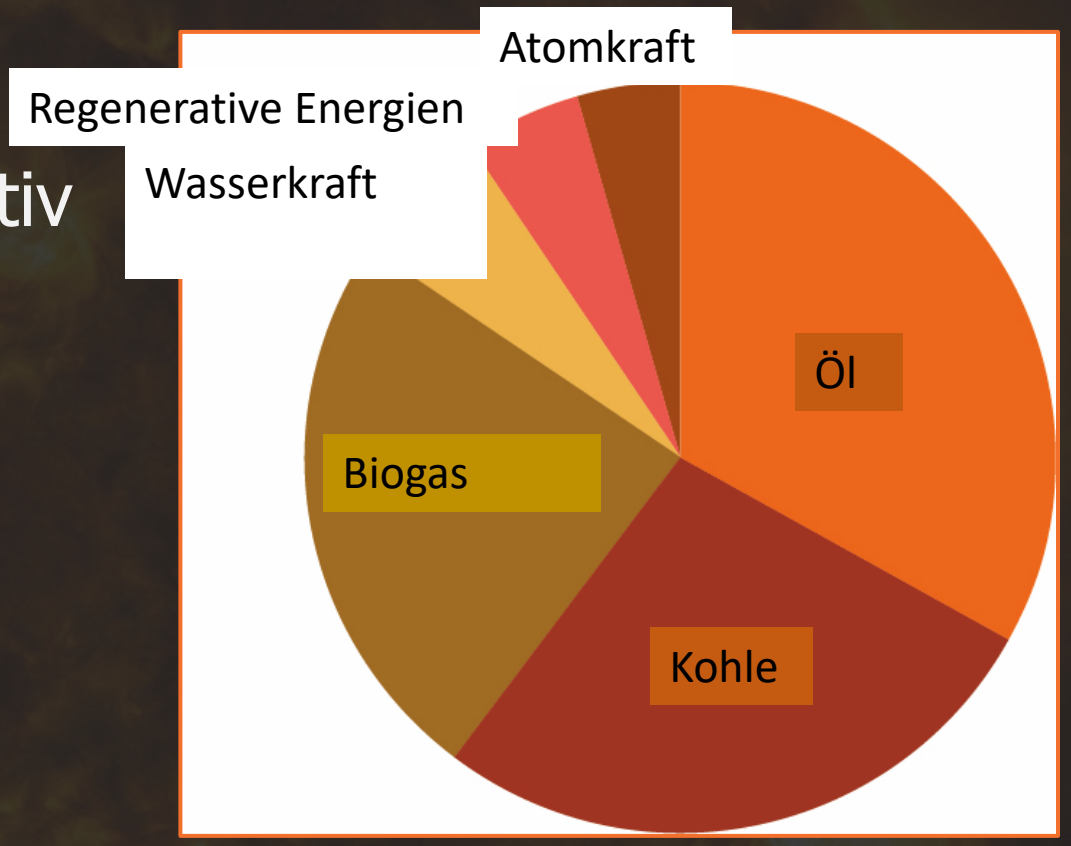
Modul 1
Grundlagen der Fusion

1.1 Energie und ihre Bedeutung für die Welt

- Der Energiemix
  - Regenerativ vs nicht regenerativ



Quelle: BP Statistik der weltweiten Energieversorgung, 2020.

Unterrichtsübung 1.1

(a) Schätze, welchen prozentualen Anteil regenerative Energiequellen wie Sonnen-, Wind-, Wasserkraft etc. zum Energiemix in deinem Land beitragen. Erläutere deine Schätzung. Hattest du irgendwelche Anhaltspunkte?

(b) Vergleiche deine Schätzung mit der von mindestens einer anderen Person. Weichen sie stark voneinander ab? Vergleicht, wie ihr auf die Schätzungen gekommen seid: Hattet ihr unterschiedliche Anhaltspunkte?

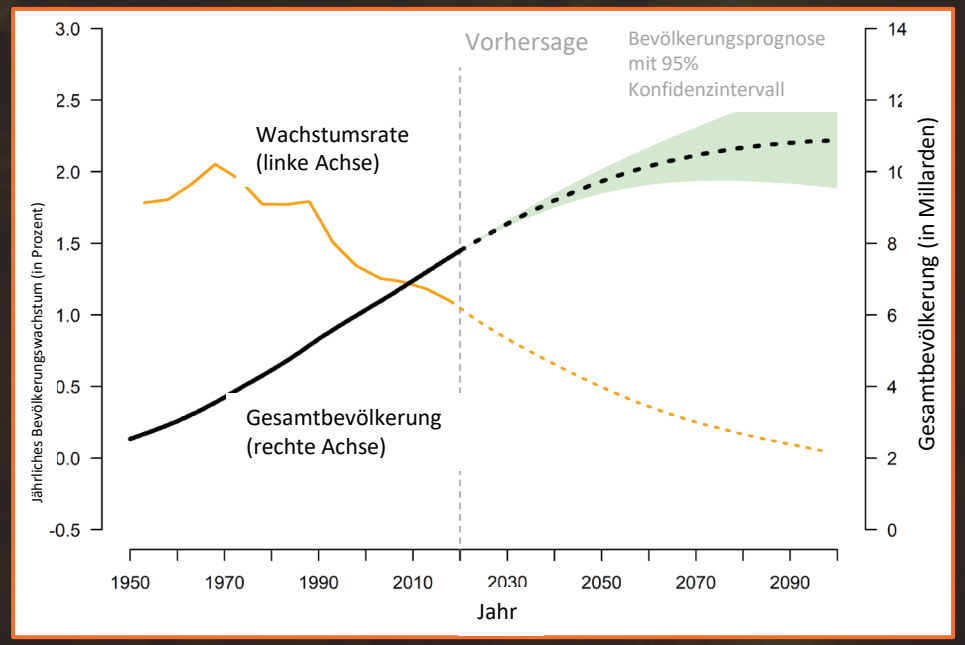
(c) Informiere dich über den Energiemix in deinem Land. Vergleiche deine Schätzungen mit den Daten. Hast du gut geschätzt?

Unterrichtsübung 1.1- Auflösung

- Diskussion

Das Energieproblem

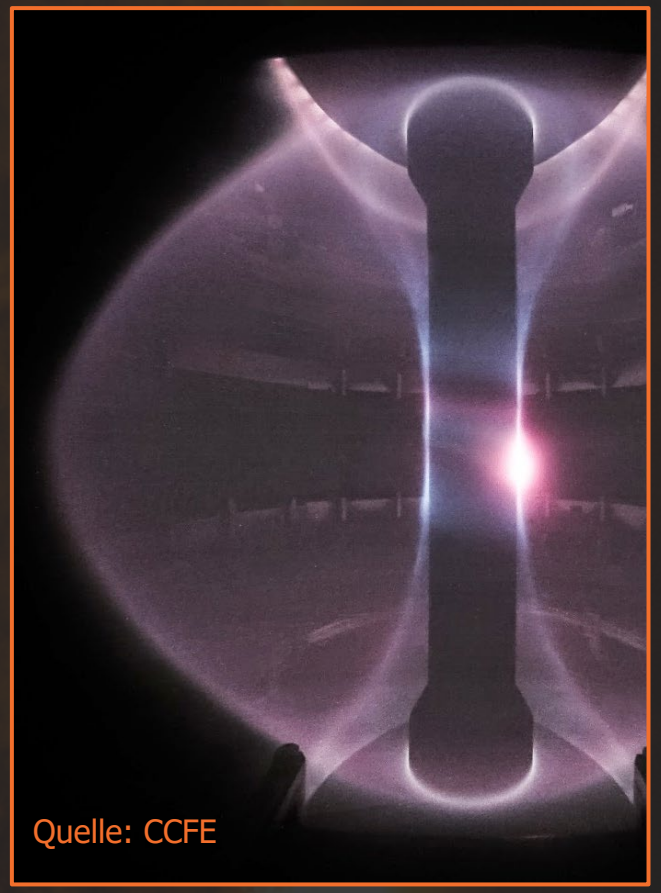
- Problem
  - Die Bevölkerung wächst
  - Der Energiebedarf steigt
  - Umweltschädliche Energiequellen



