeitig ist die Dichte der Sonne im Durchschnitt nicht sehr hoch: etwa 1,4 g/cm^3, während die Erde eine durchschnittliche Dichte von etwa 5,5 g/cm^3 hat. Im Kern der Sonne ist die Dichte jedoch sehr viel höher: Sie wird auf etwa 160 g/cm^3 geschätzt. Die Dichte in der Sonne ist also ziemlich hoch, viel höher als in unseren Fusionsreaktoren (die ein paar Gramm Brennstoff enthalten, während z. B. ITER ein Volumen von 830 m^3 haben wird). In Bezug auf Dichte und Einschluss übertrifft die Sonne die Erde also leicht.

Allerdings beträgt die Temperatur im Kern der Sonne etwa 15 Millionen Grad Celsius, während die Oberfläche nur etwa 6000 Grad Celsius hat. Daran lässt sich leicht erkennen, dass an der Oberfläche der Sonne keine Fusion stattfindet, da die Temperatur viel zu niedrig ist und die Dichte ebenfalls gering ist. Im Kern hingegen bietet die Kombination aus hoher Dichte, hoher Temperatur und gutem Einschluss hervorragende Bedingungen für Fusionsreaktionen. Wenn man also auf der Erde eine Fusion erzeugen möchte, muss die Temperatur sogar noch höher sein als auf der Sonne, um unsere

„schlechtere" Dichte und den Einschluss zu kompensieren (man bedenke, dass wir Wasserstoffgas verwenden und die Dichte eines solchen Gases bei Raumtemperatur 0,0899 g/cm3 beträgt, was viel niedriger ist als die Dichte in der Sonne; man bedenke ebenso, dass das Erhitzen eines Gases auch zu einer Ausdehnung führt! Wir injizieren sehr wenig Gas, erhitzen es dann und das Plasma füllt dann das gesamte Volumen unseres Reaktors aus). Um eine gute Chance auf Fusion in unseren Reaktoren zu haben, haben wir also ein anderes Optimum, das bei etwa 150 Millionen Grad Celsius liegt, also etwa zehnmal höher als im Kern der Sonne.

Zusatzübung A.9

Ein bekanntes Beispiel für eine Anwendung von Plasmen im Alltag sind Plasmafernseher beziehungsweise Plasmabildschirme. Was haben diese „Plasma"-Objekte mit einem physikalischen Plasma zu tun, wie es in Kapitel 3 beschrieben ist? Recherchiere im Internet, wie Plasmafernseher funktionieren und was der Unterschied zwischen einem physikalischen Plasma und Plasmafernsehern oder Plasmabildschirmen ist.

Ein Plasmafernseher besteht aus einem Raster aus roten, grünen und blauen Pixeln, genau wie LCD-Bildschirme. Aber bei einem Plasmafernseher ist jede Pixelzelle mit einem Gas gefüllt, das durch zwei Hochspannungselektroden zu einem Plasma ionisiert werden kann. Das Gas beginnt dann, ultraviolettes Licht zu emittieren (das nicht sichtbar ist!). Da das Pixel mit einer Substanz beschichtet ist, die das ultraviolette Licht absorbiert und dann Licht einer bestimmten Farbe (rot, grün oder blau) aussendet, leuchtet das Pixel auf, wenn eine Hochspannung an die Elektroden der Pixelzelle angelegt wird.

Der Unterschied zwischen einem Fusionsplasma und dem Plasma in einem Plasmafernseher liegt im Wesentlichen in den Bedingungen des Plasmas. In Ihrem Fernseher findet keine Fusionsreaktion statt, sondern es tritt nur eine hohe Spannung auf, die zur Ionisierung und Emission von Licht führt, das dann in die richtige Pixelfarbe umgewandelt wird. Dabei ist wichtig zu wissen, dass es viele verschiedene Arten von Plasma gibt, bei niedrigen Temperaturen, geringer Dichte, hohen Temperaturen, hoher Dichte usw. Plasma ist ein sehr vielseitiger Aggregatzustand. [22]

Zusatzübung A.10

a. Normalerweise leuchten Plasmen. Aber warum? Erkläre.

