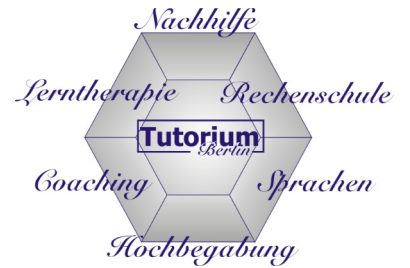


# Kernfusion

weitere Experimente unter [forschen.Tutorium-Berlin.de](http://forschen.Tutorium-Berlin.de)



Nachhilfe-TUTORIUM ist ein Unternehmen der Gruppe TUTORIUM Berlin Hasenmark 5 in 13585 Berlin

Als Kernfusion wird ein physikalischer Prozess bezeichnet bei dem zwei Atomkerne zu einem neuen verschmelzen. Bei der Fusion leichter Atome wie Wasserstoff wird Energie freigesetzt. Die Energiemenge wird geringer je schwerer die Atome sind, bei Eisen und schwereren Atomen ist die Reaktion endotherm (Energie aufnehmend).

|          | Kernfusion (z.B. Wasserstoff)  | Kernspaltung (z.B. Uran)   | Fossile Energieträger  |
|----------|--|--|--|
| Reaktion | <p>Wasserstoff (<math>^2\text{H}</math>) + Wasserstoff (<math>^3\text{H}</math>) → Helium + Neutron</p> <p>Bei jeder Fusion werden etwa 18 MeV Energie frei, hauptsächlich als Bewegungsenergie des Neutrons (=Wärme).</p> | <p>Neutron + Uran → Barium + Krypton + Neutron + Neutron + Neutron + Gammastrahlung</p> <p>Bei jeder Spaltung werden etwa 200 MeV Energie frei, hauptsächlich als Bewegungsenergie der Spaltprodukte (=Wärme).<br/>Bei jeder Spaltung werden Neutronen freigesetzt welche weitere Atome spalten können (Kettenreaktion).</p> | <p><math>\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}</math></p>  |
| Ertrag   | 100 MWh/g<br>Wasserstoffgemisch ( $^2\text{H}/^3\text{H}$ )  | 21 MWh/g Uran  | Erdöl: 11,8 kWh/kg<br>Erdgas: 8,6 – 11,4 kWh/kg<br>Steinkohle: 7,5 – 9 kWh/kg<br>Holz 4,8 – 5,0 kWh/kg   |
| Reserven | Deuterium ( $^2\text{H}$ ): nahezu unbegrenzt<br>Tritium ( $^3\text{H}$ ): >1000 Jahre   | Uran: 26 Jahre   | Erdöl: 54 Jahre<br>Erdgas: 51 Jahre<br>Kohle: 107 Jahre  |
| Probleme | Die Kerne sind positiv geladen und stoßen sich ab, daher müssen sie mit hoher Energie aufeinander prallen. Der Wasserstoff muss dazu mindestens auf rund 100 Millionen Grad erhitzt werden.                                | Es entstehen größere Mengen radioaktiven Abfalls dessen Entsorgung bisher ungelöst ist. Es können unkontrollierte Kettenreaktionen einsetzen (Reaktorunfall)   | Die Verbrennung fossiler Energieträger ist die Hauptquelle für den Anstieg der Treibhausgas-konzentrationen in der Erdatmosphäre und damit der menschengemachten globalen Erwärmung. |

Die Kernfusion gilt als mögliche Lösung der zukünftigen Energieversorgung. Allerdings gibt es technische Hürden auf dem Weg zu einem erfolgreichen Kernfusionsreaktor.

Für die Kernfusion muss der Wasserstoff auf rund 100 Millionen Grad erhitzt werden. Bei diesen Temperaturen sind Elektronen und Atomkerne voneinander getrennt und bilden ein elektrisch leitendes Plasma. Bei einem Kontakt mit der Wand des Reaktors würde das Plasma aber sofort auskühlen und die Reaktion würde zusammenbrechen.

