# Modul 1

# Grundlagen der Fusion

Autor: Sander Korteweg

Dieses Modul soll als Einführung in die Kernfusion dienen. Vor allem wird es darum gehen, warum dieses Phänomen nicht nur für die Wissenschaft, sondern für die ganze Menschheit interessant ist. Wir lernen, wie die Kernfusion funktioniert und wie man ihr Prinzip zur Energieerzeugung nutzen kann.

Irgendwann wird man sich unweigerlich fragen: Woran hapert es? Warum ist es so schwierig, aus Kernfusion Energie freizusetzen?

Nach Abschluss dieses Moduls werdet ihr die Grundlagen der Kernfusion verstehen und in der Lage sein, sie als mögliche Energiequelle mit anderen Optionen zu vergleichen. Ihr werdet das Potenzial der Kernfusion diskutieren können und verstehen, warum es so schwierig ist, Fusionsenergie zu erzeugen.

Wenn ihr Lust habt, könnt ihr später euer Wissen in Aufbau-Modulen weiter vertiefen.

# 1.1 Die Bedeutung von Energie auf der Welt

## Der Energiemix

Wenn man zum ersten Mal von der Kernfusion hört, wird man sich unweigerlich fragen, warum dieses Thema überhaupt relevant ist. Um diese Frage zu beantworten, sollte man sich zunächst mit Energie im Allgemeinen und erst dann mit der Kernfusion im Speziellen auseinandersetzen. Seit der Erfindung der Dampfmaschine spielt Energie eine immer wichtigere Rolle im Alltag. Im Winter schalten wir zu Hause die

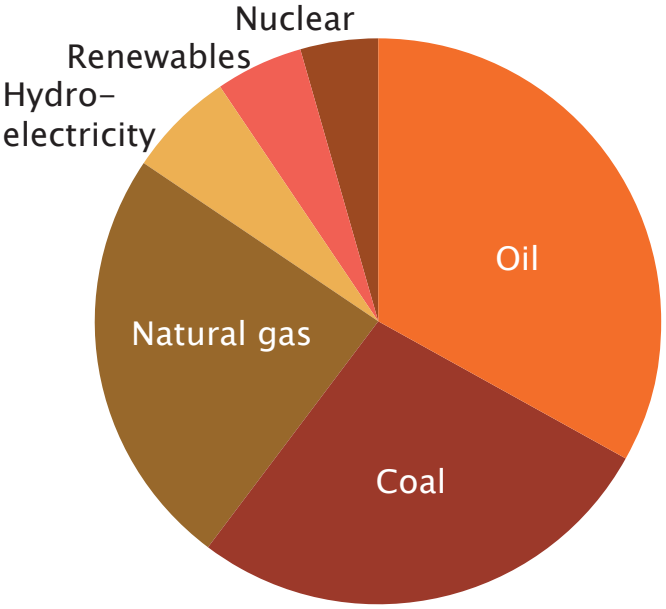



Abbildung 1. Ein Tortendiagramm des globalen Energiemixes 2019, aufgeteilt nach Ressourcen. Der weitaus größte Anteil entfällt auf Öl, gefolgt von Kohle und Erdgas. Wasserkraft, erneuerbare Energien und Atomkraft folgen mit einigem Abstand. Quelle: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

Heizung ein, damit es warm wird; im Sommer braucht die Klimaanlage Strom. Maschinen, Autos und Elektronik benötigen ebenfalls Energie: Von der Logistik bis zum fertigen Produkt – Energie ist aus der modernen Welt nicht mehr wegzudenken.

Dieser Energiebedarf muss irgendwie gedeckt werden. Seit der industriellen Revolution hat die Menschheit viele intelligente Methoden zur Energiefreisetzung gefunden,

die sich im Wesentlichen in zwei Kategorien einteilen lassen: **nicht regenerativ** und **regenerativ**. Um die Sache noch komplizierter zu machen, unterscheidet man weiterhin zwischen **nachhaltiger** und **nicht nachhaltiger** Energie.

Die Begriffe regenerativ und nachhaltig werden zwar häufig synonym verwendet, bedeuten aber eigentlich nicht das Gleiche. Regenerativ heißt, dass erneuerbare Ressourcen zur Verfügung stehen, während nachhaltig bedeutet, dass eine Form der Energiefreisetzung über einen längeren Zeitraum hinweg ohne negative Langzeitfolgen genutzt werden kann.

Wenn Bäume abgeholzt und dafür neue gepflanzt werden, ist das zwar ein regenerativer, aber kein nachhaltiger Prozess – auch wenn immer wieder neue Bäume wachsen, die irgendwann die alten ersetzen. Wenn jedoch schneller abgeholzt als aufgeforstet wird, ist der Prozess nicht nachhaltig. Irgendwann gibt es nämlich keine Bäume mehr. Umgekehrt gilt: Manche Formen der Energiegewinnung sind nicht regenerativ, aber dafür nachhaltig: Atomkraft durch Kernspaltung (Achtung: Kernspaltung ist nicht dasselbe

Anmerkung

## Was ist mit grüner oder sauberer Energie?

Die Begriffe „grüne“ oder „saubere“ Energie begegnen uns im täglichen Leben häufig. Sie stehen für die Umweltverträglichkeit einer Energiequelle und drücken aus, dass diese keine schädlichen (CO2-/Treibhausgas)-Emissionen (im Produktionsprozess) erzeugt. Es ist umstritten, was eine wirklich saubere Energiequelle ausmacht, da bei der Bereitstellung einer sauberen Energiequelle trotzdem Emissionen während des Baus oder des Transports entstehen können. Nachhaltige Energie bedeutet in der Regel, dass sie über einen längeren Zeitraum hinweg ohne (bekannte) schädliche Folgen für die Zukunft betrieben werden kann. Da dies klarer definiert ist als die Begriffe grüne oder saubere Energie, wird der Fokus hier auf nachhaltiger Energie liegen.

**Unterrichtsübung 1.1**
(a) Schätze ab, wie viel Prozent der Energie in deinem Land aus erneuerbaren Energiequellen wie Sonne, Wind, Wasser usw. gewonnen werden. Erkläre, wie du zu deiner Schätzung gekommen bist. Hast du dich auf Vermutungen gestützt?
(b) Vergleiche deine Schätzung mit der Schätzung von mindestens einer anderen Person. Weichen die Ergebnisse stark voneinander ab? Vergleicht die Argumentationen für eure Schätzungen: Seid ihr von unterschiedlichen Annahmen ausgegangen?
(c) Schau dir den Energiemix deines Landes an. Vergleiche deine Schätzungen mit den Daten. Liegen deine Ergebnisse nah dran?

Siehe auch die Übungen: A.1, A.2, A.3.

wie Kernfusion) ist keine regenerative Energieform, weil die dafür benötigten Uranvorkommen nicht in der Natur nachwachsen. Die vorhandenen Ressourcen reichen jedoch aus, um viele Reaktoren über einen langen Zeitraum (wenn auch nicht für immer) ohne negative Langzeitschäden zu betreiben – vorausgesetzt, der Atommüll wird gewissenhaft entsorgt. Daher gilt Atomkraft nach dem Prinzip der Kernspaltung als eine nicht regenerative Energieform, die jedoch nachhaltig genutzt werden kann.

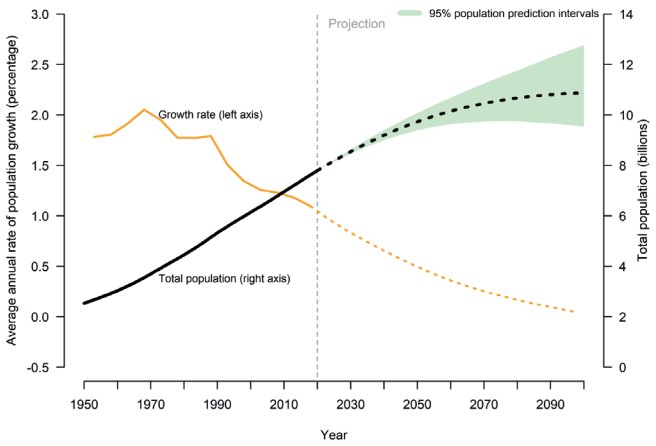



Abbildung 2. Die Wachstumsrate der Weltbevölkerung ist seit den 1970er Jahren rückläufig. Das ist an der orangefarbenen Trendlinie zu erkennen. Infolgedessen bewegt sich die Gesamtbevölkerung – in Schwarz dargestellt – stetig auf einen konstanten Wert von etwa 11 Milliarden zu. Der grüne Bereich zeigt die Ungewissheit des verwendeten Modells. Quelle: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

## Das Energieproblem

Jetzt wissen wir zwar ungefähr, welche verschiedenen Energieformen es gibt und dass die moderne Gesellschaft im Alltag enorm viel Energie benötigt, aber die genaue Bedeutung der Kernfusion erschließt sich daraus noch nicht. Dazu muss man sich zunächst mit dem **Energieproblem** und dessen Zusammenhängen befassen.

**Die Weltbevölkerung wächst**. Von 1999 bis 2020 ist die Weltbevölkerung von 6 auf 7,8 Milliarden angewachsen. 2030 wird sie voraussichtlich auf 8,5 Milliarden, 2050 auf 9,7 Milliarden und 2100 auf 10,9 Milliarden ansteigen (siehe auch Abbildung 2).

**Der durchschnittliche Energieverbrauch pro Kopf nimmt zu**. In Ländern, die sich weiterentwickeln, steigt der Lebensstandard. Ein höherer Lebensstandard hat in der Regel einen steigenden Energiebedarf zur Folge, z. B. weil die Grundversorgung und die Infrastruktur oder das Stromnetz und der Internetausbau verbessert werden. Gemäß einer Erklärung der Vereinten Nationen hat jeder Mensch das Recht auf Gesundheit und einen angemessenen Lebensstandard. Ein guter Lebensstandard für alle Menschen hat Priorität gegenüber dem Ziel, den durchschnittlichen Energieverbrauch pro Kopf zu senken, und es wäre unethisch, den Menschen diesen besseren Lebensstandard vorzuenthalten.

Die nach wie vor meist genutzten Energiequellen sind umweltschädlich, vor allem wegen ihrer **Treibhausgasemissionen**. Fossile Brennstoffe dominieren unsere Energieversorgung, und obwohl die Entwicklung regenerativer und sauberer Energiequellen schnell voranschreitet, geht es nicht schnell genug, um von fossilen Brennstoffen unabhängig zu werden, bevor ein unumkehrbarer **Klimawandel** eintritt. Der Klimawandel wird auf der Welt großen Schaden anrichten: Man geht davon aus, dass die steigenden Temperaturen extreme Wetterlagen (inklusive Ereignisse wie Brände und Hitzewellen) verursachen werden und dass der Klimawandel auch schlimme Folgen für die Gesundheit von Mensch und Tier sowie für die Weltwirtschaft haben wird. Fossile Brennstoffe sind also keine nachhaltige Lösung für die Zukunft: Der Klimawandel ist bereits in vollem Gange. Es besteht dringender Handlungsbedarf, und zwar jetzt.

Dies sind die drei Faktoren des Energieproblems, vor dem die Welt heute steht.

## Lösungen für das Energieproblem

Wie für jedes Problem sollte es auch für dieses eine Lösung geben. Theoretisch gibt es viele Möglichkeiten, aber die meisten davon sind mit drastischen Veränderungen des Lebensstils und Einschränkungen des gewohnten Lebensstandards verbunden: zwei Bereiche, in denen die meisten Menschen keine Opfer bringen wollen. Daraus ergeben sich logischerweise zwei mögliche Lösungen für das Energieproblem:

**1) Der (durchschnittliche) Energiebedarf muss deutlich sinken**. Dazu müssten entweder effizientere Verfahren entwickelt werden (eine Frage der Technik) oder alle Menschen auf der Welt müssten ihren Energieverbrauch drastisch reduzieren (eine gesellschaftliche Frage). Energieeffizienz lässt sich nur bedingt optimieren: Es wird immer irgendeine Form von Energieverlust geben, seien es Wärmeverluste in elektrischen Leitungen oder Reibungsverluste in Maschinen. Gleichzeitig gibt es viele Bereiche, die effizienter gestaltet werden können – etwa durch bessere Gebäudeisolierung und optimierte Heizmethoden oder mithilfe neuer Prozesse in der Logistik und im Ressourcenmanagement. Andererseits ist die Senkung des durchschnittlichen Energieverbrauchs eine sehr praktikable, wenn nicht sogar notwendige Option. Wir müssen uns damit abfinden, dass der Klimawandel drastische Auswirkungen auf unseren Alltag haben wird und wir unseren Lebensstil ändern müssen, vor allem wenn man bedenkt, dass zur Zeit wenige Reiche auf der Welt den Großteil der gesamten Energie verbrauchen, während die Armen viel weniger beanspruchen. Viele Menschen haben noch nicht einmal Zugang zu Stromversorgung! Man kann nicht erwarten, dass diese weiterhin ohne Strom leben müssen, weil andere so verschwenderisch damit umgehen.