Quelle: UN, Abteilung für wirtschaftliche und soziale Angelegenheiten/Bevölkerung (2019). Prognose Bevölkerungsentwicklung 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

Das Energieproblem

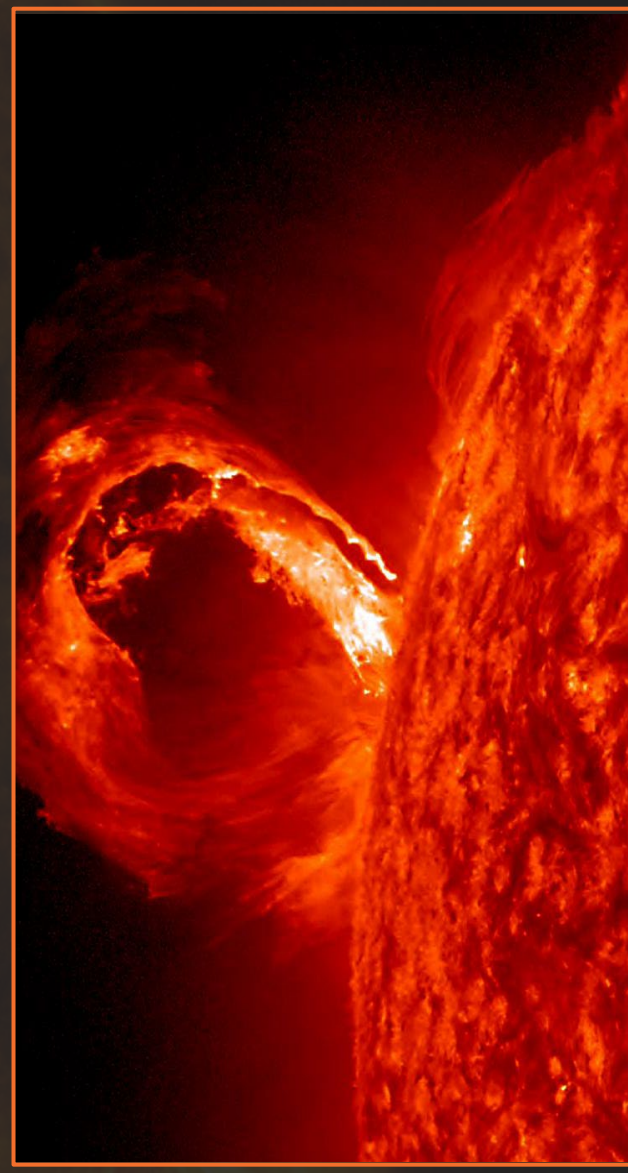
- Lösungen
  - Einschränkung des Energiebedarfs
  - Vermehrte Nutzung von nachhaltigen Quellen
- Wie?
  - Optimierte Speichertechnologie
  - Alternative Energiequellen
  - Unterstützend: Kernfusion!


Quelle: CCFE

1.2 Fusion im Inneren unserer Sonne

- Die Sonne
  - Ein Stern
  - Stabilisiert durch Schwerkraft
  - Gewaltiger Druck
  - Im Gleichgewicht

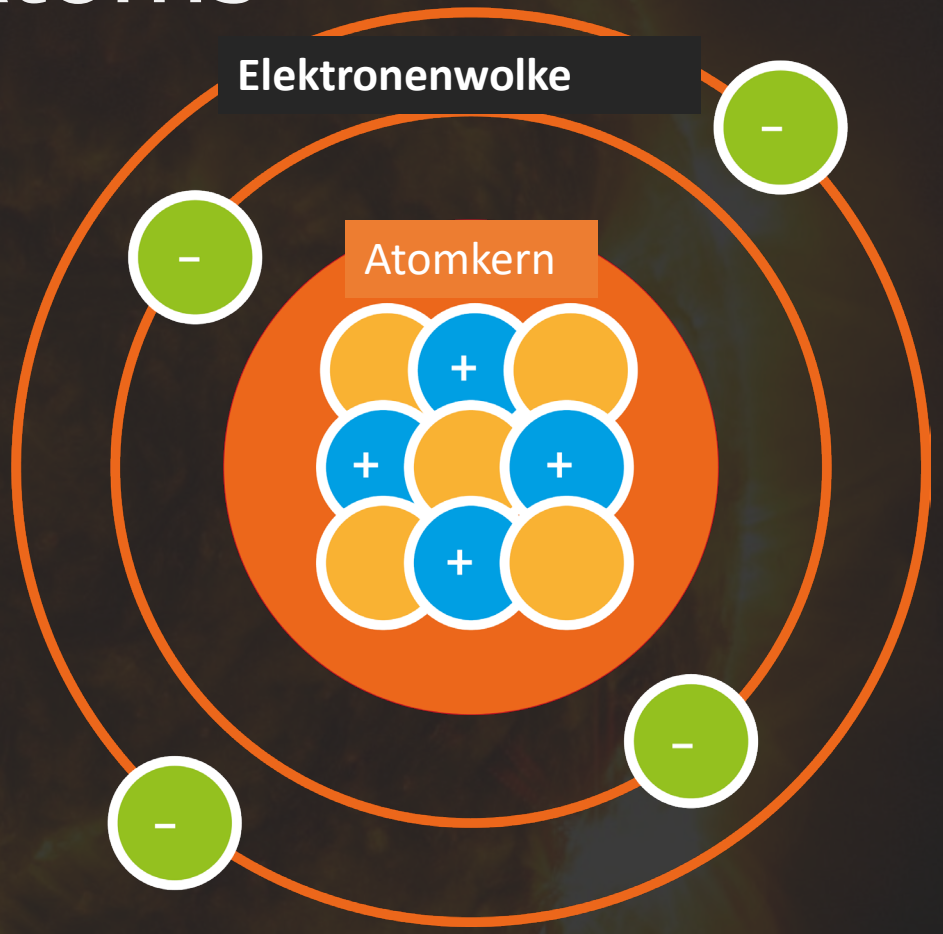
- Bezieht ihre Energie aus Fusion!
  - Schauen wir uns das mal ganz aus der Nähe an!



Quelle: NASA

Der innere Aufbau eines Atoms

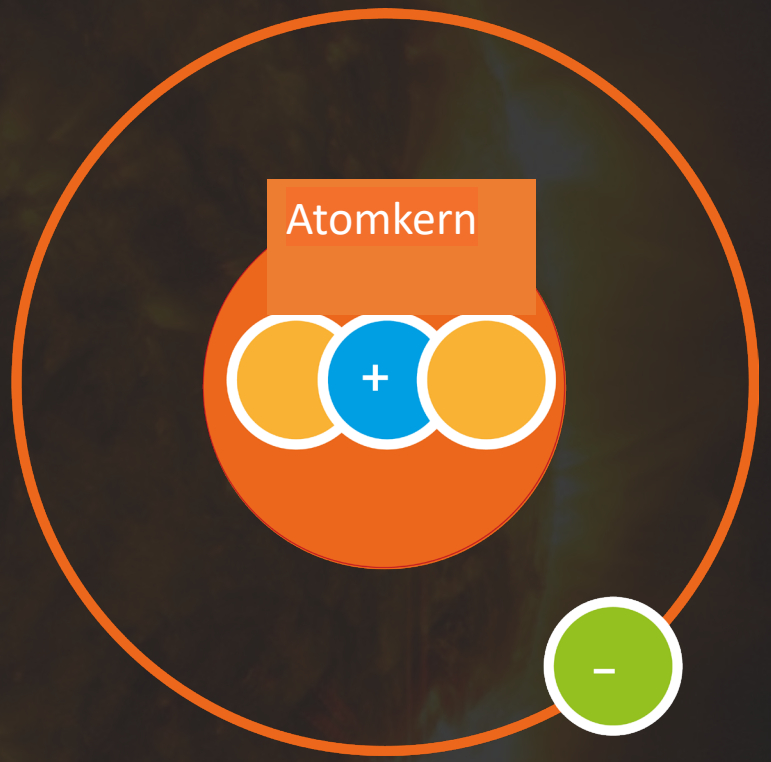
- Atomkern
  - Proton: bestimmt das Element, positive Ladung
  - Neutron: bestimmt das Isotop, keine Ladung
- Elektronenwolke
  - Elektron: bestimmt Ladung/Ion, negative Ladung