Wenn etwas leuchtet, strahlt es Licht aus. Atome haben verschiedene Energieniveaus, die von ihren Elektronen eingenommen werden können. Wenn ein Elektron auf ein höheres Energieniveau angeregt wird, gerät das Atom in einen angeregten Zustand. Das Elektron kann dann auf ein niedrigeres Niveau zurückfallen, wobei Energie in Form von Photonen freigesetzt wird: Licht. Die Farbe des Lichts hängt von der Energie und damit von der Differenz zwischen dem angeregten Energieniveau und dem Niveau, auf das das Elektron zurückfällt, ab. Je nachdem, wie ein Atom angeregt wird, kann das Elektron auf verschiedene Niveaus gehen und auf verschiedene Niveaus zurückfallen, was zu einem Farbspektrum führt, das von einem bestimmten Element angeregt werden kann.[23]*Die Energieniveaus für ein bestimmtes Element sind immer gleich, d. h. Wasserstoffatome haben immer die gleichen Energieniveaus und werden daher immer die gleichen Lichtfarben aussenden. Gleichzeitig geben diese Energieniveaus auch vor, welche Sprünge das*

[22] Vgl.: *https://www.explainthatstuff.com/plasmatv.html.*

[23] *Vgl. zum Beispiel das Emissionsspektrum von Wasserstoff: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_spectral_series.*

Elektron nach oben machen kann: Wenn man Wasserstoff mit einem Laser beleuchtet (Licht einer bestimmten Wellenlänge, d. h. Photonen mit der gleichen Energie) und der Laser auf einen Sprung in den Energieniveaus abgestimmt ist, dann kann man gezielt einen bestimmten Übergang in einem Atom anregen. Die Anregung von Elektronen auf höhere Niveaus kann aber auch erfolgen, wenn ein schnelles Teilchen mit einem Atom zusammenstößt und einen Teil seiner Energie auf dieses überträgt. Wenn das Teilchen schnell genug ist, kann es das Atom sogar ionisieren. Das bedeutet, dass ein Elektron nicht nur angeregt, sondern ganz aus dem Atom herausgeschlagen wird, wodurch ein Ion und ein freies Elektron entstehen.

Um ein Plasma zu erhalten, müssen wir Teilchen ionisieren. In einem Plasma gibt es also immer Teilchen, die Ionen und freie Elektronen erzeugen können. Aber nicht alle Zusammenstöße führen zur Ionisierung. Einige Teilchen sind etwas langsamer und regen die Atome nur an. Nach dieser Stoßanregung kann das Atom Licht aussenden, um die Energie loszuwerden, und das Elektron fällt in einen niedrigeren Zustand zurück. Dies geschieht ständig in einem Plasma, und daher rührt auch das Leuchten in einem typischen Plasma.

b. Wenn ein Plasma vollständig ionisiert ist, leuchtet es dann noch? Erläutere deine Antwort.

Wenn wir ein Plasma so erhitzen, dass alle Teilchen vollständig ionisiert sind, kann diese Anregung nicht mehr stattfinden. In einem Fusionsplasma, in dem das Kernplasma vollständig ionisiert ist, wird es also kein Licht geben! Aber in der Nähe der Wand, wo die ionisierten Teilchen mit den Metallwänden zusammenstoßen und sich wieder zu Atomen verbinden, gibt es einige Atome, die nicht ionisiert, sondern angeregt werden. Diese emittieren dann Licht. Das erklärt, warum in einem Fusionsreaktor nur (sichtbares) Licht im Bodenbereich des Reaktors zu sehen ist, wo das Plasma normalerweise auf die Wand trifft.

Zusatzübung A.11

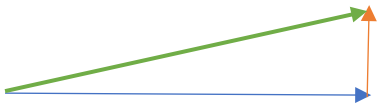
Schauen wir uns an, wie sich ein toroidales Magnetfeld zusammen mit einem poloidalen Magnetfeld zu einem spiralförmigen Magnetfeld verbindet. Führe die folgenden Schritte aus:

a. Zeichne einen Pfeil (oder einen Vektor) in eine beliebige Richtung.

b. Zeichne einen weiteren Pfeil (oder Vektor), der am Ende des ersten Pfeils beginnt und in eine andere Richtung zeigt.

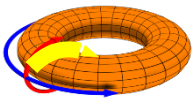
c. Zeichne einen dritten Pfeil, der am Anfangspunkt des ersten Pfeils beginnt und am Endpunkt des zweiten Pfeils endet.

Pfeil (blau) + Pfeil (orange) = Pfeil (grün). Der dritte Pfeil ist nun das Ergebnis der (vektoriellen) Addition der ersten beiden Pfeile.



Was kommt heraus, wenn man ebenso mit einem Poloidpfeil (oder Vektor) und einen Toroidpfeil (oder Vektor) verfährt?

Das Ergebnis für einen poloidalen Pfeil und einen toroidalen Pfeil ist: toroidaler Pfeil (blau) und poloidaler Pfeil (rot). Die Überlagerung führt zu einer schraubenförmigen Feldlinie (gelb)



Modul 1 – Grundlagen der Fusion, Handbuch für Lehrkräfte

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

FuseNet
The European Fusion Education Network