**2) Nachhaltige Energieformen müssen besonders gefördert werden**. Wenn wir sofort auf alle fossilen Brennstoffe verzichten würden, könnten wir eine Menge Emissionen einsparen! Das ist jedoch leichter gesagt als getan. Hier kommen politische und wirtschaftliche Aspekte ins Spiel: Die Industrie der fossilen Brennstoffe ist groß und kann nicht einfach

über Nacht verschwinden. Inzwischen setzen sich jedoch Elektroantriebe immer mehr durch. In einigen Bereichen sind bereits rasche Veränderungen zu beobachten (man denke an Elektroautos), aber letztendlich hängt die Umstellung davon ab, wie schnell Alternativen bereitgestellt und ausgebaut werden können. Die Wende gelingt nicht von heute auf morgen. Zugleich bleibt immer weniger Zeit, die verheerenden Auswirkungen des Klimawandels noch zu verhindern.

Natürlich wird all dies zu einem gewaltigen gesellschaftlichen Problem mit Folgen für die ganze Weltbevölkerung führen.

Auf der Suche nach nachhaltigen Energieformen landet man irgendwann bei den bekanntesten regenerativen Energiequellen: Sonne und Wind. Aber diese haben einen Haken: Sie sind nicht ständig verfügbar. Das Leben steht jedoch nicht still. Daher müssen diese Energiequellen mit geeigneten Energiespeicherlösungen kombiniert werden. Solar- und Windenergie fluktuieren im Tagesverlauf, aber das Hauptproblem liegt in ihrer Saisonabhängigkeit und der Standortverfügbarkeit. Ein Wintertag ist kürzer und dunkler als ein Sommertag; dafür bläst im Winter der Wind stärker als im Sommer. Genauso herrschen an manchen Orten auf der Welt das ganze Jahr über starke Winde, während es an anderen windstill ist. Mancherorts gibt es mehr Sonnenlicht als anderswo (Unterschiede zwischen dichten Wäldern, weiten Steppen, trockenen Wüsten oder der Arktis). Im Vergleich mit Sonnen- und Windenergie zeigt sich der Vorteil fossiler Brennstoffe besonders deutlich, weil sie nun einmal pausenlos hohe Energiemengen liefern: Sie gewährleisten eine stabile **Grundlast**, auch wenn das Sonnenlicht oder der Wind einmal nicht stark genug sind. Doch wenn man weiter auf fossile Brennstoffe setzt, werden viele Menschen keine lebenswerte Zukunft mehr haben.

Es gibt also im Wesentlichen zwei Wege, um das Energieproblem zu lösen: **(1) Bessere Energiespeicherung**. Zum Beispiel bessere und leistungsfähigere Akkus. **(2) Eine alternative Grundlastversorgung**. Die bekannteste Option: Atomkraft!

Obwohl Akkus immer besser und günstiger werden, sind Kombinationen aus nachhaltigen Energieformen wie Sonnen- oder Windenergie und Energiespeicherung in Akkus leider immer erheblich teurer als fossile Brennstoffe. Regenerative Energiequellen müssen nicht nur zu den fossilen Brennstoffen aufschließen, sondern sie innerhalb der nächsten 30 Jahre überholen und ersetzen. Aber selbst wenn das gelingt, ist es keineswegs sicher, ob die Kombination aus erneuerbaren Energien und Energiespeicherung den künftigen Energiebedarf der gesamten Welt wird abdecken können. Andererseits ist auch die grundlastfähige Atomkraft aus Kernspaltung alles andere als ideal, da sie langlebige radioaktive Abfälle produziert.

## Fusion als (unterstützende)Lösung

Da wir heute noch nicht wissen, wie der ideale Energiemix der Zukunft aussehen könnte, lohnt sich die Forschung an Alternativen vielleicht nicht nur kurz-, sondern auch langfristig. Und genau hier kommt die **Kernfusion** als mögliche Energiequelle der Zukunft ins Spiel. Es handelt sich hierbei um einen Prozess, den man ständig beobachten kann: Kernfusion versorgt die Sonne mit Energie und ist die Voraussetzung dafür, dass es Leben auf unserem Planeten gibt. Diesen Vorgang möchte man auf der Erde in einer Art Mini-Stern nachahmen und kontrolliert nutzen. Die weltweite Forschung macht zwar immer mehr Fortschritte, aber bis man aus Kernfusion Energie gewinnen kann, wird es noch eine Zeitlang dauern. Unmittelbar bevorstehende Probleme lassen sich mit dieser Technologie also nicht lösen, aber sie könnte die Antwort auf die Energieprobleme der nächsten Jahrhunderte sein.

Wenn es uns gelingt, hier auf der Erde Energie aus Kernfusion freizusetzen, hätten wir eine nachhaltige und von Natur aus sichere Lösung, die (fast) keine Emissionen verursacht. Sie könnte zur Grundlastversorgung beitragen, genau wie fossile Brennstoffe oder die Atomkraft aus Kernspaltung. Wir hätten damit eine kompakte Energiequelle, für die mehr als genug Brennstoff zur Verfügung steht: genug, um Energie für Millionen von Jahren bereitzustellen. Das macht die Fusion aber noch lange nicht zur idealen

Lösung. Die Technologie ist komplex und äußerst schwierig umzusetzen; bisher ist es nicht gelungen, aus einer Reaktion mehr Energie zu gewinnen, als zu ihrer Erzeugung aufgewendet wurde. Trotzdem wäre die Kernfusion eine perfekte Alternative, falls die anderen regenerativen Energiequellen den Energiebedarf der Zukunft nicht decken können. Auf der ganzen Welt wird mit Hochdruck geforscht, um die Herausforderungen der Fusion zu meistern und das immense Potenzial dieser Technologie als Energiequelle der Zukunft zu erschließen.

Letztendlich gibt es keine „ultimative" Lösung für das Energieproblem. Der irreversible Klimawandel ist kaum noch aufzuhalten, und wie das Pariser Klima-Abkommen von 2015 beweist, das 190 Länder und die Europäische Union unterzeichnet haben, ist sich die Welt einig, dass die globalen CO2-Emissionen so stark reduziert werden müssen, dass die Temperatur auf der Erde um nicht mehr als 2 Grad Celsius steigt. Um dies zu erreichen, muss sich der Energiemix der Welt drastisch ändern. Die Kernfusion wird unsere Probleme nicht innerhalb der nächsten 50 Jahre lösen, aber wenn die Technologie einmal funktioniert, könnte sie auf Generationen hinweg sämtliche Energieprobleme aus der Welt schaffen. Deswegen wird weiterhin mit großem Einsatz daran geforscht.

In den nächsten Kapiteln dieses Moduls werden die Grundlagen der Kernfusion erläutert. Wir beschäftigen uns mit dem Vorgang in der Sonne, erfahren, was ein Plasma ist, und erlernen die Grundbauprinzipien einer Fusionsanlage. Es wird sich zeigen, dass es gar nicht so schwer ist, eine Fusionsreaktion herbeizuführen, sondern dass die große (und bislang ungelöste) Herausforderung darin besteht, diesen Prozess zur Energiefreisetzung zu nutzen. Mit Abschluss dieses Moduls werdet ihr die wichtigsten physikalischen Grundlagen einer Kernfusionsanlage verstehen.

1.2

# Fusion im Inneren unserer Sonne

Die Frage nach dem „Warum“ der Fusionsforschung ist nun geklärt; jetzt ist es Zeit für das „Wie“. Befassen wir uns zunächst mit jenem Fusionsreaktor, der schon ununterbrochen läuft, lange bevor die Menschheit überhaupt jemals etwas von Fusion gehört hat: die Sonne.

## Die Sonne

Die Sonne besteht aus einer riesigen Ansammlung von Teilchen, die durch die **Schwerkraft** zusammengehalten werden. Einfach ausgedrückt: Aufgrund der Schwerkraft ziehen sich Objekte mit einer Masse gegenseitig an. Die Anziehungskraft hängt dabei vom Gewicht der Objekte ab. Die Erde hat ein hohes Eigengewicht und zieht alles in Richtung ihres Zentrums. Daraus resultiert die Schwerkraft, die wir spüren, die unsere Füße fest auf dem Boden hält und Gegenstände zu Boden fallen lässt. Die Sonne ist viel schwerer: etwa 333.000 Mal so schwer

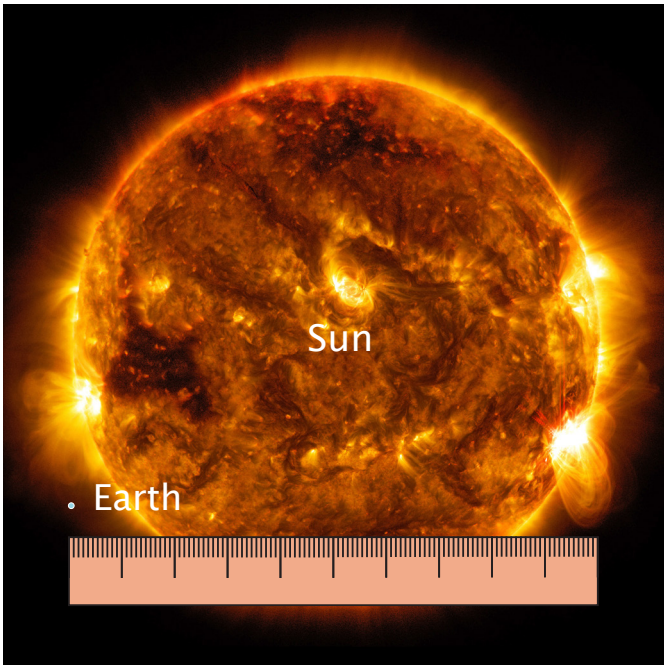



Abbildung 3. Verglichen mit der Sonne ist die Erde unglaublich klein. Ein blassblauer Punkt, wie es der Astronom Carl Sagan einmal ausdrückte. Ihr Radius ist hundertmal kleiner als der der Sonne, ihr Volumen eine Million Mal geringer. Angepasst von: NASA/Solar Dynamics Observatory.

wie die Erde. Daher ist die Anziehungskraft der Sonne viel stärker als die Schwerkraft, die wir auf der Erde wahrnehmen. Dennoch muss es auch eine nach außen gerichtete Kraft geben, sonst würde die Sonne einfach in sich zusammenfallen. Diese nach außen gerichtete Kraft ist das Ergebnis von Fusionsreaktionen im Kern der Sonne.

Genauso wie der Druck auf der Erde steigt, je tiefer wir uns dem Zentrum des Planeten nähern, wird auch der **Druck** im Inneren der Sonne immer höher. Dies ist das gleiche Prinzip wie beim Druckanstieg in der Tiefsee: Aufgrund der Schwerkraft übt die gesamte oben befindliche Masse Druck nach unten aus, und je größer diese ist, desto mehr steigt der Druck. Die Schwerkraft zieht alle Teilchen zum Zentrum hin und versucht so, die gesamte Masse zu komprimieren. Der hohe Druck im Kern der Sonne führt dann zu einer nach außen gerichteten Kraft, die die nach innen gerichtete Schwerkraft ausgleicht. Infolgedessen fällt die Sonne weder in sich zusammen, noch dehnt sie sich aus: Die Kräfte sind im **Gleichgewicht**.

Im Kern der Sonne ist die Temperatur extrem hoch. Da die Sonne an der Oberfläche (wegen der Strahlung) Wärme verliert, ist die Temperatur dort logischerweise am niedrigsten und im Kern am höchsten. Gleichzeitig ist die Dichte aufgrund der Kompression durch die Gravitationskräfte im Zentrum am höchsten. Daher herrschen im Kern der Sonne sehr extreme Bedingungen, die dazu führen, dass die einzelnen Teilchen zu einer Einheit verschmelzen: Diesen Vorgang nennt man Fusion. Bei der Verschmelzung zweier Teilchen wird viel Energie freigesetzt, und dieser Vorgang führt zu einem hohen Außendruck, der den Gravitationskräften entgegenwirkt und verhindert, dass die Sonne kollabiert.

## Der innere Aufbau eines Atoms

Sehen wir uns nun genauer an, was diese „Teilchen“ genau sind und wie ihre Fusion abläuft.

Alle physikalischen Objekte sind aus einzelnen Elementen aufgebaut. Bei mikroskopischer Betrachtung

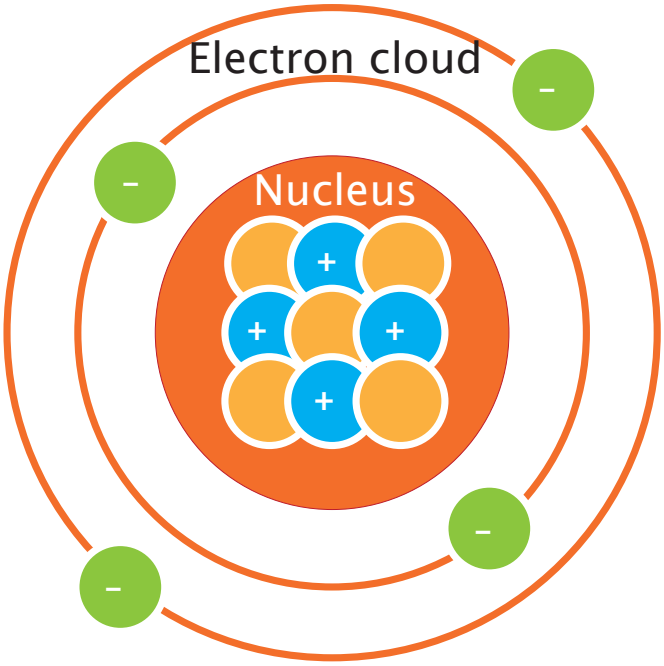



Abbildung 4. Eine schematische Darstellung eines Atoms. Im Inneren befindet sich der Kern, der aus (positiv geladenen) Protonen und (neutralen) Neutronen aufgebaut ist. Er ist von einer Wolke aus (negativ geladenen) Elektronen umgeben.

würde man sehen, dass (fast) alle Objekte komplexe molekulare Strukturen haben – wobei die einzelnen Moleküle wiederum aus Atomen bestehen. Jedes dieser Atome hat eine ähnliche Struktur, bestehend aus dem **Nukleus/Kern** (Plural: Nuklei) und einer „Wolke“ von **Elektronen**, die sich um diesen Kern bewegen. Der Kern wiederum besteht aus zwei Arten von Teilchen: **Protonen** und **Neutronen**.