Isotop

Wasserstoff

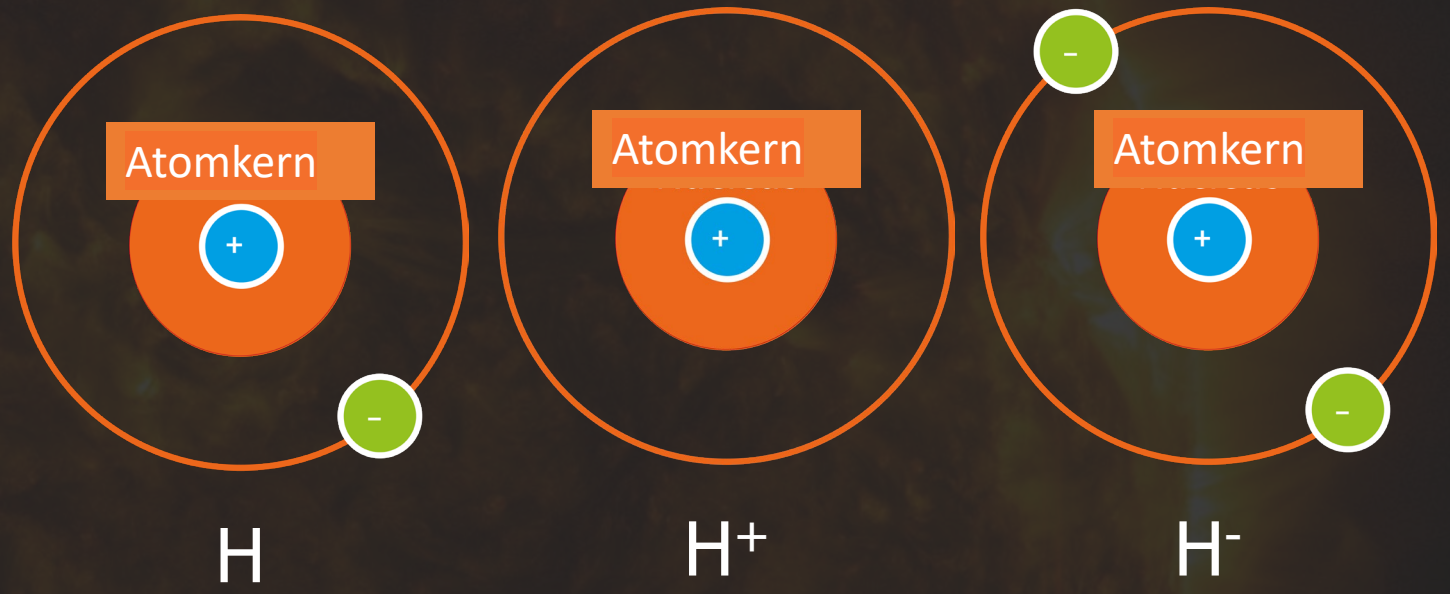
Deuterium



Tritium

Atome und Ionen

- Atome
  - Neutral



- Ionen
  - Geladen
  - Können positiv oder negativ sein

Ladung

- Geladene Teilchen interagieren miteinander

Anziehung: (+/-)

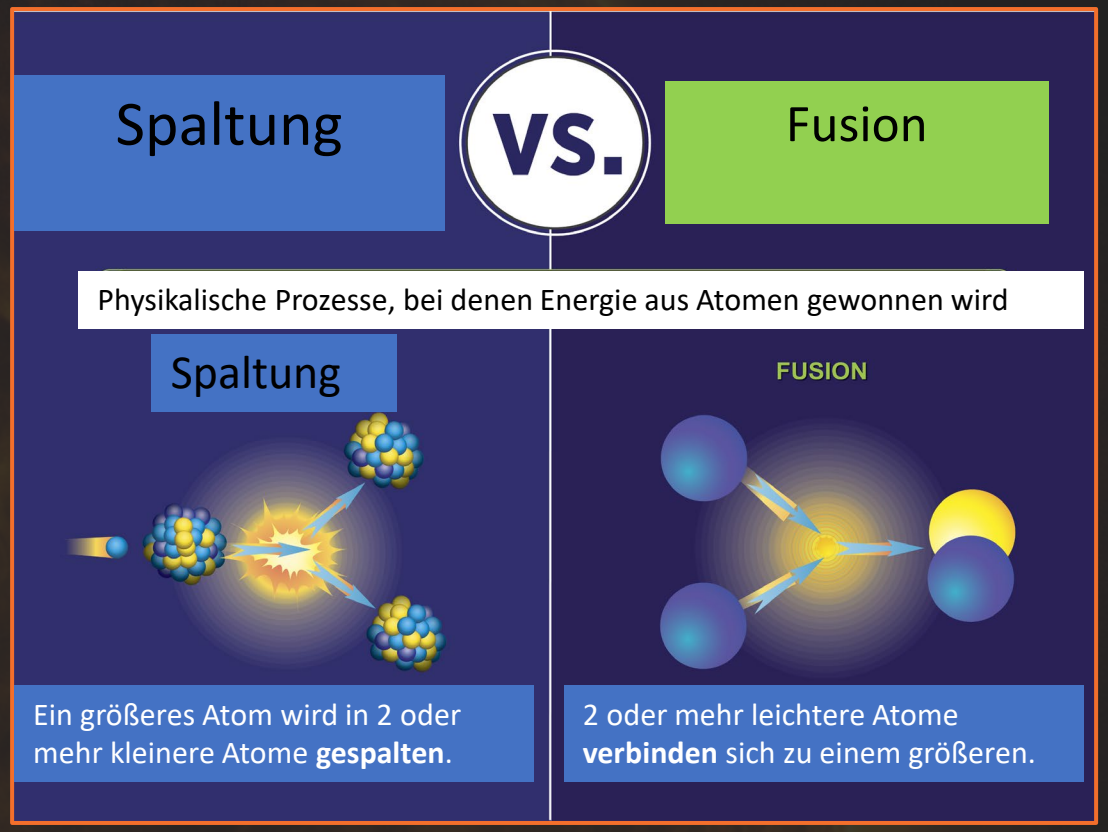
Abstoßung: (+/+) or (-/-)

Kernreaktionen

- Spaltung

  Ein schwerer Atomkern teilt sich in zwei (oder mehr) Bestandteile.
  Dabei wird Energie freigesetzt.

- Fusion
  - Zwei leichte Atomkerne verbinden sich zu einem schwereren Atomkern. Dabei wird Energie freigesetzt.



Grafik von Sarah Harman | US Energieministerium

Die Kernfusionsreaktion

- Am einfachsten: D-T fusion

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{n} + 17{,}6\ \mathrm{MeV}$$

  - Deuterium und Tritium
  - Zwei Wasserstoffisotope

17,6 MeV = 0.000000000000282 Joules → eine große Menge Energie für zwei kleine Teilchen!

1 amu = $1{,}661 \times 10^{-27}$ kg
= 0,000000000000000000000000001661 kg

Unterrichtsübung 1.2

Die Energiedichte ist ein wichtiger Begriff in der Physik. Er mag kompliziert klingen, aber letztendlich beschreibt er einfach „wie viel Energie in einem bestimmten Volumen eines Stoffes steckt". Wenn man 1 Liter Benzin verbrennt und die dabei freigesetzte Energiemenge (in Form von Wärme) misst und durch das verbrannte Volumen teilt, erhält man ein Maß für die Energiedichte. Für alle Brennstoffe kann eine Energiedichte bestimmt werden.