## TUTORIUM Berlin Nachhilfe -TUTORIUM

Inhaber u. Pädagogischer Leiter: **Holger Schackert**  
Diplom-Mathematiker, Lerntherapeut,  
Psychologischer Berater u. Personal Coach

Hasenmark 5 in 13585 Berlin-Spandau, Büro: Gartenhaus 1.Etage

## Anmeldung, Beratung und Informationen:

Montag - Freitag: 14.30-17.00 Uhr

und / oder nach Vereinbarung unter

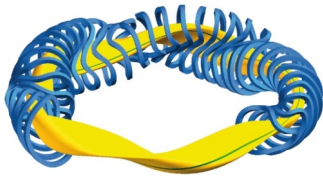
☎: 030 – 85018820 und 030 – 353 053 20

[www.Tutorium-Berlin.de](http://www.Tutorium-Berlin.de)

E-Mail: [info@tutorium-berlin.de](mailto:info@tutorium-berlin.de)

[www.Nachhilfe-Tutorium.de](http://www.Nachhilfe-Tutorium.de)

E-Mail: [info@nachhilfe-tutorium.de](mailto:info@nachhilfe-tutorium.de)



## Kernfusion

2

weitere Experimente unter  
[forschen.Tutorium-Berlin.de](http://forschen.Tutorium-Berlin.de)



## Magnetisches Einschlussverfahren

In den derzeit erfolgversprechendsten Versuchen wird das Plasma in ein Magnetfeld von etwa 10 Tesla Stärke eingeschossen. Für das Aufheizen des Plasmas und das Erzeugen der Magnetfelder sind jedoch große Mengen Energie nötig. Bisher gelingt es jedoch nur kurz die Fusionsreaktion stabil aufrecht zu erhalten (bis zu wenigen Minuten). Daher verbrauchen diese Versuche bisher mehr Energie als sie erzeugen.

Ein weiteres Problem für Fusionsreaktoren ist, dass ein einfaches, ringförmiges Magnetfeld die geladenen Teilchen des Plasma nicht vollständig einschließen kann. Das Magnetfeld wird dabei unvermeidlich zum Zentrum hin stärker als am Rand. Dieser Feldgradient treibt die Teilchen senkrecht zur Magnetfeldrichtung aus dem Ring hinaus (Torusdrift). Deshalb muss das Magnetfeld zusätzlich verdrillt werden, so dass die Teilchen auf ihrem Kurs entlang einer Feldlinie nicht dauerhaft in eine Richtung driften, sondern die Drifts an unterschiedlichen Orten einander ausgleichen.

### Stellarator

Das Konzept des Stellarator löst das Problem der Torusdrift durch eine komplexe, nicht rotationssymmetrische Magnetfeldgeometrie.

Rechts ist das Beispiel eines Stellarator-Designs (für das Wendelstein 7-X-Experiment) dargestellt: Ein System von Spulen (blau) umschließt Plasma (gelb). Eine magnetische Feldlinie ist in grün auf der gelben Plasmaoberfläche dargestellt.

Die derzeitige Forschung am Stellarator konzentriert sich auf das Spulensystem, welches das komplexe Magnetfeld erzeugen soll. Grundsätzlich wird durch die dreidimensionale Struktur des Plasmas dessen Einschluss im heißen Zustand erschwert.

### Aktuelle Stellarator Reaktoren (Auswahl)

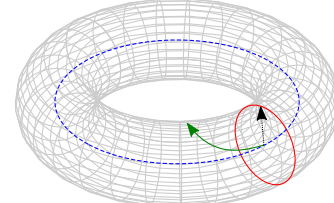
Wendelstein 7-X

- deutscher Stellarator-Forschungsreaktor. dient der Plasmaforschung, eine energieerzeugende Fusionsreaktion ist nicht vorgesehen.
- Ende 2015 erstmals Helium-Plasma erzeugt
- Ziel ist die Untersuchung der Einschlusseigenschaften eines Stellarators sowie dessen Dauerbetriebsfähigkeit

Large Helical Device

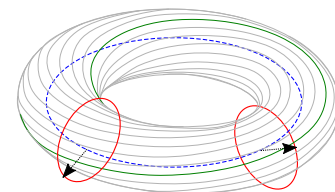
- japanischer Stellarator-Forschungsreaktor. dient der Plasmaforschung, eine energieerzeugende Fusionsreaktion ist nicht vorgesehen.
- Seit 1998 in Betrieb.
- Ziel ist die Erforschung des Heliotron-Konzeptes, einer Variante des Stellarators.