Die Anzahl der Protonen im Kern bestimmt, um welche Art von Atom beziehungsweise um welches Element es sich handelt: Wenn der Kern nur ein Proton hat, spricht man von **Wasserstoff**, bei zwei Protonen handelt es sich um Helium. Wie man im Periodensystem hier am Rand sehen kann, wurden viele verschiedene Elemente entdeckt und in Kategorien eingeteilt. Die Anzahl der Neutronen im Kern kann unterschiedlich sein und verändert das jeweilige Element entsprechend: Ein Kern, der nur aus einem Proton ohne Neutronen besteht, wird zum Beispiel einfach „Wasserstoff“ genannt, aber wenn er sowohl ein Proton als auch ein Neutron hat, spricht man von **Deuterium**. Das ist ein anderes **Isotop** von Wasserstoff. Wasserstoffatome kommen als drei mögliche Isotope vor: „normaler“ Wasserstoff, Deuterium und **Tritium** (mit einem Proton und zwei Neutronen).

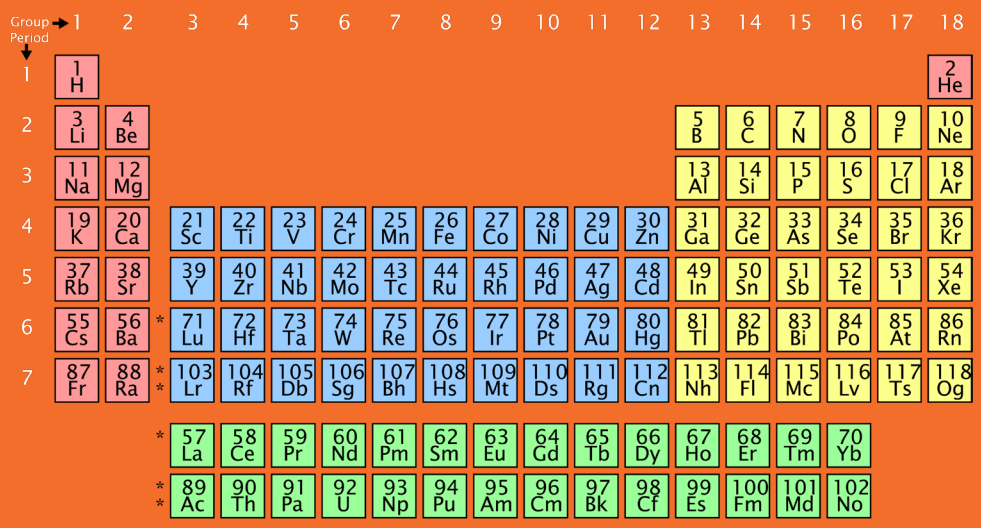



Abbildung 5. Periodensystem der Elemente. Quelle: Wikimedia-Nutzer Double Sharp (CC BY-SA 4.0)

# Atomare Notation

Nachdem wir nun wissen, was Atome und Isotope sind, wollen wir uns kurz mit der für sie verwendeten Schreibweise befassen. Da die Anzahl der Protonen eines Atoms bestimmt, um welche Art von Atom bzw. Element es sich handelt, ist dies die erste Kennung: die Ordnungszahl. Für Wasserstoff (H) ist sie 1, für Kohlenstoff (C) ist sie 6. Alle Wasserstoffatome haben die Ordnungszahl 1, alle Kohlenstoffatome die Ordnungszahl 6, unabhängig davon, um welches Isotop es sich handelt.

Die Gesamtmenge der Protonen und Neutronen ergibt die gesamte Atommasse: die Massenzahl. Da Protonen und Neutronen ungefähr die gleiche Masse haben, wird üblicherweise die Einheit der atomaren Masseneinheit (amu) verwendet, die für ein Proton (1,007276 amu) und auch für ein Neutron (1,008665 amu) etwa 1 beträgt. Elektronen sind viel leichter, deshalb können sie bei der Gesamtmasse eines Atoms normalerweise vernachlässigt werden. Für normalen Wasserstoff ist die Massenzahl also 1 (nur ein Proton und ein Elektron), für Deuterium ist sie 2 (Proton + Neutron + Elektron) und für Tritium ist sie 3 (Proton + Neutron + Neutron + Elektron).

Daraus ergibt sich eine Standardnotation für Atomisotope, bei der die Massenzahl (oben) und die Ordnungszahl (unten) neben dem Buchstaben (auf der linken Seite) angezeigt werden, der der Art des Atoms entspricht. Da der Buchstabe die gleiche Information wie die Ordnungszahl enthält, können wir die Ordnungszahl auch weglassen. Die Schreibweise mit einem Buchstaben zusammen mit der Massenzahl und der Ordnungszahl wird in diesen Kapiteln durchgängig verwendet.

Anmerkung

Was ist nun der Unterschied zwischen einem Proton und einem Neutron? Ein Proton ist ein positiv geladenes Teilchen, ein Neutron dagegen ein neutrales Teilchen. Es gibt zwei Arten von elektrischer Ladung: positive und negative. Positive Ladungen stoßen andere positive Ladungen ab und ziehen negative Ladungen an, während negative Ladungen andere negative Ladungen abstoßen und positive Ladungen anziehen. Dies ist derselbe Prozess, der bewirkt, dass sich deine Haare aufstellen, wenn dein Körper elektrisch aufgeladen ist: Wenn die Haare auf deinem Kopf alle die gleiche Ladung haben (z. B. weil du etwas Geladenes angefasst hast), stoßen sie sich gegenseitig ab. Das Ergebnis ist, dass sich alle Haare so weit wie möglich von den anderen entfernen und dann zu Berge stehen.

Heißt das nun, dass Atome geladen sind? Während der Kern immer positiv geladen ist (da er nur aus Protonen und Neutronen besteht), ist er von Elektronen umgeben, die um ihn herumfliegen. Elektronen sind negativ geladene Teilchen, die genau die gleiche Ladung haben wie ein Proton, allerdings negativ. Da Atome immer neutral sind, muss es in einem Atom die gleiche Anzahl von negativ und positiv geladenen Teilchen geben. Daher gibt es in jedem Atom immer gleich viele Protonen und Elektronen.

Das bedeutet allerdings nicht, dass es nur Teilchen mit gleich vielen Protonen und Elektronen gibt: Wenn ein Atom ein (oder mehrere) Elektron(en) verliert, wird es zu einem **positiv geladenen Ion**, und wenn es ein (oder mehrere) Elektron(en) dazugewinnt, wird es zu einem **negativ geladenen Ion**. Das Elektron, das nicht mehr Teil eines Atoms ist, wird als freies Elektron bezeichnet. Es gibt eine große Bandbreite sowohl positiv als auch negativ geladener Ionen.

## Nukleare Reaktionen

Zurück zum Vorgang der Kernfusion: Den Aufbau von Atomkernen kennen wir nun. Sehen wir uns jetzt an was passiert, wenn zwei Kerne miteinander verschmelzen.

Im Inneren der Sonne ist die Temperatur so hoch, dass zwei Kerne zusammenstoßen und zu einem neuen,

**Unterrichtsübung 1.2**
Das Konzept der Energiedichte spielt in der Physik eine bedeutende Rolle. Auch wenn es kompliziert klingt, läuft es im Kern darauf hinaus, wie viel Energie in einem bestimmten Volumen enthalten ist. Wenn du 1 Liter Benzin verbrennst und die Energiemenge misst, die (in Form von Wärme) wieder freigesetzt wird, und sie durch das verbrannte Volumen teilst, erhältst du ein Maß für die Energiedichte. Für alle Brennstoffe kann eine Energiedichte bestimmt werden.

(a) Welcher der unten aufgeführten Brennstoffe hat deiner Meinung nach die höchste Energiedichte? Welcher hat deiner Meinung nach die niedrigste Energiedichte? Ordne sie von der höchsten zur niedrigsten.

(b) Vergleiche deine Rangliste mit der Liste von mindestens einer anderen Person. Diskutiere, warum du sie in dieser Reihenfolge angeordnet hast.

(c) Schlage die Energiedichten nach. Vergleiche deine Ranglisten mit den Daten. Waren deine Schätzungen ähnlich?

**Benzin - Öl - Kohle - Holz - Wasserstoff (Gas) - Ethanol - Deuterium - Uran**

Siehe auch die Übungen: **A.4, A.5, A.6, A.7, A.8**.

größeren Kern verschmelzen können, obwohl sie sich eigentlich aufgrund ihrer positiven Ladung gegenseitig abstoßen müssten. Dies wird als **Kernfusionsreaktion** oder kurz als **Fusionsreaktion** bezeichnet. Fusionsreaktionen in Sternen lösen die Entstehung von schwereren Elementen aus, die bei ausreichend hohen Temperaturen wiederum miteinander verschmelzen. Durch diese Kettenreaktionen, bei denen immer mehr Elemente miteinander verschmelzen und schwerere Elemente bilden, wird in Sternen Energie freigesetzt.

Betrachten wir die interessanteste Fusionsreaktion, die auch am einfachsten herbeizuführen ist: die Deuterium–Tritium–Fusionsreaktion, kurz **D-T-Fusion**.

$$^{2}_{1}H^{+} + ^{3}_{1}H^{+} \rightarrow ^{4}_{2}He^{2+} + n + 17.6\ MeV$$

Bei dieser Reaktion verschmelzen zwei Wasserstoffisotope, Deuterium (ein Proton, ein Neutron) und Tritium (ein Proton, zwei Neutronen) und formen einen Heliumkern. Dabei werden ein freies Neutron und eine enorme Energiemenge freigesetzt: 17,6 MeV (MeV = Mega-**Elektronenvolt**.) Das Elektronenvolt (eV) ist eine Energieeinheit wie das **Joule** (J), die häufig bei nuklearen und atomaren Prozessen verwendet wird.

Ein Elektronenvolt ist sehr klein:
1 eV = 1,602 × $10^{-19}$ J. Vor diesem Hintergrund mag die Energiemenge von 17,6 MeV nicht besonders groß wirken ($10^{-19}$ = 0,00000000000000000001, 17,6 MeV

Anmerkung

## Elektronenvolt

Elektronenvolt klingt nach einer merkwürdigen Einheit, aber sie eignet sich sehr gut für atomare Prozesse. Da atomare Prozesse in einem ziemlich kleinen Maßstab ablaufen, haben wir es mit sehr kleinen Energiemengen zu tun. Daher ist eine kleinere Einheit hier viel einfacher zu verwenden (alles in Joule aufzuschreiben ist einfach zu umständlich). Bei der Wahl einer kleineren Einheit ist es am besten, etwas zu wählen, das einfach und genau messbar ist und gleichzeitig einen Bezug zu den Prozessen hat, für die wir eine passende Einheit brauchen.
Da die Energie von Atomteilchen vor allem mit ihrer Bewegung zusammenhängt, ist die Energie, die ein Teilchen gewinnt, wenn wir es beschleunigen, eine naheliegende Wahl. Geladene Teilchen lassen sich am einfachsten beschleunigen (mit Hilfe einer Potenzialdifferenz), und Elektronen spielen bei atomaren Prozessen eine äußerst wichtige Rolle. 1 Elektronenvolt (eV) ist also die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es um eine Potentialdifferenz von 1 Volt (V) beschleunigt wird (ausgehend von der Ruhelage im Vakuum). Ein Elektron mit der Ladung e, das über einen Potenzialunterschied von 1 V beschleunigt wird, liefert also 1 eV.
Zum Vergleich: Wenn wir eine AA-Batterie (die etwa 1,5 V liefert) verwenden würden, um ein Elektron (in einem Vakuum, ausgehend von der Ruhelage) zu beschleunigen, bekämen wir ein Elektron mit einer Energie von: Ladung × Spannung = 1 e × 1,5 V =1,5 eV.

$= 2{,}82 \times 10^{-12}$ J oder 0,00000000000282 J), aber für zwei Kerne ist sie enorm. Da die Kerne sehr klein sind und sich in einer geringen Menge Kern„brennstoff“ sehr viele davon befinden, ist die **Energiedichte** (die Energie pro Volumeneinheit) ausgesprochen hoch. Die Energiefreisetzung bei der Fusionsreaktion aus einem Liter Deuterium–Tritium–Brennstoffgemisch ist viel höher als bei der Verbrennung von einem Liter Benzin: etwa 10 Millionen Mal!