Welcher der unten aufgeführten Brennstoffe hat deiner Meinung nach die höchste Energiedichte? Welcher hat deiner Meinung nach die niedrigste Energiedichte? Ordne sie vom höchsten zum niedrigsten Wert

a) Vergleiche deine Rangliste mit der von mindestens einem anderen Mitschüler/einer anderen Mitschülerin. Diskutiert, wie ihr auf diese Reihenfolge gekommen seid.

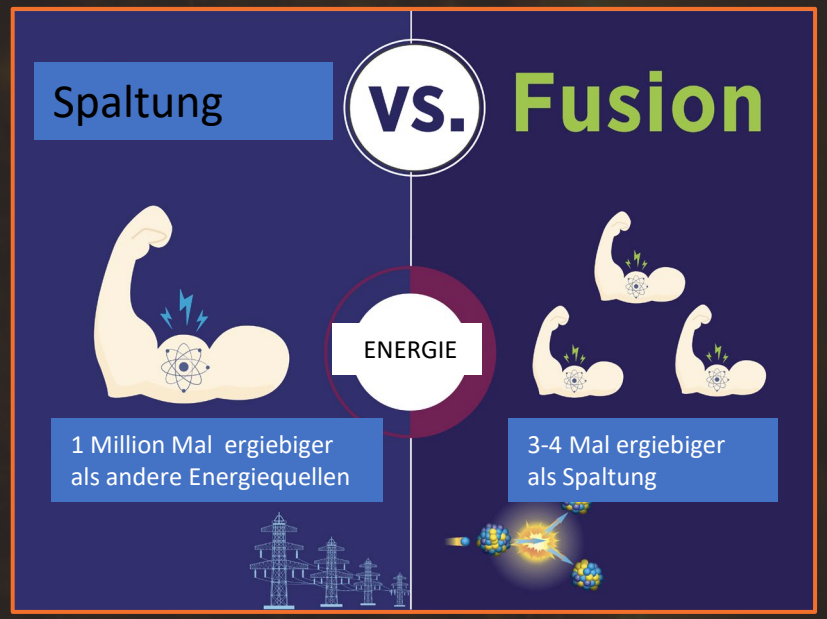
b) Informiere dich über die jeweilige Energiedichte der folgenden Stoffe. Vergleiche deine Rangliste mit den Daten. Hast du gut geschätzt?

Benzin – Öl – Kohle – Holz – Wasserstoff (Gas) – Ethanol – Deuterium – Uran

Unterrichtsübung 1.2 – Auflösung

Von hoch bis gering:

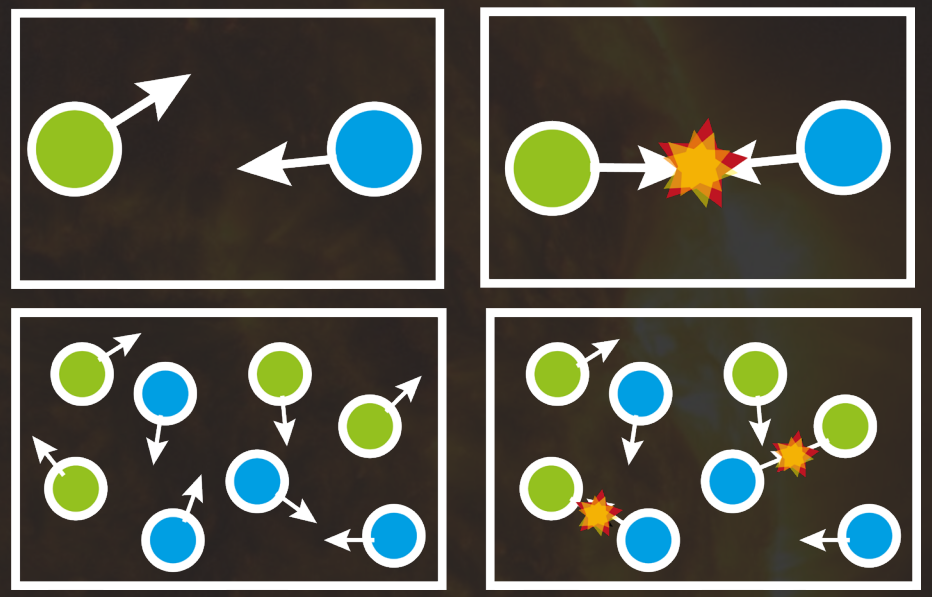
1. Deuterium
2. Uran
3. Kohle
4. Öl
5. Benzin
6. Ethanol
7. Holz
8. Wasserstoff (Gas)



Grafik von Sarah Harman | US Energieministerium

Fusionskriterien

- Wir brauchen:
  - Hohe Temperatur
    (= hohe Geschwindigkeit)
  - Hohe Dichte
- Und:
  - Ausreichende Energie-Einschlusszeit

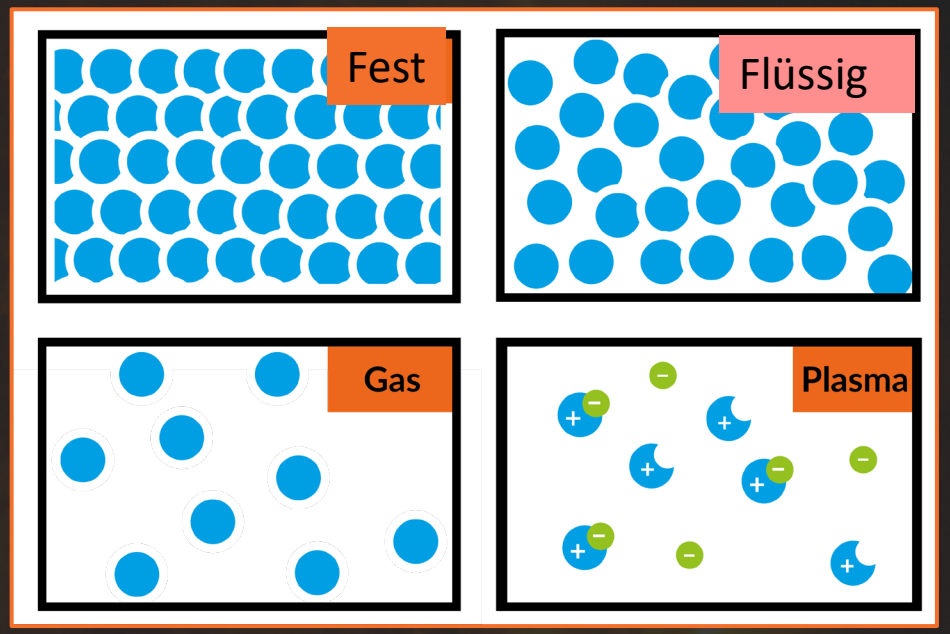


Fusionskriterien

- Im Inneren der Sonne: Schwerkraft
  - Bewirkt extreme Bedingungen und eine lange Energie-Einschlusszeit
- Auf der Erde müssen wir einen anderen Weg finden
  - Fusionsreaktoren
  - Plasma!