Bewegung in unverdrilltem Magnetfeld:

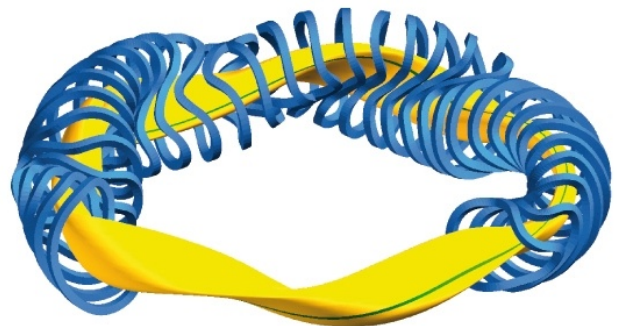


--- ideale Flugbahn  
 → Feldgradient  
 → reale Flugbahn (Torusdrift)

Spiralförmige Bewegung um die Mitte des Torus im verdrillten Magnetfeld:



--- Mitte des Torus  
 → Feldgradient  
 → reale Flugbahn (verdrillt)



### TUTORIUM Berlin Nachhilfe -TUTORIUM

Inhaber u. Pädagogischer Leiter: **Holger Schackert**  
 Diplom-Mathematiker, Lerntherapeut,  
 Psychologischer Berater u. Personal Coach

Hasenmark 5 in 13585 Berlin-Spandau, Büro: Gartenhaus 1.Etage

Anmeldung, Beratung und Informationen:

Montag - Freitag: 14.30-17.00 Uhr

und / oder nach Vereinbarung unter

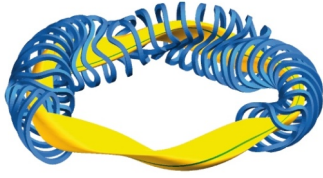
☎: 030 - 85018820 und 030 - 353 053 20

[www.Tutorium-Berlin.de](http://www.Tutorium-Berlin.de)

E-Mail: [info@tutorium-berlin.de](mailto:info@tutorium-berlin.de)

[www.Nachhilfe-Tutorium.de](http://www.Nachhilfe-Tutorium.de)

E-Mail: [info@nachhilfe-tutorium.de](mailto:info@nachhilfe-tutorium.de)



## Kernfusion

weitere Experimente unter  
[forschen.Tutorium-Berlin.de](https://www.forschen.Tutorium-Berlin.de)

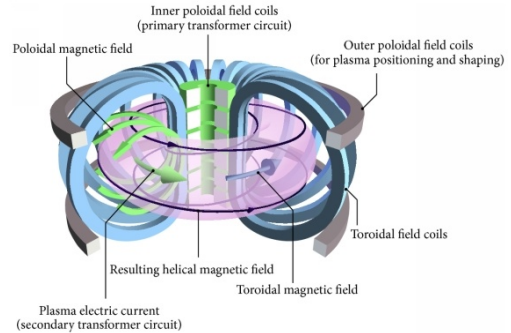
3



### Tokamak

Im Vergleich zum Stellarator wird beim Tokamak eine ringförmige Kammer mit Magneten eingesetzt. Das so erzeugte Magnetfeld kann das Plasma alleine aber nicht halten (siehe oben). Deshalb wird durch das Plasma im inneren ein elektrischer Strom geleitet. Dieser Strom erzeugt ebenfalls ein Magnetfeld, welches sich mit dem äußeren Magnetfeld überlagert so dass sich ein spiralförmiger Feldverlauf ergibt.

Allerdings kann man bisher den Stromfluss im Plasma nicht kontinuierlich erzeugen. Sobald der Stromfluss endet geht auch der Plasmaeinschluss verloren und die Fusionsreaktion endet. Für große Tokamaks wie ITER rechnet man derzeit mit einer Reaktionszeit in der Größenordnung von 15 Minuten.



Man könnte den Reaktor nun in Pulsen betreiben, also das Plasma immer wieder neu entzünden. Das wäre jedoch aufwendig und eine große Belastung für das Material. Daher wird derzeit an alternativen Möglichkeiten geforscht den Plasmastrom kontinuierlich zu erzeugen.