Dieses Prinzip gilt für alle Kernreaktionen, ob Spaltung oder Fusion. Deswegen ist Kerntechnik so nützlich für die Energiefreisetzung – aber leider auch für böse Absichten, wie sich im Zweiten Weltkrieg mit der Atombombe (die auf dem Prinzip der Kernspaltung basiert) und in den 1950er Jahren mit der Wasserstoffbombe (eine Kombination aus Kernspaltung und Kernfusion) gezeigt hat.

## Zurück auf die Erde

Nun verstehen wir das Funktionsprinzip der Sonne: Die Schwerkraft erzeugt nach innen gerichteten Druck und die Energie, die bei Fusionsreaktionen im Kern der Sonne freigesetzt wird, erhitzt den Kern, der sich daraufhin ausdehnt und Druck nach außen ausübt. Das Gleichgewicht zwischen dem inwärtigen und dem auswärtigen Druck sorgt dafür, dass die Sonne nicht durch die Schwerkraft kollabiert oder durch die bei den Fusionsreaktionen freigesetzte Energie explodiert. Seit die Menschheit das Funktionsprinzip der Sterne verstanden hat, versucht man zum Zweck der Energiegewinnung diesen Prozess auf der Erde nachzuahmen. Das Problem ist jedoch, dass selbst die ganze Erdkugel viel zu klein ist, um Fusionsreaktionen so ablaufen zu lassen wie in der Sonne. Man muss eine extrem starke Schwerkraft mit künstlichen Mitteln herbeiführen. Glücklicherweise hat man bereits mehrere Möglichkeiten gefunden, um Fusionsreaktionen auf der Erde auszulösen. Am häufigsten wird dafür ein sogenanntes „**Plasma**“ erzeugt und mit sehr starken Magneten unter Kontrolle gebracht. Um herauszufinden, wie sich Fusionsreaktionen auf der Erde am besten herbeiführen lassen, muss zunächst geklärt werden, welche Bedingungen dafür erfüllt sein müssen.

## Kriterien für eine Fusionsreaktion

In der Sonne werden Fusionsreaktionen durch den enormen Druck der Schwerkraft ermöglicht. Dieser Druck entsteht durch zwei Faktoren: Temperatur und Dichte. Beide spielen eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Fusionsreaktionen. Man kann sich das theoretisch so vorstellen, wie wenn zwei positiv geladene Teilchen in einer Kiste gefangen sind.

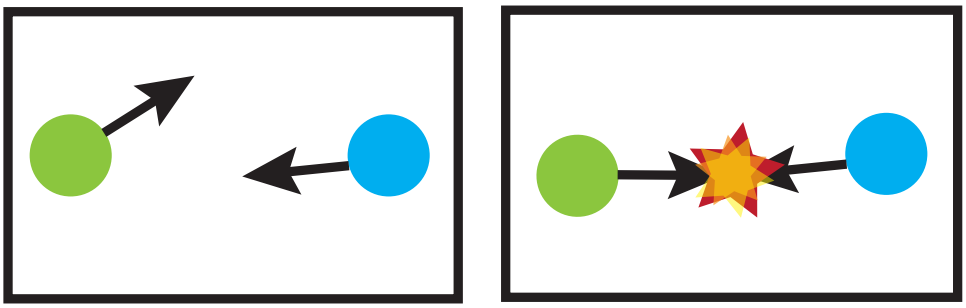


Abbildung 6. Zwei positiv geladene Teilchen, die in einem Kasten herumflitzen. Bei ausreichend hoher Geschwindigkeit wird die Abstoßung zwischen den Teilchen überwunden, so dass sie sich berühren.

Die beiden Teilchen stoßen sich aufgrund ihrer Ladung gegenseitig ab. Diese Abstoßung hängt vom Abstand zwischen den Teilchen ab: Sind sie nah beieinander, stoßen sie einander stark ab, während die Abstoßung bei größerem Abstand schnell ziemlich schwach wird. Natürlich entfernen sich die Teilchen so weit wie möglich voneinander, aber da sie sich in einem Kasten befinden, stoßen sie an der Wand an. Wenn die Teilchen nahe genug zusammenkommen, können sie verschmelzen. Nehmen wir an, dass die beiden Teilchen, sobald sie sich berühren, automatisch zu einem neuen, größeren Teilchen verschmelzen. Damit das passiert, muss man die Teilchen irgendwie zusammenbringen: Die Abstoßung muss durch Kraftaufwand überwunden werden. Da die Abstoßung umso stärker wird, je näher sich die Teilchen kommen, ist das keine einfache Aufgabe. Aber wenn die Teilchen schnell herumwirbeln, kann das bewirken, dass sie zusammenstoßen und miteinander verschmelzen.

Kehren wir zu den beiden Teilchen zurück, die wir nun mit hoher **Geschwindigkeit** in der ansonsten leeren Kiste herumfliegen lassen: Wir verleihen ihnen **kinetische Energie**. Die Teilchen prallen an den Wänden ab und wirbeln ziellos durch die Kiste. Wenn sie sich

einander nähern, werden sie durch die Abstoßungskraft auseinander gedrängt. Wenn die Teilchen jedoch schnell genug sind, reicht die Abstoßungskraft nicht mehr aus, um sie auseinander zu halten. Das kann dazu führen, dass sie aufeinanderprallen und miteinander verschmelzen, sobald sie sich berühren. Bei dieser Kollision entsteht für einen kurzen Moment hoher Druck, der die herumwirbelnden Teilchen zusammenpresst.

Hier ist der Zusammenhang zwischen kinetischer Energie und Temperatur wichtig. Die Temperatur ist ein Maßstab für die **durchschnittliche Wirbelbewegung beziehungsweise Schwingung einer Teilchenmenge**.

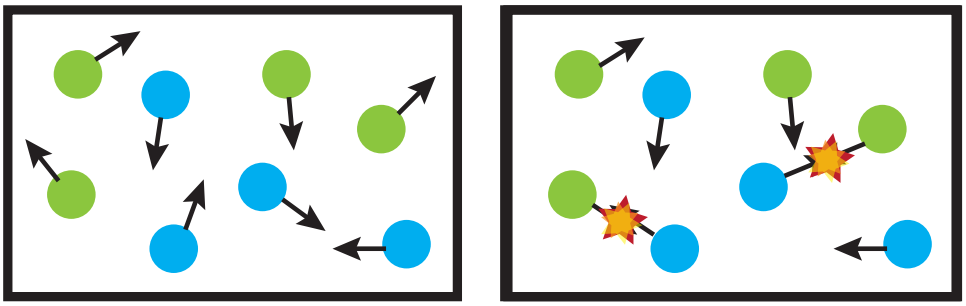


Abbildung 7. Ein Kasten ist mit vielen positiv geladenen Teilchen gefüllt, die sich alle mit hoher Geschwindigkeit bewegen. Bei ausreichend hohem Tempo können die Teilchen die Abstoßung überwinden und kollidieren. Je mehr Teilchen es sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes.

In unserem theoretischen Szenario mit den beiden Teilchen in der Kiste wurden diese sehr stark beschleunigt. Das führt zu einer hohen Durchschnittsgeschwindigkeit und somit einer starken Erhitzung der Teilchen(menge). Durch Aufheizen der Teilchen kann also ihre Durchschnittsgeschwindigkeit beschleunigt werden, und wenn sie sich schnell genug bewegen, kann die Fusion zustandekommen.

Wenn sich jedoch nur zwei sehr kleine Teilchen in einer Kiste befinden, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie zufällig zusammenstoßen und verschmelzen, sehr gering. Also muss man der Fusion auf die Sprünge helfen, indem man mehr Teilchen in die Kiste steckt. Solange sich alle Teilchen schnell genug bewegen, erhöht sich bei einer größeren Menge die Chance auf Fusion. Die Vermehrung der Teilchen in der (sonst unveränderten) Kiste führt zu einer höheren Teilchendichte. Um Fusion zu erreichen, **empfiehlt sich daher eine Kombination aus hoher Dichte und hoher Temperatur**. Dies ist im Inneren der Sonne zu beobachten, wo die Dichte hoch und die Temperatur auch nicht gerade niedrig ist. Es ist also diese

Kombination aus hoher Dichte und hoher Temperatur, die zu den extremen Bedingungen führt, die für Fusionsreaktionen im Inneren der Sonne erforderlich sind.

An dieser Stelle muss man betonen: Wir brauchen einen Kasten, damit das Ganze funktioniert! Wenn die Teilchen nicht eingeschlossen sind, kann es nicht zu Kollisionen kommen. Hier kommt die **Einschlusszeit** ins Spiel. Wenn über einen längeren Zeitraum hinweg eine ausreichend hohe Dichte und Temperatur besteht, erhält man mehr Fusionsenergie. Allerdings wird unsere Teilchenmenge nicht einfach so ihre Temperatur beibehalten: Sie wird schnell abkühlen, wenn man sie nicht isoliert. Wir müssen also die Energie in unserer Kiste, unserem Fusionsreaktor, „einschließen". Andernfalls wird der Reaktor schnell abkühlen. Das funktioniert so ähnlich wie das Heizen von Räumen: Wenn bei sehr niedrigen Außentemperaturen das Fenster geöffnet ist, muss man viel stärker heizen, um die gewünschte Raumtemperatur zu halten. Dabei wird viel Energie verschwendet. Um viele Fusionsreaktionen zu ermöglichen, muss die Energie bei hoher Temperatur im Raum eingeschlossen werden. Eine lange Einschlusszeit führt dazu, dass die Energie länger im Raum verbleibt und somit auch die Chance auf Fusionsreaktionen größer ist.

## Fusion auf der Erde

Im Kern der Sonne sind die Teilchen sehr fest eingeschlossen, aber auf der Erde reicht dazu die Schwerkraft nicht aus. Daher muss man die Energie auf andere Weise einschließen, um bei sparsamem Energieaufwand die Bedingungen für möglichst viele Fusionsreaktionen zu schaffen. Vorteilhaft ist, dass bei jeder dieser Fusionsreaktionen eine große Menge Energie entsteht. Diese Energie wird nicht in Form von Licht freigesetzt, sondern als kinetische Energie der Teilchen, die bei einer Fusionsreaktion entstehen. Dadurch bilden sich immer noch schnellere Teilchen, die zur Steigerung der Gesamttemperatur beitragen und die Reaktion aufrechterhalten können.

Da wir die Schwerkraft nicht nutzen können, um eine ähnlich hohe Teilchendichte und Temperatur zu erzeugen, wie sie im Inneren der Sonne vorherrschen, muss man andere Wege finden, um solche extremen Bedingungen herbeizuführen

und die erzeugte Energie einzuschließen. Nur so kann in künstlichen Fusionsanlagen die Teilchenverschmelzung gelingen.

# 1.3 Plasma

Wie bereits erwähnt, wird Fusion auf der Erde in der Regel mit Hilfe eines Plasmas erzeugt. In diesem Abschnitt wird erörtert, was ein Plasma ist und wie es für die Fusion verwendet wird.

## Erwärmung des Brennstoffs

Wie bereits erwähnt, ist **Temperatur ein Maß für die Energie**: Sie gibt Aufschluss über die durchschnittliche Geschwindigkeit, mit der sich Teilchen bewegen beziehungsweise schwingen. Je höher die Temperatur ist, desto schneller ist die Bewegung oder Vibration. Dies gilt für Materie in allen Phasen: **Festkörper**, **Flüssigkeiten** und **Gase**. Wenn ein fester Gegenstand, z. B. ein Stück Metall, erhitzt wird, beginnen die Atome mit höherer

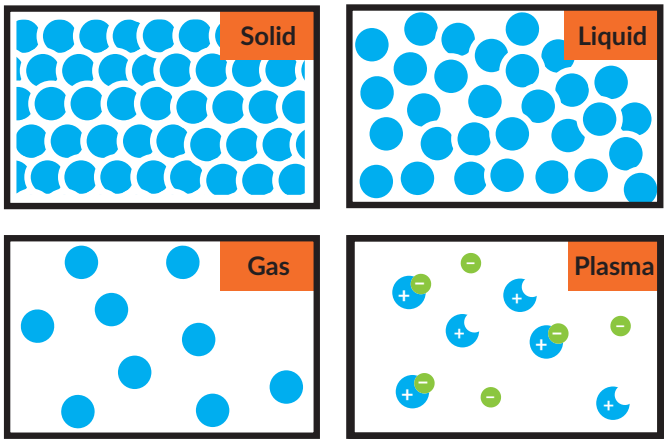



Abbildung 8. Eine schematische Darstellung von den drei Materiephasen und einem Plasma. Alle Teilchen bewegen sich oder schwingen: Die durchschnittliche Geschwindigkeit hängt von der Temperatur der Materie ab. Die durchschnittliche Bewegung der Teilchen nimmt zu, wenn die Materie erhitzt wird. In einem Festkörper ist die Teilchenbewegung sehr eingeschränkt. In einer Flüssigkeit können sich die Teilchen schon freier bewegen und in einem Gas können sich die Teilchen (fast) völlig frei bewegen. Wenn ein Gas auf ausreichend hohe Temperaturen erhitzt wird, beginnt es zu zerfallen: Es bildet sich ein Plasma, das aus einzelnen geladenen Teilchen besteht.