1.3 Plasma

- Der „vierte" Aggregatzustand
- Ionisiertes Gas
  - Beinhaltet frei bewegliche Ladungsträger
    - Positive Ionen
    - Negative Elektronen
  - Vollständig ionisiertes Plasma
    - Wenn es nur Ionen und Elektronen beinhaltet



Ionisierung vs Phasenübergang

- **Ionisierung**
- Gas
- Hoher Druck und hohe Temperatur
- Zerfall:
  Bindungen *innerhalb* eines Atoms zerfallen
- Voraussetzung für den Zerfall
  - Energie höher als Ionisierungsenergie

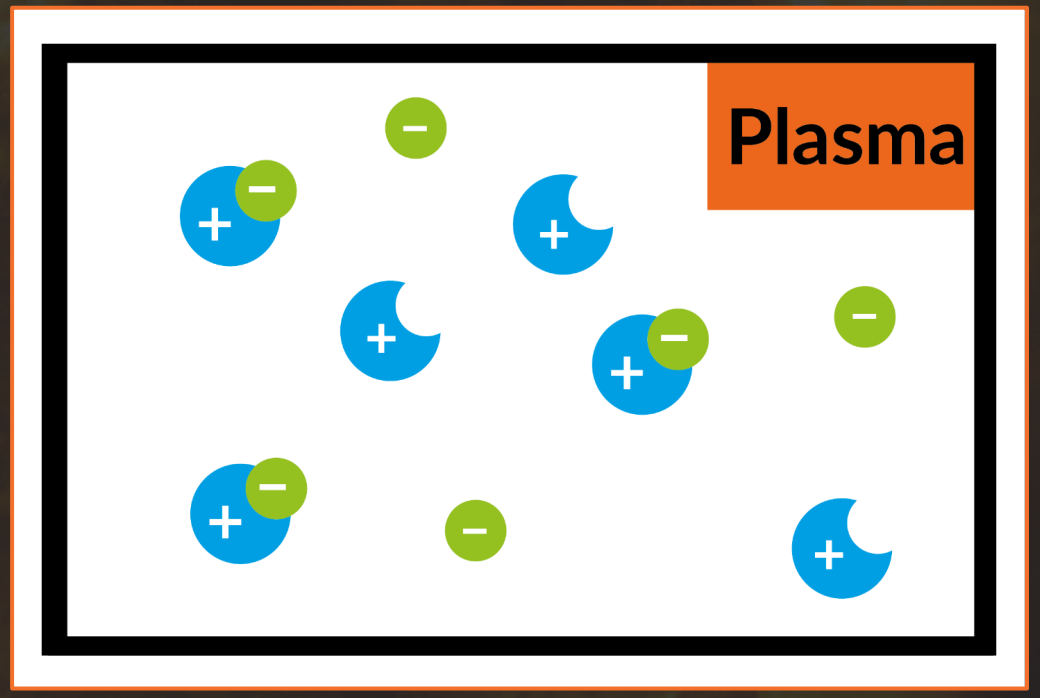
- **Phasenübergang**
- Fest/flüssig/gasförmig
- Bei bestimmtem Druck und bestimmter Temperatur
- Zerfall:
  Bindungen *zwischen* Atomen untereinander zerfallen
- Voraussetzung für den Zerfall
  - Energie überschreitet Energieschwelle

Leitfähigkeit von Plasma

- Plasma besteht aus frei beweglichen geladenen Teilchen

- Elektrisch leitfähig
  - Ströme im Plasma

- Reagiert empfindlich auf
  - Elektrische Felder
  - Magnetfelder



Beispiele für Plasmen

- Häufigster Aggregatzustand im Universum!

- Nordlichter (Aurora Borealis)
- Neonlichter
- Blitze
- Plasmaentladung
- Sonne
- Das Innere eines Tokamaks

Unterrichtsübung 1.3 – Multiple Choice

Ein Plasma unterscheidet sich von einem Gas also dadurch, dass die Masse der enthaltenen Teilchen geladen oder neutral ist. Allerdings kann man bei den meisten Plasmen beobachten, dass sie leuchten, während Gase oft farblos sind und definitiv nicht leuchten. Warum glühen Plasmen eigentlich?

a) Eine ausreichend hohe Temperatur lässt alle Objekte erstrahlen. Plasmen glühen also von Natur aus wegen der hohen Temperatur.

b) Die geladenen Teilchen bewegen sich frei. Sobald ein freies Elektron und ein Ion zusammenstoßen, können sie unter Umständen zu einer neuen Einheit verschmelzen. Bei diesem Rekombinationsprozess verbinden sich die geladenen Teilchen zu einem neutralen Teilchen, und es wird Licht emittiert. Wenn das emittierte Licht im sichtbaren Spektrum liegt, beginnt das Plasma zu leuchten.

c) Bei einigen Kernreaktionen wird Licht emittiert. Wenn das emittierte Licht im sichtbaren Bereich liegt, beginnt das Plasma zu leuchten.

Unterrichtsübung 1.3 – Auflösung

Ein Plasma unterscheidet sich von einem Gas also dadurch, dass die Masse der enthaltenen Teilchen geladen oder neutral ist. Allerdings kann man bei den meisten Plasmen beobachten, dass sie leuchten, während Gase oft farblos sind und definitiv nicht leuchten. Warum glühen Plasmen eigentlich?

a) Eine ausreichend hohe Temperatur lässt alle Objekte erstrahlen. Plasmen glühen also von Natur aus wegen der hohen Temperatur.

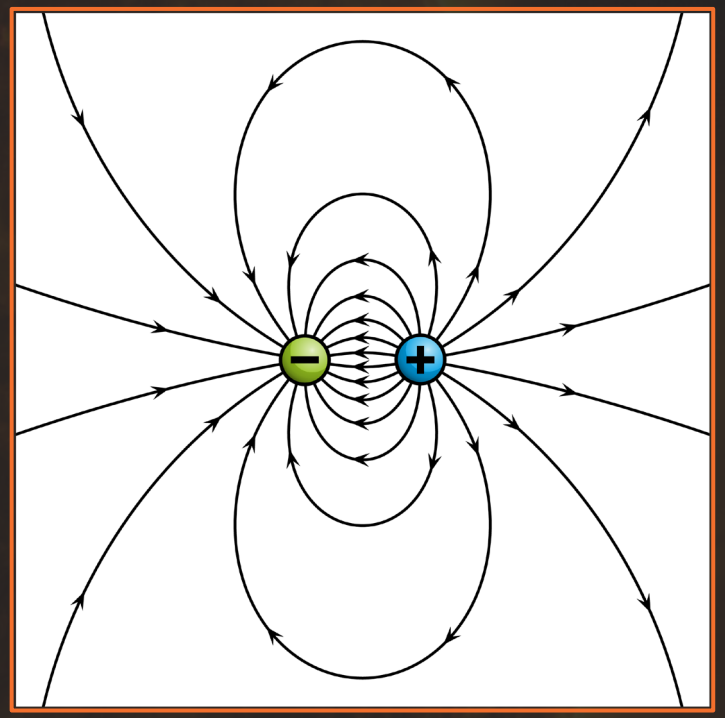
b) Die geladenen Teilchen bewegen sich frei. Sobald ein freies Elektron und ein Ion zusammenstoßen, können sie unter Umständen zu einer neuen Einheit verschmelzen. Bei diesem Rekombinationsprozess verbinden sich die geladenen Teilchen zu einem neutralen Teilchen, und es wird Licht emittiert. Wenn das emittierte Licht im sichtbaren Spektrum liegt, beginnt das Plasma zu leuchten.

c) Bei einigen Kernreaktionen wird Licht emittiert. Wenn das emittierte Licht im sichtbaren Bereich liegt, beginnt das Plasma zu leuchten.

Elektrisches Feld

- Ladung beeinflusst die Umgebung
- Hohe Feldstärke in der Nähe der Ladung.