### Aktuelle Tokamak Reaktoren (Auswahl)

#### Joint European Torus (JET)

- europäischer Tokamak-Forschungsreaktor, seit 1983 im Experimentierbetrieb
- 1991 erste kontrollierte Kernfusion (für zwei Sekunden)
- 1997 wurde eine Fusionsleistung von 16 Megawatt erreicht, das sind allerdings nur etwa 2/3 der eingekoppelten Heizleistung.

#### ITER

- Tokamak-Forschungsreaktor, seit 2007 in Frankreich im Bau.
- Beteiligt sind die EU, das Vereinigte Königreich, die Schweiz, USA, China, Südkorea, Japan, Russland und Indien.
- Ende 2025 soll hier erstmals ein Wasserstoffplasma erzeugt werden, vorerst allerdings nur zur Plasmaforschung. Frühestens ab 2035 soll auch mit einer Fusion begonnen werden.
- Ziel ist es eine Fusionsleistung von etwa 500 MW zu erreichen und die Fusion über 400 Sekunden stabil zu halten.

#### HL-2M

- chinesischer Tokamak-Forschungsreaktor
- seit Ende 2020 in Betrieb
- Erforscht die Gewinnung der Fusionswärme aus dem Plasma.

#### KSTAR

- südkoreanischer Tokamak-Forschungsreaktor, ist auch Teil des Fusionsexperimentes ITER.
- verwendet ein supraleitendes Magnetsystem.
- Das erste Plasma wurde am 15. Juli 2008 gezündet
- Ende 2016 konnte ein Plasma 70 Sekunden lang aufrechterhalten werden.

#### Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST)

- chinesischer, supraleitender Tokamak-Forschungsreaktor
- März 2006 fertiggestellt
- 2021 neuer Fusionsrekord mit einer Plasmatemperatur von 70 Millionen °C über 17 Minuten

### TUTORIUM Berlin Nachhilfe -TUTORIUM

Inhaber u. Pädagogischer Leiter: **Holger Schackert**  
 Diplom-Mathematiker, Lerntherapeut,  
 Psychologischer Berater u. Personal Coach

**Hasenmark 5 in 13585 Berlin-Spandau, Büro: Gartenhaus 1.Etage**

### Anmeldung, Beratung und Informationen:

**Montag - Freitag: 14.30-17.00 Uhr**

und / oder nach Vereinbarung unter

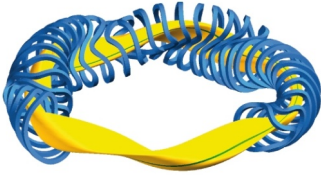
☎: **030 - 85018820** und 030 - 353 053 20

[www.Tutorium-Berlin.de](http://www.Tutorium-Berlin.de)

E-Mail: [info@tutorium-berlin.de](mailto:info@tutorium-berlin.de)

[www.Nachhilfe-Tutorium.de](http://www.Nachhilfe-Tutorium.de)

E-Mail: [info@nachhilfe-tutorium.de](mailto:info@nachhilfe-tutorium.de)



## Kernfusion

weitere Experimente unter  
[forschen.Tutorium-Berlin.de](https://www.forschen.Tutorium-Berlin.de)



## Trägheitsfusion

Anders als beim magnetischen Einschluss des Fusionsplasmas wird beim Trägheitseinschluss der Brennstoff in einem Millimeter-großen, kugelförmigen Fusionstarget durch sehr schnelle, oberflächliche Energiezufuhr extrem verdichtet und auf die erforderliche Temperatur von etwa 100 Millionen Grad aufgeheizt wird.