Frequenz zu vibrieren. Ein Festkörper ändert dadurch seine Form nicht wesentlich; das Metallstück dehnt sich ein wenig aus, bleibt aber im Wesentlichen gleich. Wenn es heiß genug wird, beginnt die makroskopische (= mit dem Auge beobachtbare) Struktur des Metallstücks zu zerfallen. Die Teilchen bewegen sich schneller und die Objekte verlieren ihre Struktur: Sie schmelzen. Wenn es noch heißer wird, kann die makroskopische Struktur, die nun flüssig ist, noch weiter zerfallen: Sie kann zu einem Gas werden. Bei diesem Phasenübergang von flüssig

zu gasförmig werden die Bindungen zwischen den Atomen vollständig aufgelöst und die Teilchen beginnen frei umherzufliegen. Die einzigen Wechselwirkungen zwischen den Gasteilchen sind Zusammenstöße.

Dieser Prozess des Übergangs von fest zu flüssig zu gasförmig (oder umgekehrt) wird als **Phasenwechsel** bezeichnet. Die Temperatur, bei der ein Phasenwechsel stattfindet, hängt von der Art der Atome und der Art der Bindungen zwischen ihnen ab. Manche Stoffe beginnen schon bei niedrigen Temperaturen zu schmelzen (Schokolade, Kerzen), während andere, wie Metalle, erst bei sehr hohen Temperaturen schmelzen. Einige Arten von Materie sieden sogar bei so niedrigen Temperaturen, dass sie in der Natur nur in der Gasphase vorkommen: z. B. der Sauerstoff in der Atemluft, der bereits bei der extrem niedrigen Temperatur von –183 °C zu sieden beginnt.

Unser Fusionsbrennstoff besteht wohlgemerkt aus Deuterium und Tritium, zwei verschiedenen Wasserstoff-Isotopen. Wasserstoff ist bereits bei Raumtemperatur gasförmig. Die Dichte eines Materials hängt auch mit seiner Phase zusammen: Wird ein Material geschmolzen, entsteht im Allgemeinen mehr Raum zwischen den Teilchen: Das Volumen nimmt zu, während die Anzahl der Teilchen gleich bleibt. Das führt zu einer geringeren Dichte. Daher haben wir bei gasförmigen Brennstoffen im Allgemeinen eine geringe Dichte. **Um Fusionsbedingungen zu erreichen, müssen wir das Gas also auf sehr hohe Temperaturen erhitzen.**

## Ionisierung

Unser Brennstoff ist also ein Gas, das auf extreme Temperaturen erhitzt werden muss. Aber was passiert, wenn ein Gas immer weiter erhitzt wird? Verhält es sich dann ähnlich wie eine Flüssigkeit und beginnt sozusagen zu „kochen“? Das könnte man so sagen: Wenn Gase heiß genug werden, kommt es zu einer Art **Zerfall**. Dieser Prozess unterscheidet sich kaum von dem des Schmelzens oder Siedens, bei dem sich die Bindungen zwischen Atomen und Molekülen auflösen. Hier zerfallen nun die Bindungen im Inneren eines Atoms, die Bindungen zwischen dem Kern und den Elektronen.

Dieser Zerfall tritt ein, sobald ein Gas so stark erhitzt wird, dass die Energie des Atoms eine bestimmte Schwelle, die so genannte **Ionisierungsenergie**, überschreitet. Das Atom beginnt zu zerfallen, so dass der Kern ein oder mehrere Elektronen verliert: Das Atom wird zu einem Ion. Dieser Vorgang wird als **Ionisierung** bezeichnet. Da die meisten Atome mehrere Elektronen haben, können sie auch mehr als nur ein Elektron verlieren. Bei Verlust aller Elektronen wird das Ion vollständig ionisiert und es bleibt ein positiver Kern ohne Elektronen übrig. Sobald ein Gas beginnt, in Ionen

Abbildung 9. Beispiele für Plasmen. Von oben nach unten und von links nach rechts sehen wir die Aurora Borealis (Nordlichter), ein Neonschild, einen Blitz, eine experimentelle Plasmaentladung, die Sonne und eine Entladung im sphärischen Tokamak MAST. Credits: NASA, Pixabay/Pexels, Pixa-bay/FelixMittermeier, Plasmalab TU Eindhoven/J.P.K.W. Frankemölle, NASA/Solar Dynamics Observatory & CCFE.

und Elektronen zu zerfallen, spricht man von einem Plasma. **Ein Plasma ist also ein ionisiertes Gas, das aus freien positiven Ionen und freien negativen Elektronen besteht**. Normalerweise sind in einem Plasma nicht alle Atome ionisiert. Wenn alle Atome ionisiert sind, spricht man von einem vollständig ionisierten Plasma. Es dürfte keine Überraschung mehr sein, dass die Sonne kein Gasball ist: Sie ist ein großer Plasmaball!

## Wo findet man Plasmen?

„Klingt schwierig, diese Plasmen zu erzeugen“, könnte man meinen. Doch Plasmen sind die häufigste Form von Materie im Universum. Die meisten Objekte im Weltraum – Sterne, Nebel und was es dort noch so gibt – befinden sich in einem Plasmazustand. Auf der Erde sind Plasmen nicht so verbreitet, aber man kann sie dennoch häufig beobachten. Blitze sind Plasmen, die Nordlichter am Himmel des hohen Nordens sind Plasmaphänomene, und je nach der genauen Definition eines Plasmas können auch (heiße) Flammen als Plasmen gelten. Aufgrund der Häufigkeit von Plasmen in der Natur wird Plasma manchmal als vierter Aggregatzustand bezeichnet.

Nicht nur in der Natur, sondern auch in der Industrie sind Plasmen häufig anzutreffen. Plasmen kommen überall zum Einsatz: ob bei der Desinfektion von Operationsbesteck im Krankenhaus oder bei der Herstellung von neuen Computerchips, Solarpaneelen oder den neusten Smartphones. Es gibt viele verschiedene Möglichkeiten, Plasmen zu erzeugen, z. B. durch elektromagnetische Wellen (wie die, die in einem Mikrowellenherd erzeugt werden!).

**Unterrichtsübung 1.3**

Der Unterschied zwischen einem Plasma und einem Gas liegt also darin, dass die meisten Teilchen geladen oder neutral sind. Bei den meisten Plasmen kann man jedoch ein Glühen beobachten, während Gase oft farblos sind und definitiv nicht glühen. Warum also glühen Plasmen?

[Mehrfachauswahl]

(A) Bei einer ausreichend hohen Temperatur fängt alles an zu strahlen, daher glühen Plasmen aufgrund der hohen Temperatur.

(B) Die geladenen Teilchen bewegen sich frei und sobald ein freies Elektron und ein Ion zusammenstoßen, besteht die Möglichkeit, dass sie zu einer Einheit rekombinieren. Bei diesem Rekombinationsprozess verbinden sich die geladenen Teilchen zu einem neutralen Teilchen und es wird Licht ausgesendet. Wenn das emittierte Licht im sichtbaren Spektrum liegt, beginnt das Plasma zu leuchten.

(C) Bei einigen Kernreaktionen wird Licht ausgestrahlt. Wenn das emittierte Licht im sichtbaren Spektrum liegt, beginnt das Plasma zu leuchten.

Anmerkung

## Blitze

Aufgrund der Leitfähigkeit des Plasmas lassen sich Blitze erklären: Ein Blitz ist ein enormer elektrischer Strom zwischen einer geladenen Wolke und der Erdoberfläche oder zwischen zwei unterschiedlich geladenen Wolken. Durch den Ladungsunterschied zwischen der Wolke und der Oberfläche beginnt das Gas in der Nähe der Wolke zu zerfallen und es bildet sich ein Plasma, das die Ladung leiten kann. Sobald die Ladung von der Wolke auf die Erde übertragen wurde, hört die Übertragung auf und der Blitz verschwindet. Das alles passiert im wahrsten Sinne des Wortes blitzschnell.

## Difference between a gas and a plasma

„Was ist nun der Unterschied zwischen einem Gas und einem Plasma, abgesehen von dem ausgefallenen Namen?“ Der Hauptunterschied besteht darin, dass ein Plasma aus Ionen und Elektronen besteht, also aus geladenen Teilchen, während ein normales Gas nur aus neutralen Atomen besteht. In einem Plasma haben wir also **frei bewegliche Ladungen**. Das bedeutet, dass ein Plasma **Ströme** führen kann und **elektrisch leitfähig** ist, genau wie ein Metalldraht. Neben der Leitfähigkeit ist eine weitere wichtige Eigenschaft von Plasmen, dass sie **empfindlich auf elektrische und magnetische Felder reagieren**.

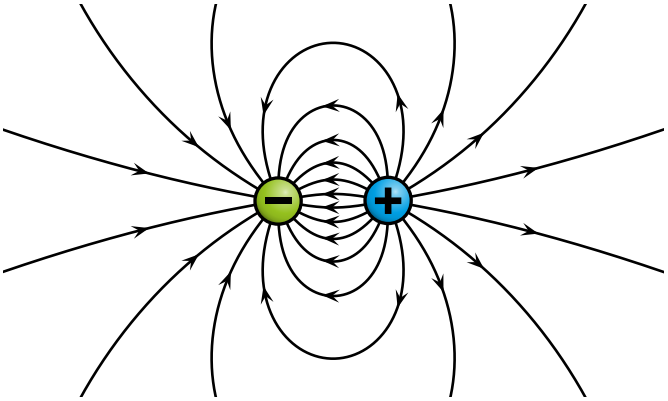


Abbildung 10. Eine schematische Darstellung des elektrischen Feldes zwischen einem positiv und einem negativ geladenen Teilchen. Es ist eine Reihe von elektrischen Feldlinien eingezeichnet. Beachte, dass die Feldlinien von positiv nach negativ verlaufen. Übernommen aus: Wikimedia Commons/Geek3.

## Elektrische und magnetische Felder

**Elektrische Felder** geben Aufschluss darüber, wie ein geladenes Objekt andere geladene Objekte in seiner Umgebung beeinflusst. Ein geladenes Teilchen

zieht andere geladene Teilchen an oder stößt sie ab, je nachdem, ob sie die gleiche (++/ −−) oder entgegengesetzte (+−/−+) Ladungsart haben. Wie stark die geladenen Teilchen aufeinander einwirken, hängt von den Abständen zwischen ihnen ab. Angenommen, ein geladenes Teilchen ist im Raum fixiert und man

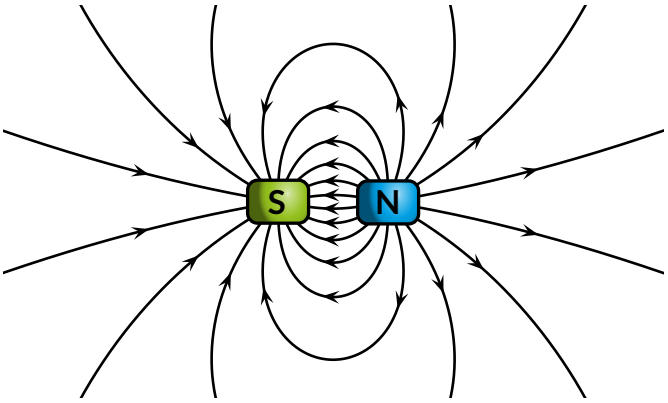



Abbildung 11. Schematische Darstellung eines magnetischen Feldes zwischen zwei „Magnetpolen“. Die Skizze zeigt eine Reihe von Magnetfeldlinien. Beachte, dass die Feldlinien von „Norden“ nach „Süden“ verlaufen. In Wirklichkeit verlaufen die Magnetfeldlinien durch die „Magnetpole“ und bilden geschlossene Schleifen. Übernommen von: Wikimedia Commons/Geek3.

platziert ein imaginäres Teilchen – ein „**Versuchsteilchen**“ – in dessen Nähe: Dann wäre die Wechselwirkung zwischen den beiden Teilchen stark (entweder zieht das fixierte Teilchen das andere Teilchen an oder stößt es ab). Das bedeutet, dass das elektrische Feld des fixierten Teilchens an der Stelle stark ist, an der wir das imaginäre Teilchen platziert haben. Würden wir ein imaginäres Teilchen weit weg platzieren, wäre es immer noch beeinflusst, wenn auch nur sehr schwach: Der Einflussbereich des elektrischen Felds des fixierten Teilchens wird mit zunehmendem Abstand immer schwächer.