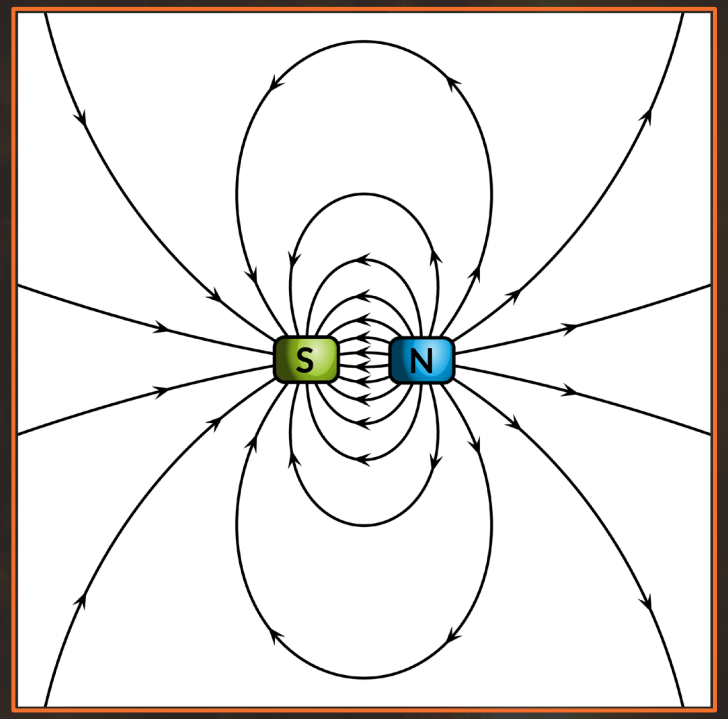
- Elektrische Feldlinien
  - Imaginär
  - Kreuzen einander nie
  - Nah = stark!
  - Von + zu -



Magnetfeld

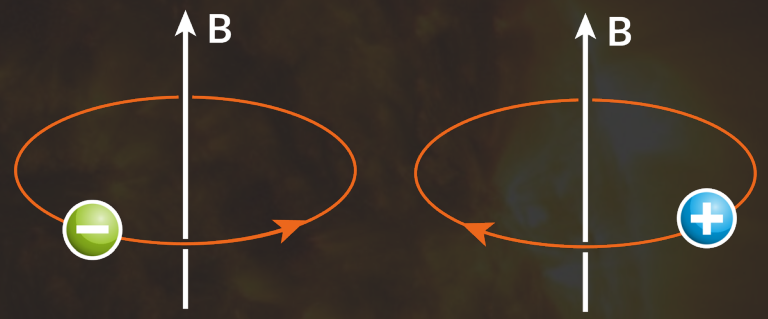
- Ladung beeinflusst die Umgebung
- Hohe Feldstärke in der Nähe der Pole

- Magnetische Feldlinien
  - Imaginär
  - Kreuzen sich nie
  - Nah = stark!
  - Von N nach S
  - Immer geschlossene Schleifen

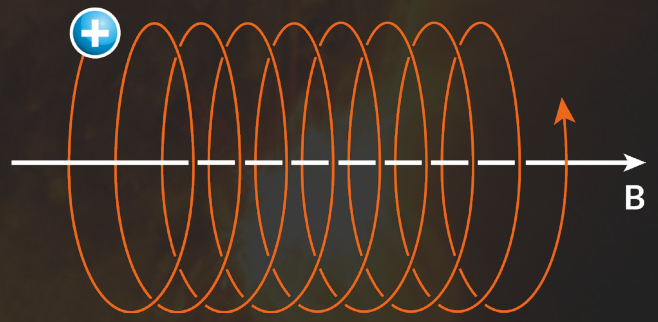


Ladungen in einem Magnetfeld

- Wirbelbewegung
  - Ladung interagiert mit Magnetfeld
  - Kreiselbewegung um die Feldlinie



- Bei schneller Bewegung des Teilchens in Richtung der Feldlinie
  - Spiralförmiger Umlauf um die Feldlinie



Plasma-Einschluss

- Warum sind für eine Fusion elektrische und magnetische Felder nötig?
- Um das Plasma einzuschließen!
- Plasma → hohe Temperatur und schnelle Teilchenbewegung
- Wenn die Teilchen auf die Wand des Reaktors prallen, kann diese schmelzen
- Ein Magnetfeld ermöglicht es, die Teilchen von der Wand fernzuhalten!

Unterrichtsübung 1.4

Die Richtung des Magnetfeldes (d.h. die Richtung der Magnetfeldlinien) hängt von der Richtung der beweglichen Ladungen ab. Zeichne für die folgenden Situationen jeweils die Richtung des Magnetfelds anhand mehrerer Magnetfeldlinien ein:

a) Ein gerader Draht, durch den ein Strom fließt.

b) Eine kreisförmige Drahtschleife, durch die ein Strom im Gegenuhrzeigersinn fließt.

c) Ein Elektron bewegt sich im Kreis (im Uhrzeigersinn) und ein Proton bewegt sich im Kreis (gegen den Uhrzeigersinn). Vergleiche dies mit den Richtungen aus Frage b: Was fällt dir auf?

d) Was kannst du über die Richtung des Magnetfeldes im Vergleich zu Bewegungsrichtungen im Allgemeinen sagen?

Unterrichtsübung 1.4 – Auflösung

a) Der Strom fließt aus dem Papier heraus.
   Das Magnetfeld ist im Gegenuhrzeigersinn gekrümmt.

b) Das Magnetfeld innerhalb der Schleife läuft aus dem Papier heraus.
   Das Magnetfeld außerhalb der Schleife läuft ins Papier hinein.

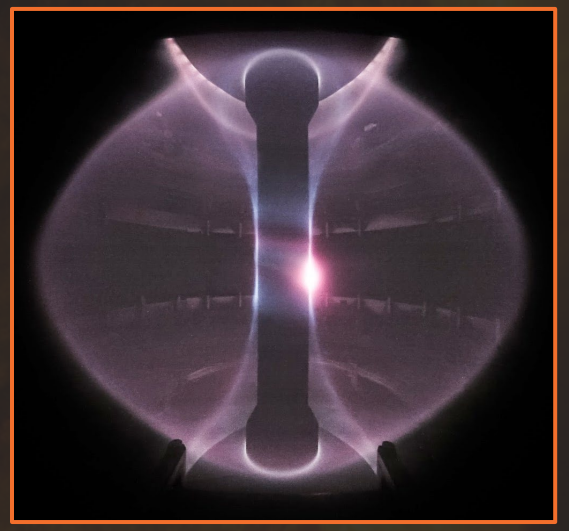
c) Wegen der entgegengesetzten Ladung und der entgegengesetzten Bewegung hat das Magnetfeld für beide Teilchen die gleiche Richtung

d) Das Magnetfeld verläuft immer lotrecht zur Stromrichtung

1.4 Konstruktion einer Fusionsmaschine

- Fusion mittels magnetischem Einschluss (MCF)
  1. Plasmaeinschluss mithilfe eines Magnetfelds
  2. Erhitzung des Plasmas, bis Fusionsbedingungen eintreten

- Bekannteste Form einer Fusionsanlage:
- Tokamak
- Russisch:
  „Toroidale Kammer mit Magnetspulen"



MAST (Mega Ampere Spherical Tokamak) | Quelle: CCFE

Der Tokamak

- Donutförmig (Torus)
  - Im Inneren des Donuts: Plasma
  - Außenseite des Donuts: Magnetspulen

- Geometrie
  - Großer Radius R
  - Kleiner Radius a
  - Poloidalwinkel θ
  - Toroidalwinkel φ

Bildquelle: Powerppoint Stock photo

Unterrichtsübung 1.5

Tokamaks und Fusionsanlagen mit Toruskonfiguration unterscheiden sich in ihrem „Seitenverhältnis", dem Verhältnis zwischen dem Großen Radius R und dem kleinen Radius a. Deswegen können Torusformen sehr verschieden sein. Schauen wir uns diese verschiedenen Formen einmal genauer an.

a) Fertige eine Skizze eines Torus mit einem großen Großen Radius und einem kleinen Kleinen Radius an. Wie sieht das aus?

b) Skizziere nun einen Torus mit einem kleinen Großen Radius und einem großen Kleinen Radius. Warum ist dieser schwieriger zu zeichnen?

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

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

e) Was ist das kleinstmögliche Seitenverhältnis für einen Torus?

Unterrichtsübung 1.5 – Auflösung

a) Ein Donut

b) Der Donut ähnelt einer Kugel. Der Kleine Radius kann nicht größer sein als der Große Radius (sonst sprechen wir nicht mehr von einem Torus!).

c) Wenn wir zulassen, dass der Kleine Radius den Großen Radius übersteigt, erhalten wir im Extremfall eine Kugel.

d) Der Torus ändert seine Form.