Wenn wir uns solche „Testteilchen“ im gesamten Umfeld des fixierten Teilchens vorstellen, können wir uns ein Bild von der Stärke der Wechselwirkung an allen Orten im Raum machen: Wir nennen dies das elektrische Feld. Wir können vom Teilchen ausgehend Linien zeichnen, die in alle Richtungen nach außen verlaufen und sich nie kreuzen: die **elektrischen Feldlinien**. So kann man sich das Feld bildlich vorstellen, denn wenn die Feldlinien nahe beieinander liegen, ist das elektrische Feld stark, und wenn sie weit voneinander entfernt liegen, ist das Feld schwach. Die elektrischen Feldlinien verlaufen immer von der positiven zur negativen Ladung.
Ein **Magnetfeld** kann man sich ähnlich vorstellen, wobei hier statt positiven und negativen Ladungen

zwei „Magnetpole“, nämlich Nord und Süd, aufeinander wirken. Zwei gleiche Pole stoßen sich gegenseitig ab, während zwei unterschiedliche Pole einander anziehen. Noch realistischer lässt sich ein Magnetfeld mithilfe von Feldlinien – hier nun **Magnetfeldlinien** – darstellen, die immer geschlossene Schleifen formen. Wenn sie durch einen (magnetischen) Körper verlaufen, bildet ihr Austrittspunkt quasi den Nordpol und ihr Eintrittspunkt quasi den Südpol. Liegen sie außerhalb des magnetischen Körpers, verlaufen die Feldlinien dann von „Nord nach Süd“. Dass Magnetfelder auch im Vakuum

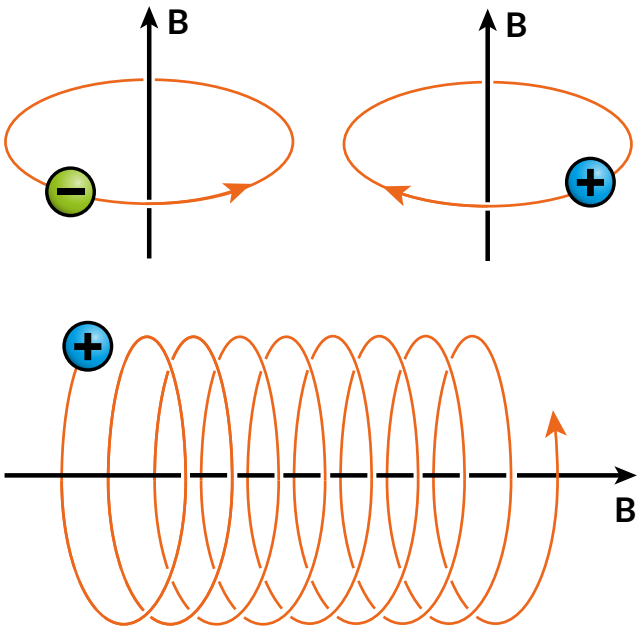



Abbildung 12. Bewegung eines (negativ oder positiv) geladenen Teilchens in einem Magnetfeld. Wenn sich das Teilchen senkrecht zum Magnetfeld bewegt, beginnt es, die Magnetfeldlinie zu umkreisen. Wenn das Teilchen auch eine Geschwindigkeit in Richtung des Magnetfeldes hat, folgt es einer spiralförmigen Bahn um die Magnetfeldlinie. Diese kreisförmige/spiralförmige Bewegung um die Magnetfeldlinie wird als Ladungsbewegung bezeichnet.

**Unterrichtsübung 1.4**

Die Richtung des Magnetfeldes (d.h. die Richtung der Magnetfeldlinien) hängt von der Richtung der bewegten Ladungen ab. Zeichne die Richtung des magnetischen Feldes ein, indem du mehrere Magnetfeldlinien für die folgenden Situationen zeichnest:

(a) Ein gerader Draht, durch den ein Strom fließt.
(b) Eine kreisförmige Drahtschleife, durch die ein Strom gegen den Uhrzeigersinn 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 zur Richtung der Bewegung im Allgemeinen sagen?

Siehe auch die Übungen: A.9, A.10.

existieren können bedeutet, dass eine Magnetfeldlinie nicht unbedingt durch einen magnetischen Körper verlaufen muss. Ein Magnetfeld kann auch ohne Nord- und Südpol existieren.

## Geladene Teilchen in einem Magnetfeld

Wenn ein geladenes Teilchen in ein Magnetfeld eintritt, beginnt es, um die Magnetfeldlinien zu **kreisen**. Diese durch das Magnetfeld hervorgerufene Bewegung, die so genannte **Ladungsbewegung**, ist sehr nützlich! Um eine ausreichend heftige Kollision für die Teilchenfusion herbeizuführen, sind extrem hohe Temperaturen nötig. Es muss also ein Plasma erzeugt und sehr stark erhitzt werden. Das Problem dabei ist, dass es kein Material gibt, das einen Einschluss des Plasmas bei so hohen Temperaturen ermöglicht: Würde das Plasma die Innenwand des Gefäßes berühren, würde dieses zu schmelzen beginnen und das heiße Plasma abkühlen. Hier zeigt sich der Nutzen der Magnetfelder: Mithilfe von Magnetkraft kann das Plasma von den Gefäßwänden ferngehalten und das Plasma in einem Schwebezustand gehalten werden, um das Schmelzen der Fusionsmaschine und das Abkühlen des Plasmas zu verhindern. **Magnetfelder ermöglichen den Einschluss des Plasmas.**

1.4

# Konstruktion einer Fusionsmaschine

Jetzt haben wir die Grundkenntnisse für den Bau einer Fusionsmaschine! Wir haben uns mit Kernfusionsreaktionen befasst und verstehen, wie Fusion in der Sonne zustandekommt und welche Kriterien dafür erfüllt sein müssen: Ein sehr hoher Druck muss möglichst lang aufrechterhalten werden. Dieser hohe Druck entsteht durch ein Zusammenspiel aus Teilchendichte und Temperatur. Im Inneren der Sonne wird der hohe Druck auf natürlichem Wege durch die Schwerkraft erzeugt. Auf der Erde muss eine Alternative gefunden werden.

Am meisten hat sich die Methode bewährt, in einem Gefäß ein Plasma zu erzeugen, es mithilfe eines Magnetfelds dort in Position zu halten und ausreichend lange unter extremen Temperaturen Druck zu erzeugen, der  Fusionsreaktionen hervorruft. Die meisten Vorhaben auf der Welt zur Gewinnung von Energie durch

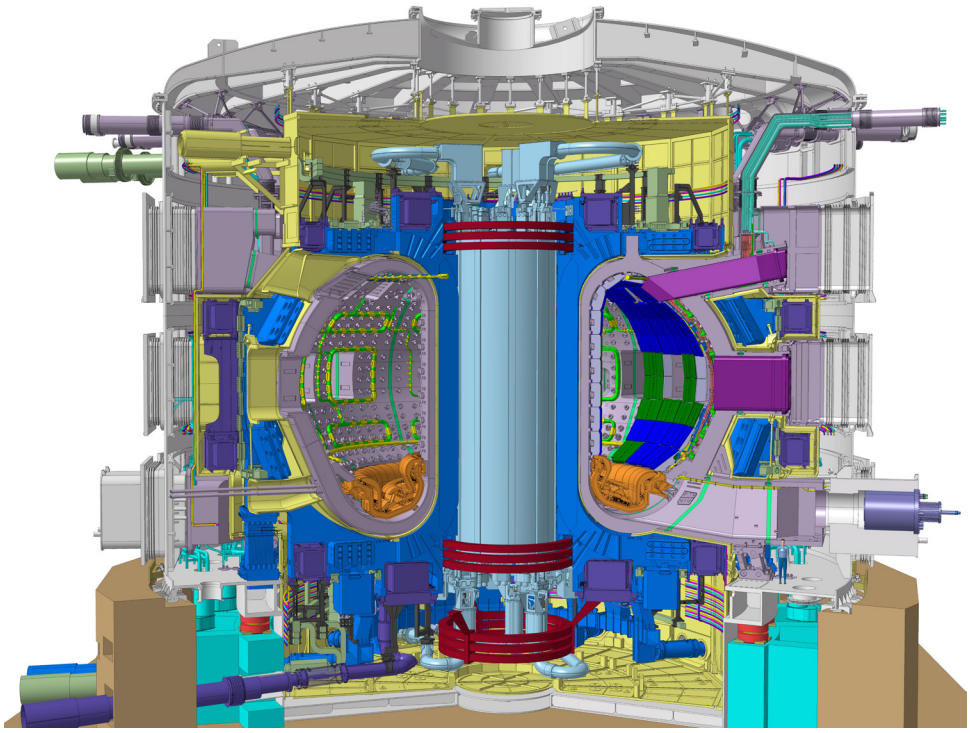


Abbildung 13. Schema des ITER-Tokamaks, der derzeit in Südfrankreich gebaut wird. In der Skizze sind die toroidalen Feldspulen (dunkelblau), die poloidalen Feldspulen (dunkelviolett) und der zentrale Solenoid (hellblau, in der Mitte) zu sehen. Credit: ITER Organization, https://www.iter.org.

Kernfusion basieren auf dem magnetischen Einschluss des Plasmas bei extrem hohen Temperaturen. Diese Methode wird als **Magnetfusion** bezeichnet.

Da wir nun wissen, dass Magnete zum Einschluss eines Plasmas verwendet werden können, wollen wir uns genauer ansehen, was dies für eine magnetische Fusionsanlage bedeutet. Werfen wir zunächst einen Blick auf die gängigste Konstruktion: den Tokamak.

## Der Tokamak

Das Wort Tokamak stammt aus dem Russischen: Es ist ein Akronym, das für „toroidale Kammer mit Magnetspulen“ oder „toroidale Kammer mit axialem Magnetfeld“ stehen kann. Und genau das ist es auch: eine Kammer in Form eines Donuts, die von Magnetspulen umgeben ist und ein Plasma einschließen kann. Im Inneren des „Donuts“ herrscht ein Vakuum, in das man Fusionsbrennstoff (Wasserstoffgas) injiziert, welches sich dann unter Hitzeeinwirkung (normalerweise mit Hilfe von Radiowellen) in ein Plasma verwandelt. Dieses Plasma wird von den Magneten rund um die donutförmige Kammer (je nach Anlage manchmal auch teilweise innerhalb der Kammer) in Position gehalten.

**Unterrichtsübung 1.5**

Verschiedene Tokamaks und toroidale Fusionsanlagen haben unterschiedliche Seitenverhältnisse: das Verhältnis zwischen dem großen Radius R und dem kleinen Radius a. Daher können die Formen dieser Tori sehr unterschiedlich sein. Schauen wir uns diese verschiedenen Formen genauer an.

(a) Fertige eine Skizze eines Torus mit einem hohen Wert des großen Radius und einem niedrigen Wert des kleinen Radius an. Wie sieht das aus?
(b) Mach jetzt eine Skizze von einem Torus mit einem niedrigen Wert des großen Radius und einemhohen Wert des kleinen Radius. Warum ist das schwieriger zu zeichnen?
(c) Was würde passieren, wenn du den großen Radiusimmer kleiner machst und den kleinen Radius groß lässt? Welche Form erhältst du dann?
Schau dir jetzt die Seitenverhältnisse der beiden Skizzen aus (a) und (b) an.
(d) Was passiert, wenn sich das Seitenverhältnis ändert?

**Unterrichtsübung 1.6**
Wie wir gesehen haben, gibt es in einem Torus zwei Hauptrichtungen: die toroidale und die poloidale Richtung. Das kann ziemlich verwirrend sein, also schauen wir uns die Sache mal genauer an.

(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 ihren jeweiligen Querschnitten auf?

## Geometrie eines Tokamaks

Bevor wir uns die verschiedenen Magnetsysteme eines herkömmlichen Tokamaks ansehen, wollen wir zunächst einen Blick auf die Geometrie der donutförmigen Kammer werfen, die man als Torus bezeichnet.

Eine elegante Möglichkeit ist, sich einen Torus mit zwei Konstanten und zwei Koordinatenvariablen vorzustellen: dem **großen Radius R**, dem **kleinen Radius a**, dem **Poloidalwinkel θ** (theta) und dem **Toroidalwinkel φ** (phi). Ein Beispiel für einen Torus ist in Abbildung 16 zu sehen, die ebenfalls alle diese Variablen enthält.

Der große und der kleine Radius sind die Radien der beiden verschiedenen Kreise, die man in einem Torus entdecken kann: Der Radius vom Mittelpunkt des „Lochs“ in der Mitte des „Donuts“ zum Mittelpunkt des kleineren Kreises des Donuts wird als großer Radius R bezeichnet, während der Radius des kleineren Kreises des Donuts als kleiner Radius a bezeichnet wird. In der Realität ist der kleinere „Kreis“ des Donuts in modernen Tokamaks oft

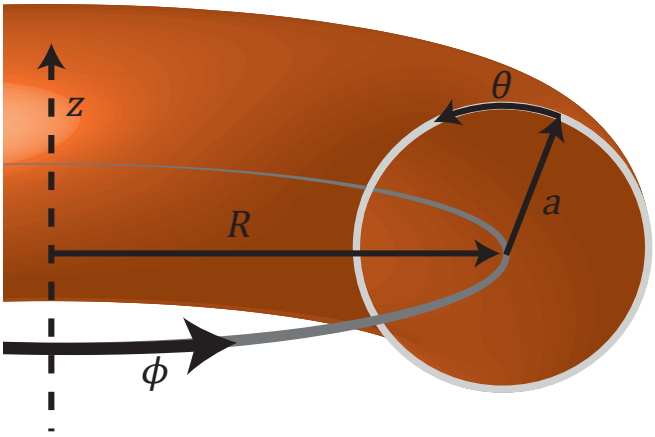



Abbildung 14. Schematische Darstellung der Geometrie eines Torus. Zu sehen sind der große Radius (R) und der kleine Radius (a) des Torus sowie die toroidale (ϕ) und die poloidale Richtung (θ). Credit: Jens Peter Frankemölle/TU Eindhoven.

eher dreieckig oder D-förmig. Dies trägt dazu bei, die Leistung des Tokamaks zu verbessern. Ein Beispiel ist in Abbildung 17 zu sehen.

Die anderen beiden Koordinaten sind die poloidalen und toroidalen Koordinaten bzw. der poloidale und toroidale Winkel θ und ϕ. Die toroidale Richtung ist die „lange Umlaufbahn“ des Torus und die poloidale Richtung die „kurze Umlaufbahn“ des Torus. Da der Torus symmetrisch  ist, muss festgelegt werden, wo der Toruswinkel gleich Null ist. Für den Poloidwinkel wird in der Regel der äußerste Punkt des Torus als Poloidwinkel gleich Null genommen.

## Magnetische Spulen

Jetzt, wo wir mit der Geometrie eines Tokamaks besser vertraut sind, wollen wir uns die verschiedenen Magnete eines herkömmlichen Tokamaks und deren Bezeichnungen ansehen. Anschließend werden wir uns damit befassen, warum wir all diese verschiedenen Magnete brauchen, um das Plasma in der donutförmigen Kammer einzuschließen.

Wenn sich geladene Teilchen in einer kreisförmigen Schleife bewegen, entsteht ein Magnetfeld in der Lotrechten (siehe Abbildung 18). Wenn sich geladene

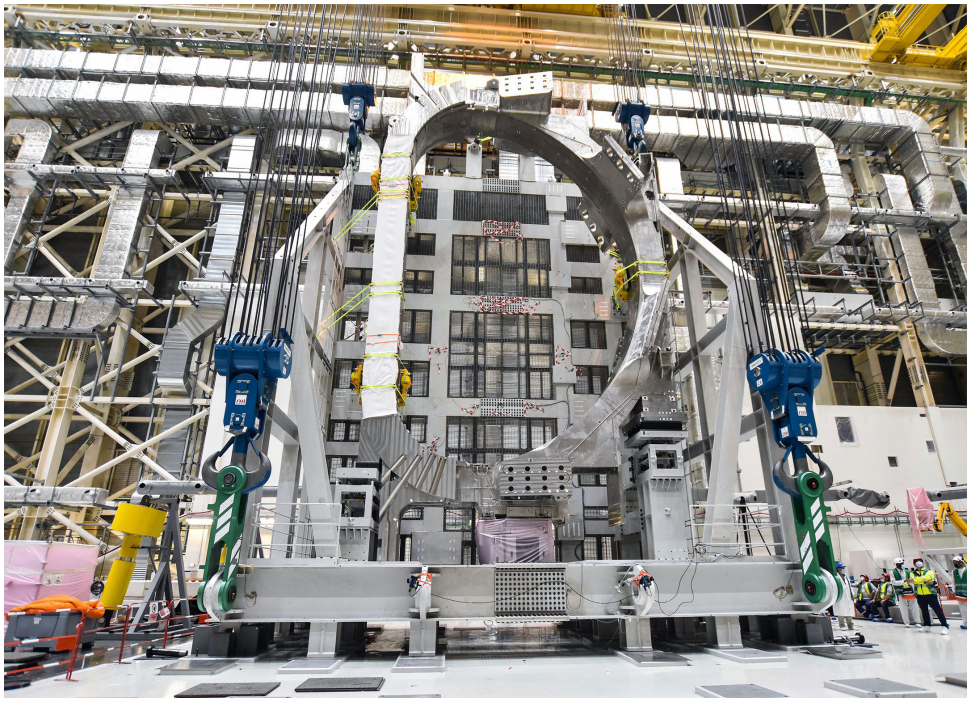


Abbildung 15. Das ist TF12, die erste von achtzehn D-förmigen Toroidalfeldspulen, die um das Vakuumgefäß von ITER angeordnet sind. Dieser 17 m hohe und 9 m breite Riese wurde in Japan hergestellt und  am 9. Juni 2021 in der ITER-Konstruktionshalle platziert. Quelle: ITER Organization, https://www.iter.org.

Anmerkung

## Solenoide

Um die erforderlichen Magnetfelder zu erzeugen, werden elektromagnetische Spulen verwendet. Am Ende des vorherigen Kapitels haben wir gelernt, dass, wenn wir ein geladenes Teilchen in einer geschlossenen Schleife bewegen, das Magnetfeld darin senkrecht zur Bewegung des Teilchens ausgerichtet ist (außerhalb der geschlossenen Schleife läuft es andersherum) und die Richtung des Magnetfeldes davon abhängt, ob das bewegte Teilchen positiv oder negativ geladen ist; siehe Abbildung 12.
Elektronen können sich frei durch Metalle bewegen, also auch durch Metalldrähte. Wenn man Drähte zu einer Spule aufwickelt und Strom hindurchführt, wird die Spule magnetisch und man spricht dann von einer Magnetspule oder einem Solenoid.

Teilchen in einer solchen geschlossenen Schleife bewegen, sprechen wir von einem Strom, dessen Richtung mit der Bewegungsrichtung der positiv geladenen Teilchen übereinstimmt. Wenn ein Strom von Elektronen (oder anderen negativen Teilchen) erzeugt wird, ist die Richtung der Teilchen entgegengesetzt zur Richtung des Stroms. Unter dem Einfluss einer Potenzialdifferenz können sich Elektronen durch einen Metalldraht bewegen. Wenn also ein Strom durch (Metall-)Spulen fließt und diese Spulen richtig angeordnet sind, kann ein Magnetfeld in der gewünschten Richtung erzeugt werden.

In Abbildung 15 ist die Standardmagnetkonfiguration eines Tokamaks zu sehen. Die erste Gruppe von Magneten, die dir wahrscheinlich aufgefallen ist, sind die Magneten, die in Form eines großen D um den Vakuumbehälter angeordnet sind. Das sind die Toroidalfeldspulen. Dann gibt es noch zwei weitere Spulensysteme, die von Bedeutung sind: erstens die gestapelten Spulen in der Mitte des Donut-Lochs, die Transformatorspulen, und dann einige große Magneten, die oben und unten in der Maschine liegen: die Magnetfeldspulen. Diese drei Gruppen von Magneten

sind das Hauptmagnetsystem eines Tokamaks. Normalerweise gibt es einige zusätzliche kleinere Magnete, die die Leistung des Tokamaks verbessern, aber diese sind weniger wichtig und werden hier nicht behandelt. In den nächsten Abschnitten werden wir uns die Transformatorspulen und die zentrale Magnetspule genauer ansehen.

## Toroidalfeldspulen

Für einen stabilen Betrieb der Anlage muss zunächst das Plasma in Torusform gebracht werden. Dazu muss das Plasma in toroidaler Richtung zirkulieren. Da wir nun wissen, wie man die Ausrichtung eines Magnetfelds bestimmt, und wissen, dass geladene Teilchen die Magnetfeldlinie spiralförmig umkreisen, können wir also theoretisch auch geladene Teilchen dazu bringen, sich in einer Schleife in Torusrichtung zu bewegen: Dazu legt man geschlossene Schleifen aus stromführenden Spulen um die Bahn, der die Teilchen folgen sollen. Wenn wir also wollen, dass sich Teilchen in toroidaler Richtung bewegen, müssen wir Magnetspulen um dieses Element wickeln: die Toroidalfeldspulen! Wenn wir viele dieser D-förmigen Spulen um die donutförmige Kammer legen, beginnt das Magnetfeld in Schleifen im Inneren des Donuts zu kreisen. Das toroidale Feld ist das bei Weitem stärkste Magnetfeld im Tokamak.

Das Plasma bewegt sich also in einer toroidalen Richtung. Klingt gut, oder? Aber warum brauchen wir dann überhaupt noch andere Spulen als die Toroidalfeldspulen? Leider wird das Plasma instabil, wenn wir nur ein Magnetfeld in Torusrichtung haben. Man hat herausgefunden, dass eine Kombination aus

**Unterrichtsübung 1.7**
Werfen wir einen Blick auf einen Standard-Tokamak und konzentrieren uns dabei auf die drei Hauptmagnetsysteme.

(a) Welche Magnete befinden sich im poloidalen Querschnitt? Wie werden diese Magnete genannt und macht dieser Name Sinn?
(b) Erkläre die Namen der anderen beiden Magnetenanordnungen.

poloidalem Magnetfeld und toroidalem Magnetfeld dieses Problem lösen kann: Das Ergebnis ist ein spiralförmiges Magnetfeld.

## Transformatorspule und Plasmastrom

Um dieses dringend benötigte spiralförmige Magnetfeld zu erzeugen, dient (indirekt) die Transformatorspule. Die Transformatorspule unterscheidet sich von den anderen Magnetspulen dadurch, dass ihr Ziel nicht darin besteht, ein Magnetfeld zu erzeugen: Sie nutzt das Prinzip der **magnetischen Induktion**, um einen (toroidalen) Strom im Plasma zu erzeugen. Um das Konzept der magnetischen Induktion zu verstehen, müssen wir zunächst auf die magnetischen Feldlinien zurückkommen. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, können wir ein Magnetfeld visualisieren, indem wir Magnetfeldlinien erzeugen, die geschlossene Schleifen bilden. Die **Stärke des Magnetfeldes, B**, hängt direkt mit der **Dichte der Magnetfeldlinien** zusammen. Wenn die Feldlinien dicht beieinander liegen, ist das Magnetfeld in diesem Bereich stark. Wenn die Feldlinien weit auseinander liegen, ist das Magnetfeld in diesem Bereich schwach.

Als Nächstes ist das Konzept des **magnetischen Flusses** wichtig. Der magnetische Fluss ist eine Größe, die für einen bestimmten Bereich definiert ist. Sie entspricht der Stärke des Magnetfelds (d.h. der Dichte der Magnetfeldlinien) multipliziert mit der (senkrechten) Fläche, durch die diese Feldlinien fließen. Daher kann der magnetische Fluss als Maß für die magnetische Energie angesehen werden, die entlang der Feldlinien durch ein bestimmtes Gebiet „fließt“. Die Beziehung zwischen dem magnetischen Fluss, der Größe des Magnetfelds und der Fläche kann wie folgt beschrieben werden:

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

Dabei ist Φ (Großbuchstabe phi) der magnetische Fluss, B die Größe des Magnetfelds, A die relevante Fläche und α der Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Richtung der Magnetfeldlinie.

Mit einer fixierten Spule kann man ein Magnetfeld erzeugen, indem man Strom hindurchfließen lässt. Wenn dieser Strom durch die Spule konstant ist, sind die magnetischen Feldlinien in ihrer Position fixiert und behalten ihre Dichte bei: Das Magnetfeld bleibt konstant. Das bedeutet, dass für einen bestimmten (festen) Bereich in der Nähe der Spule auch der magnetische Fluss konstant ist.

Wenn wir dagegen die Stromstärke durch die Schleife langsam erhöhen, ändert sich das Magnetfeld langsam mit der Stromstärke: Stärkere Ströme erzeugen ein stärkeres Magnetfeld und damit eine höhere Feldliniendichte. Die Anzahl der Feldlinien nimmt nun für einen bestimmten Bereich in der Nähe des Magneten oder der Spule zu: Der magnetische Fluss wird stärker.

Anmerkung

## Magnetfeld

Der Umfang des Magnetfeldes B ist ein wichtiges Konzept in der Physik der Elektrizität und des Magnetismus. Es ist auch eine Größe, die sehr verwirrend sein kann, da sie viele Namen hat: magnetische Feldstärke, magnetische Feldliniendichte, magnetische Flussdichte oder magnetische Induktion. Die verschiedenen Bezeichnungen sind das Ergebnis von Konventionen, manche Autoren bevorzugen die eine, andere die andere Bezeichnung. In einer strengeren mathematischen Behandlung des Magnetismus werden Feldlinien durch mathematische Vektorfelder ersetzt. Dadurch ändern sich die Definitionen für elektromagnetische Felder, und obwohl wir von demselben B sprechen, ist in wissenschaftlicher Literatur meistens von magnetischer Induktion oder magnetischer Flussdichte die Rede. Da wir uns bei unseren Erklärungen auf die Feldlinien stützen (und um Verwechslungen zwischen der magnetischen Induktion und dem Induktionsgesetz zu vermeiden), halten wir uns an die Begriffe „Stärke des Magnetfelds“ oder „magnetische Feldliniendichte“. Ebenfalls erwähnenswert: Die Einheit für die magnetische Feldstärke ist das Tesla, benannt nach dem Erfinder Nikola Tesla, der auch Namensgeber der E-Auto-Marke ist.

Die Natur mag jedoch keine Änderungen des magnetischen Flusses! Bei jeder Änderung des magnetischen Flusses wird eine Spannung induziert, die wiederum einen Strom fließen lässt, wodurch dann ein entgegengesetztes Magnetfeld entsteht.