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

Unterrichtsübung 1.6

Wie wir gesehen haben, gibt es in einem Torus im Wesentlichen zwei Richtungen: die „toroidale“ und die „poloidale“. Um nicht durcheinanderzukommen, sollten wir sie uns einmal genauer anschauen.

a) Fertige eine Skizze der beiden möglichen Querschnitte eines Torus an.

b) Welcher Querschnitt ist der poloidale Querschnitt? Welcher ist der torusförmige Querschnitt? Was fällt dir an der toroidalen/poloidalen Richtung und dem jeweiligen Querschnitt auf?

Unterrichtsübung 1.6 – Auflösung

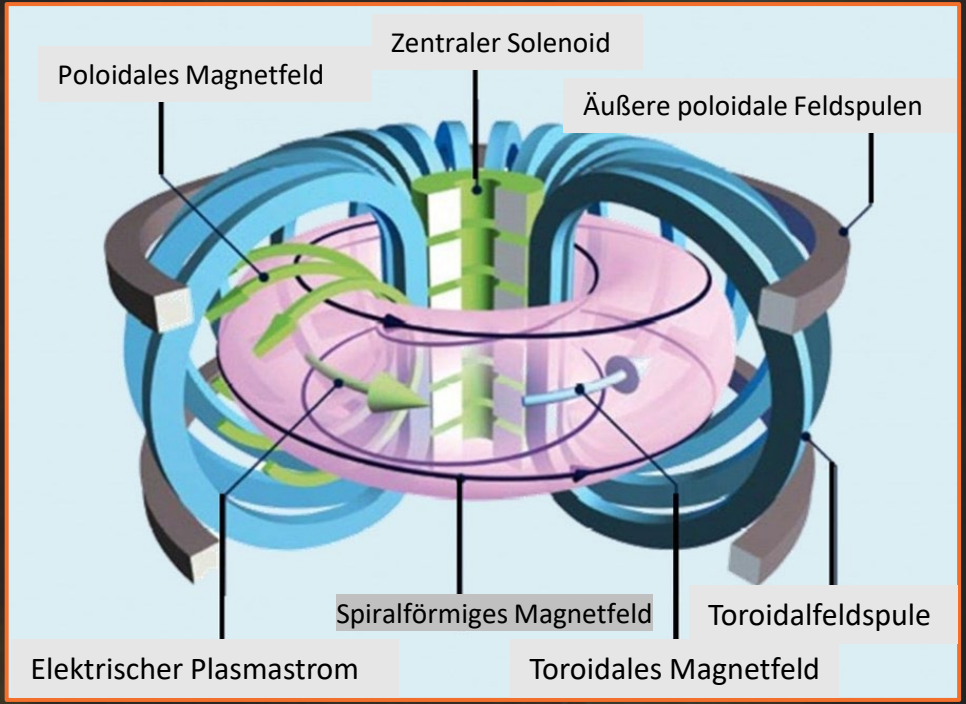
Poloidaler Querschnitt

Toroidaler Querschnitt

Tokamak-Magnetspulen

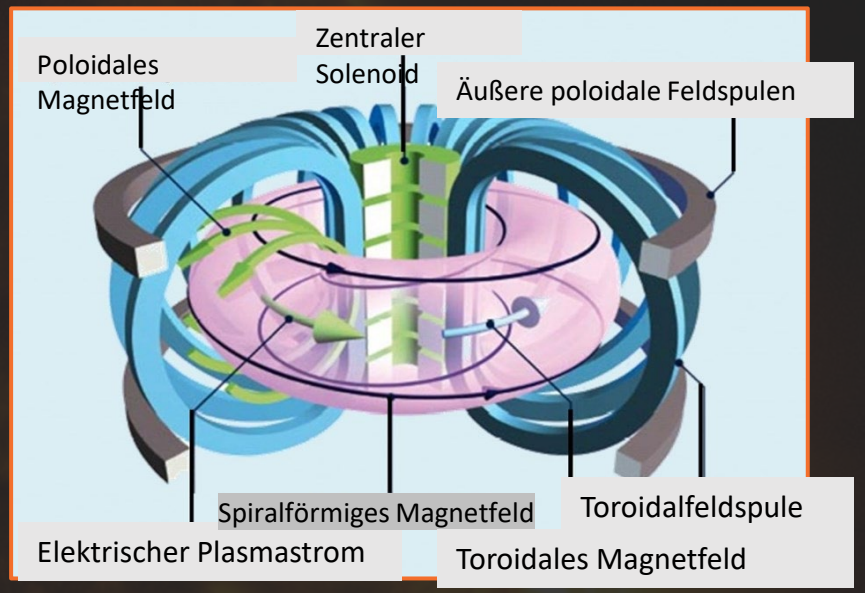
- Drei Haupt-Magnetsysteme:

- Toroidalfeldspulen
- Zentraler Solenoid
- Poloidale Feldspulen



Bildnachweis: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Unterrichtsübung 1.7



Betrachten wir nun einen Standard-Tokamak unter Berücksichtigung seiner drei Hauptmagnetsysteme.

a) Welche Magnete sind im poloidalen Querschnitt zu erkennen? Wie werden diese Magnete genannt und ist diese Bezeichnung sinnvoll?

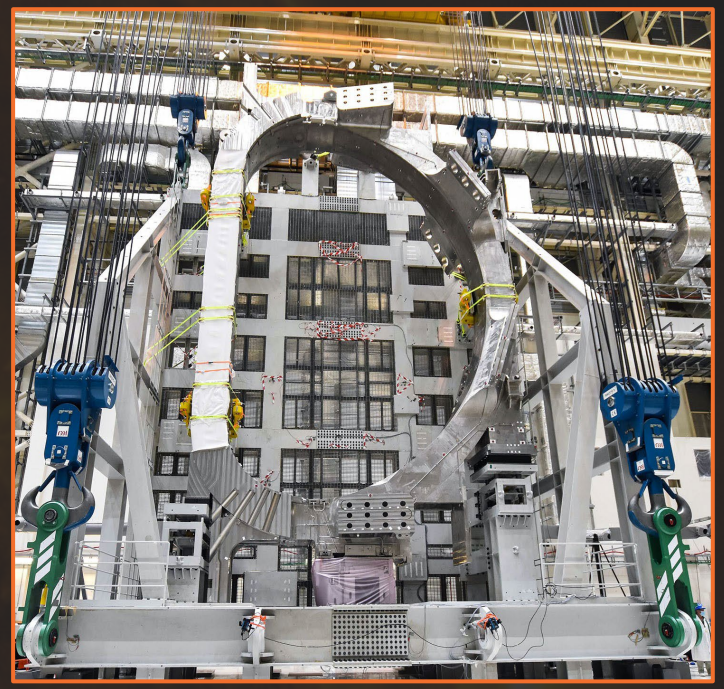
b) Erkläre die Namen der beiden anderen Magnetgruppen.

Credit: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Unterrichtsübung 1.7 – Auflösung

a. Toroidalfeldspulen – liegen im poloidalen Querschnitt des Tokamaks
b. Zentraler Solenoid – liegt im „Loch” des Donuts, d.h. in der Mitte
   Poloidalfeldspulen – liegen an der Ober- und Unterseite des Torus

Toroidalfeldspulen



- Stärkstes Feld im Tokamak
- D-förmig
- Umgeben den Donut

- Für einen stabilen magnetischen Einschluss werden zusätzliche Magnetfelder benötigt.

Bildquellennachweis: ITER

Zentraler Solenoid

- Gestapelte Spulen im Loch des Donuts
- Indirekte Nutzung des Felds
  Magnetische Induktion zur Erzeugung eines Stroms im Plasma
- Dieser Strom erzeugt ein poloidales Magnetfeld
- Toroidales + poloidales Feld → spiralförmiges Magnetfeld
- Spiralförmiges Magnetfeld wird für stabilen Einschluss benötigt

Magnetische Eigenschaften

- Magnetfeldstärke B
  - Je dichter die Magnetfeldlinien beieinander liegen, desto höher ist der Wert B

$$\Phi = B \cdot A \cos(\alpha)$$

- Magnetischer Fluss Φ
  - „Phi"
  - Dichte der Magnetfeldlinien, die durch eine Oberfläche verlaufen
  - Die Feldlinien verlaufen lotrecht zur Oberfläche

Induzierte Spannung

- Abhängig von der Änderungsrate des magnetischen Flusses
- Berechnungsformel:

$$\text{Anzahl der Spulenwindungen} \times \text{Änderung des magnetischen Flusses}$$

- Induzierte Spannung: ε (Epsilon)
- Genutzt von Transformatoren

$$\varepsilon = N \cdot -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

Induzierte Spannung & magnetische Induktion

Die induzierte Spannung wirkt der Änderung des magnetischen Flusses entgegen

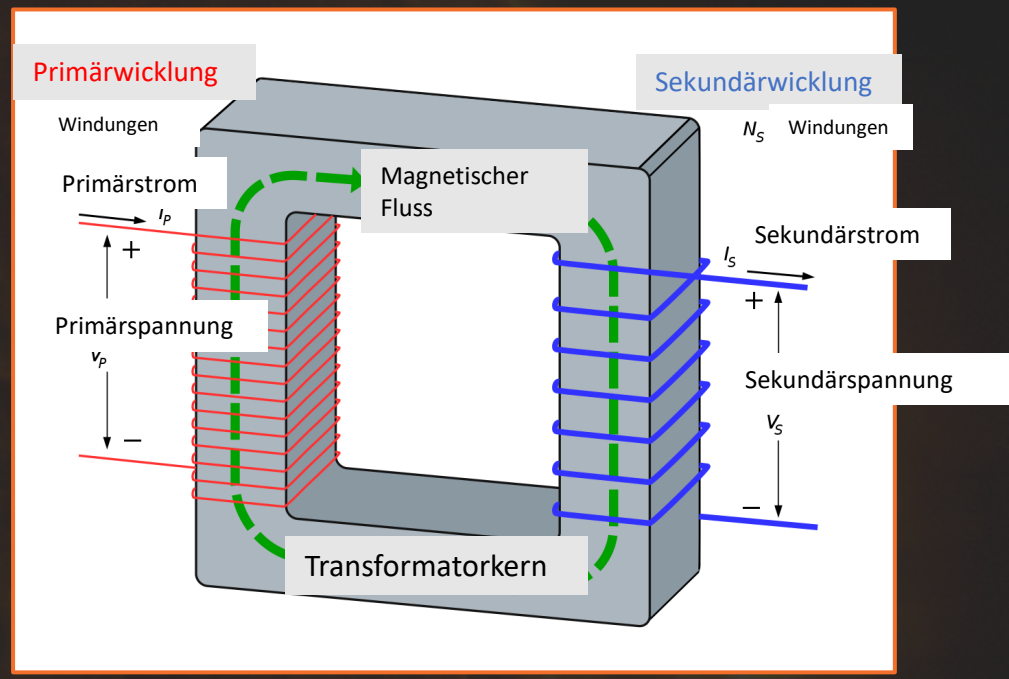
1. Erzeugung einer Spannung
2. Spannung erzeugt Strom
3. Strom erzeugt entgegengesetztes Magnetfeld

Die Spannung induziert also ein entgegengesetztes Magnetfeld:
Magnetische Induktion

Auf diese Weise kann ein variierender Strom in einer Schleife einen Strom in einer anderen Schleife induzieren, wenn die Schleifen nicht miteinander verbunden sind!

Transformatoren

- Bestehen aus zwei Spulen
  - Primärspule
  - Sekundärspule
  - Unterschiedliche Anzahl von Spulen
  - Nutzt magnetische Induktion



- Der ideale Transformator
  - Kein Energieverlust: $P_{Spule1} = P_{Spule2}$

Merke!

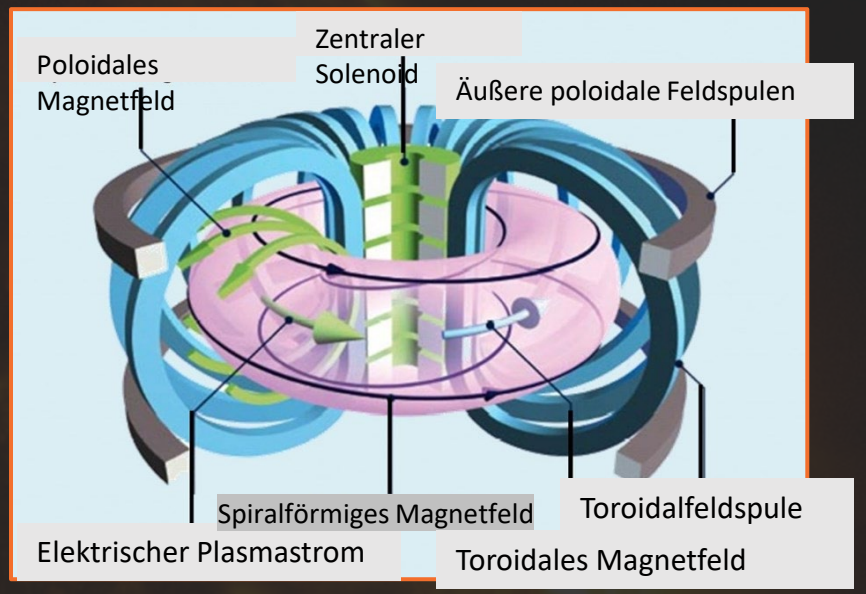
$$\text{Leistung} = \text{Spannung} \times \text{Strom}$$

$$P = V \times I$$

Bildquellennachweis: BillC im englischsprachigen Wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://tinyurl.com/ye55fpxv

Poloidale Feldspulen

- Tragen zur Stabilisierung von Form und Position des Plasmas bei
  - Werden benötigt, um das Plasma zu stabilisieren



- Sie werden also nicht benötigt, um ein Poloidalfeld zu erzeugen!

(Das Poloidalfeld wird mittels magnetischer Induktion vom zentralen Solenoid erzeugt)

Bildquellennachweis: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Unterrichtsübung 1.8

Induktion zur Generierung eines Plasmastroms, der unser Poloidalfeld erzeugt, hat einen gravierenden Nachteil: Der Tokamak kann nur gepulst betrieben werden.

a) Wie führt magnetische Induktion zu gepulstem Betrieb?

b) Warum ist das für einen Fusionsreaktor problematisch?

Unterrichtsübung 1.8 – Auflösung

a) Die Induktion ist abhängig von der Änderung des magnetischen Flusses. Der magnetische Fluss kann sich aber nicht ständig ändern, denn irgendwann sind die Magnete erschöpft. Daher arbeitet der zentrale Solenoid im Pulsmodus und bewirkt einen gepulsten Betrieb der Anlage.

b) Im Idealfall läuft ein Fusionsreaktor ununterbrochen. Wird er gepulst betrieben, gibt es Zeiten, in denen keine Energie erzeugt wird.

Magnetischer Einschluss

- Druckgleichgewicht im Tokamak
  - Nach außen gerichteter Druck: Plasma
  - Nach innen gerichteter Druck: Magnetfeld
    → Lorentzkraft!
  - Gleichgewicht!
  - Ermöglicht Fusion auf der Erde!

Willst du noch mehr über Fusion lernen?

Dann schau dir die anderen Module an!

- Modul 2: Der Weg zur Fusion
- Modul 3: Plasmakontrolle
- Modul 4: Fusionsmaterialien
- Modul 5: Nutzung von Fusion

Oder folge den Tipps für weiterführende Lektüre im Begleitheft

Dieses Modul ist Bestandteil der FuseNet-Lehrmaterialien für weiterführende Schulen, die auf dem FuseNet-Bildungsserver abgerufen werden können: https://fusenet.eu/education/materials

Mehr Informationen unter: https://fusenet.eu

Autor: Sander Korteweg

Chefredakteure: Sjoukje Tijmensen-Hoekstra, Sander Korteweg

FuseNet
The European Fusion Education Network

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.