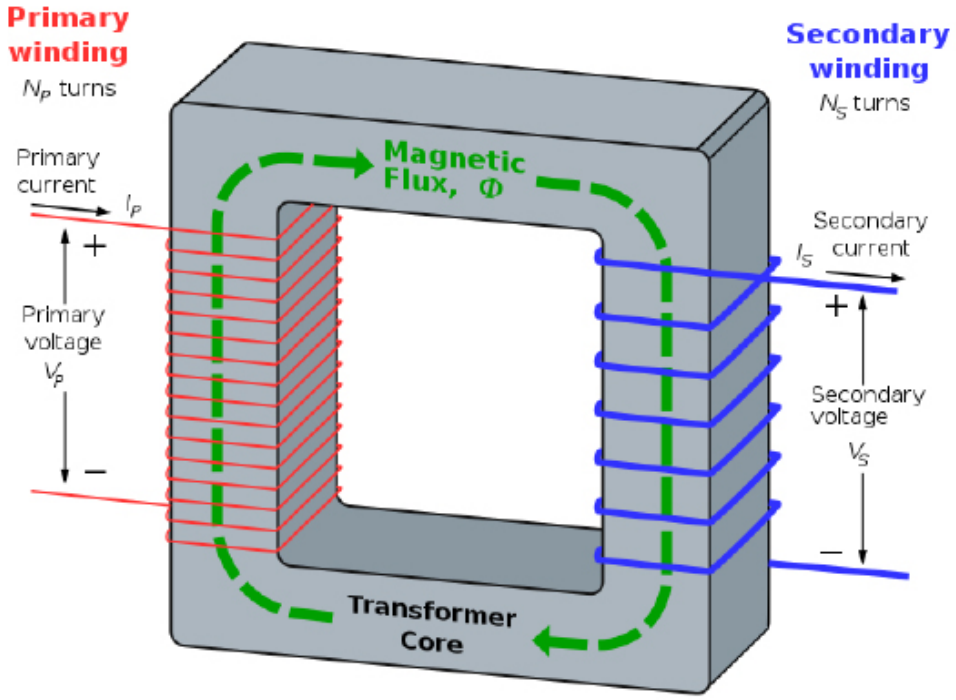
Nehmen wir eine Spule als Beispiel: Wenn wir den Strom durch die Spule verstärken, vergrößert sich das Magnetfeld und damit auch der magnetische Fluss innerhalb der Drahtschleife. Diese Änderung des magnetischen Flusses erzeugt eine Induktionsspannung, welche einen Strom in entgegengesetzte Richtung fließen lässt. So entsteht ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen zunehmenden Feld entgegengesetzt ist. Dieser Widerstand gegen eine Änderung des magnetischen Flusses tritt in jedem leitenden Medium in der Nähe der Spule auf. Es ist sehr wichtig zu verstehen, dass die Größe der induzierten Spannung davon abhängt, wie schnell sich der magnetische Fluss ändert, und nicht davon, wie stark das Magnetfeld ist.

Wenn du also zwei Spulen nahe beieinander hast und durch eine davon ein wechselnder Strom fließt, ändert sich der magnetische Fluss in beiden! Das liegt daran, dass das Magnetfeld der ersten Spule auch von der zweiten Spule wahrgenommen wird. Daher ändert sich der magnetische Fluss auch in der zweiten Spule und induziert einen Strom darin. Dieser Vorgang wird als **(elektro-)magnetische Induktion** bezeichnet und ermöglicht es, Ströme und Magnetfelder in Schleifen zu induzieren, die nicht miteinander verbunden sind!

Durch mehr Windungen in einer Spule kann die induzierte Spannung erhöht werden: Jede Windung spürt die Änderung des magnetischen Flusses und alle Windungen sind miteinander verbunden, so dass sich die Gesamtänderung des magnetischen Flusses für die Spule addiert. Die insgesamt induzierte Spannung erhält man dann, indem man die Änderung des magnetischen Flusses mit der Gesamtzahl der Windungen der Spule multipliziert. Um dieses Prinzip zu unserem Vorteil zu nutzen, wurden Transformatoren erfunden.

Ein Transformator besteht aus zwei getrennten Spulen, einer Primär- und einer Sekundärspule, und wird mit

Abbildung 16. Ein Transformator mit einem Eisenkern. Ein wechselnder Strom durch die Primärwicklung induziert ein wechselndes Magnetfeld im Eisenkern. Der Eisenkern überträgt dieses Feld auf die Sekundärwicklung, wo die Änderung des magnetischen Flusses einen Strom in den Sekundärwicklungen induziert. In einem Tokamak befindet sich die Primärwicklung innerhalb der Sekundärwicklung. Credit: Wikimedia Commons/BillC




Wechselströmen betrieben, die ständige Änderungen des magnetischen Flusses in den Spulen bewirken. In einem **idealen Transformator** geht bei der Induktion keine Leistung verloren und deshalb muss die Leistung in der Primär- und der Sekundärspule gleich sein:

$$I_p V_p = I_s V_s,$$

wobei Ip und Is die Ströme durch die Primär- (p) und Sekundärspule (s) und Vp und Vs die Spannungen durch die Primär- und Sekundärspule sind. Da die gesamte von der Spule empfundene EMK von der Anzahl der

**Unterrichtsübung 1.8**
Induktion zur Erzeugung eines Plasmastroms für unser Poloidalfeld hat einen großen Nachteil: Sie macht einen Tokamak zu einem gepulsten Gerät.

(a) Wie führt die magnetische Induktion zu einem gepulsten Betrieb?
(b) Warum ist das ein Problem für einen Fusionsreaktor?

Vergleiche auch Übung A.11.

Windungen der Spule abhängt, erhalten wir:

$$V_p / V_s = N_p / N_s ,$$

wobei Np die Anzahl der Windungen der Primärspule und Ns die Anzahl der Windungen der Sekundärspule angibt. Durch die Variation der Spulenwindungen können wir also die Ströme und Spannungen beliebig umwandeln.

Nun zurück zu unserem Tokamak. Die zentrale Magnetspule im Tokamak ist eine riesige Primärspule mit vielen Windungen, genannt **Solenoid**. Da das Plasma leitfähig ist, kann es auch Strom führen: Das Plasma wirkt im Grunde wie eine einzige Drahtschleife und macht unseren Tokamak zu einem riesigen Transformator mit einer Primärspule mit vielen Windungen und einer Sekundärspule aus einer einzigen Plasmaschleife. Indem wir einen wechselnden Strom in der zentralen Spule erzeugen, entsteht ein wechselndes Magnetfeld, das einen Strom im Zentrum des Plasmas induziert. Dieser Plasmastrom erzeugt dann das poloidale Magnetfeld, das wir brauchen! Somit haben wir jetzt sowohl ein toroidales als auch ein poloidales Magnetfeld und damit unser dringend benötigtes spiralförmiges Magnetfeld für einen stabilen Einschluss.

## Poloidale Feldspulen

Der Plasmastrom erzeugt also das poloidale Magnetfeld, das wir brauchen. Man könnte erwarten, dass die Poloidalfeldspulen ein poloidales Magnetfeld erzeugen, aber tatsächlich besteht die Hauptfunktion der Poloidalfeldspulen darin, die Form und Position des Plasmas zu kontrollieren. Das von den Poloidalfeldspulen erzeugte Feld ist viel schwächer als das Toroidalfeld oder das Poloidalfeld, das durch den Plasmastrom erzeugt wird.
Neben den Toroidalfeldspulen, der Transformatorspule und den Poloidalfeldspulen gibt es in einem regulären Tokamak noch viele weitere Spulen, die für weitergehende Steuerungszwecke verwendet werden. Diese zusätzlichen Spulen tragen jedoch nicht zu einem grundlegenden Verständnis der Kernfusion bei und werden daher in den Modulen nicht behandelt.

## Magnetischer Einschluss

Jetzt können wir endlich verstehen, wie wir ein stabiles magnetisches System schaffen können, in dem das Plasma eingeschlossen ist: Durch die Verwendung von toroidalen Feldspulen, die ein toroidales Magnetfeld erzeugen, in Kombination mit einem Plasmastrom, der ein poloidales Feld ergänzt (und vom zentralen Solenoid erzeugt wird), entsteht ein spiralförmiges Magnetfeld.

Es gibt noch einen letzten Punkt, den wir besprechen müssen: das **Druckgleichgewicht** im Tokamak. In einem Tokamak gibt es einen Außendruck und einen Innendruck. Wenn diese gleich sind, bleibt das Plasma stabil. Das ist dasselbe wie bei einem Fahrradreifen: Die Luft im Reifen muss stark genug nach außen auf den Gummireifen drücken, um dem Druck des Bodens entgegenzuwirken. Wenn der Luftdruck zu niedrig ist, „gewinnt“ der Boden und der Reifen wird platt.

In einem Tokamak wirkt der Druck des Plasmas nach außen, so dass es sich ausdehnt, wenn nicht eine Kraft dagegenhält. Was ist also die Kraft, die das Plasma zurückdrängt? Es gibt nur einen Kandidaten: die Lorentz-Kraft! Im Plasma fließt Strom, der unter Krafteinfluss des Magnetfelds steht. Dadurch wirkt eine nach innen gerichtete Kraft auf das Plasma, die es zusammenhält. Das ist **der magnetische Einschluss**.

Nachdem du nun das erste Modul durchgearbeitet hast, weißt du schon eine Menge über die Fusion: Du kennst das Energieproblem, du weißt über die Fusion in der Sonne Bescheid, du weißt, wie eine Fusion zustandekommt und wie wir die dafür notwendigen Bedingungen hier auf der Erde in der gängigsten Fusionsanlage, dem Tokamak, erzeugen können. In den nächsten Modulen kannst du dein Wissen über die Kernfusion mit vier verschiedenen Schwerpunkten vertiefen.

# 1.5 Vertiefende Lektüre

Zur Vertiefung des Wissens über Kernfusion stehen dir die folgenden vier Module zur Verfügung.

## Modul 2: Der Weg zur Fusion

Dieses Modul behandelt die Geschichte der Fusion und ihre Entwicklung anhand verschiedener Reaktorkonzepte und deren Erprobung. Dabei werden alle wichtigen Schritte auf dem Weg bis hin zum aktuellen Stand der Fusion erklärt.

## Modul 3: Plasmakontrolle

In diesem Modul werden Heiz- und Kontroll- und Messmethoden für ein Fusionsplasma erläutert. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, das Plasma zu erhitzen, und aufgrund der extremen Temperatur sind spezielle Messtechniken erforderlich. Unterschiedliche Plasmaparameter ermöglichen die Kontrolle des Fusionsreaktors.

## Modul 4: Materialien im Fusionsreaktor

Dieses Modul befasst sich mit den Anforderungen an Materialien in einer Fusionsmaschine. Die Wand des Fusionsreaktors muss aus ganz speziellen Materialien bestehen, die den extremen Fusionsbedingungen standhalten können. Jede Komponente des Fusionsgeräts hat ihren eigenen Zweck und stellt andere Anforderungen an das Material: Es muss Neutronen abhalten, gekühlt werden und ein starkes Magnetfeld erzeugen können.

## Modul 5: Praktische Anwendung

In diesem Modul wird die Rolle der Fusionsenergie für den Strommarkt im Vergleich mit anderen Energiequellen erläutert. Abgesehen von Zahlen spielt auch die Energiepolitik eine Rolle dabei, ob sich die Kernfusion als Energiequelle durchsetzen wird.

## Online-Ressourcen

Neben den verschiedenen Unterrichtsmodulen zur Kernfusion stehen dir auch im Internet viele Informationen und Lehrmaterial zur Verfügung.
In jedem Modul weisen wir auf interessante Bücher, Artikel oder Links hin.

Operation Tokamak in the iOS AppStore

Unterhaltsamen Content zum Thema Fusion bietet zum Beispiel die App „Operation Tokamak“, die kostenlos im iOS AppStore und Android Play Store heruntergeladen werden kann:

https://apps.apple.com/us/app/operation-tokamak/id808190835

Operation Tokamak in the Android Play Store

https://play.google.com/store/apps/details?id=dk.markfilm.operationtokamak&hl=nl&gl=US

In dieser App kannst du einen Tokamak betreiben, indem du die Stärke der Magneten und das Heizsystem steuerst. Indem du den Reaktor auf die richtigen Bedingungen einstellst und auftretende Instabilitäten unterdrückst, kannst du die Reaktion aufrechterhalten und versuchen, so viel Fusion wie möglich zu erzeugen.

# Kolophon

Grundlagen der Fusion ist das erste von fünf Lernmodulen, die auf Oberschulniveau Grundkenntisse der Kernfusion vermitteln. Alle Module stehen kostenlos auf der Website von FuseNet zur Verfügung. **https://fusenet.eu**.


**Autor**
Sander Korteweg

**Redaktion**
Sander Korteweg
Sjoukje Tijmensen-Hoekstra

**Übersetzung**
Stefanie Schlatt, EUROfusion

**Lektorat**
Dr. Alf Köhn-Seemann, Universität Stuttgart

**Graphical design**
Jens Peter Frankemölle
David Becker

**Titelbild**
NASA/Solar Dynamics Observatory

**Herausgeber**
FuseNet

**Finanzielle Unterstützung**
Dieses Projekt wäre ohne die finanzielle Unterstützung von EUROfusion nicht möglich gewesen.



**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

EUROfusion