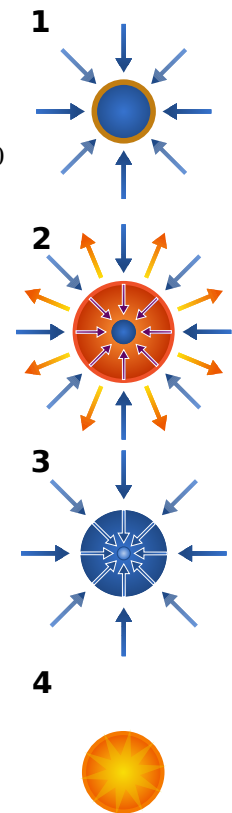
Eine mehrtausendfache Dichtekompression ist Voraussetzung dafür, dass die bei der Fusion erzeugten energiereichen Heliumatomkerne ihre Energie durch Stöße wieder im Brennstoff abgeben. Nur dadurch ist es möglich, dass ein Großteil des Brennstoffs durch Kernfusion "abbrennt". Die hierfür nötige Einschlussdauer beträgt dann nur Nanosekunden. Während dieser kurzen Zeit genügt die Massenträgheit des Plasmas selbst, um es zusammenzuhalten.

Ein vergleichbares Konzept zum Zünden der Fusion verwenden Wasserstoffbomben, hier wird die Kompression des Fusionsprengsatz allerdings durch eine daneben ausgelösten Kernspaltungssprengsatz erzeugt.

### Stationen des Zündens einer Trägheitsfusionsreaktion:

1. Laser- oder Röntgenstrahlung heizt das nur mm-große Fusionstarget auf der Oberfläche als Plasma auf.
2. Der Fusionsbrennstoff wird durch den nach innen gerichteten Implosionsdruck der äußeren Schicht komprimiert.
3. Der Brennstoff erreicht die zum Zünden nötige hohe Dichte und Temperatur.
4. Kernfusionsprozesse finden statt und die dabei entstehenden Neutronen und Heliumatomkerne setzen ein Vielfaches der eingesetzten Energie frei.

Anm.: Blaue Pfeile stehen für nach innen gerichtete Strahlungsprozesse, orange für nach außen gerichtete; violette stellen die zur Kompression dienende thermische Energie (Schockwelle) dar



### Aktuelle Trägheitsfusionsreaktoren (Auswahl)

National Ignition Facility (NIF)/Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore

- US-amerikanische Forschungseinrichtung
- Zweck ist die Simulation von Kernwaffenexplosionen, um die Funktionssicherheit der amerikanischen Kernwaffen ohne ober- oder unterirdische Kernwaffentests zu gewährleisten.
- 2022 wurde eine Erzeugung von 3,15MJ Fusionsenergie nach dem Einsatz von 2,05 MJ Laserenergie gemeldet, nach 1,35 MJ Fusionsenergie im Vorjahr. Die Angaben beinhalten allerdings nicht den Umwandlungsverlust, für eine kommerzielle Nutzung zur Stromerzeugung müsste die Leistung noch erheblich gesteigert werden.

Laser Mégajoule

- Französischer Trägheitsfusions-Forschungsreaktor
- Der primäre Zweck des LMJ ist die Atomwaffenforschung, welche die Funktionsfähigkeit des französischen Kernwaffenarsenals gewährleisten sollen

Quellen:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion> ; <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusionsreaktor> ; <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung>  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Joint\\_European\\_Torus](https://de.wikipedia.org/wiki/Joint_European_Torus) ; [https://de.wikipedia.org/wiki/Korea\\_Superconducting\\_Tokamak\\_Advanced\\_Research](https://de.wikipedia.org/wiki/Korea_Superconducting_Tokamak_Advanced_Research)  
<https://de.wikipedia.org/wiki/ITER> ; [https://de.wikipedia.org/wiki/Wendelstein\\_7-X](https://de.wikipedia.org/wiki/Wendelstein_7-X) ; [https://de.wikipedia.org/wiki/Large\\_Helical\\_Device](https://de.wikipedia.org/wiki/Large_Helical_Device)  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Reichweite\\_\(Rohstoff\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Reichweite_(Rohstoff)) ; [https://de.wikipedia.org/wiki/Fossile\\_Energie](https://de.wikipedia.org/wiki/Fossile_Energie) ; <https://de.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A4gheitsfusion>  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert#Feste\\_Brennstoffe\\_\(bei\\_25\\_%C2%B0C\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert#Feste_Brennstoffe_(bei_25_%C2%B0C)) ; [https://de.wikipedia.org/wiki/National\\_Ignition\\_Facility](https://de.wikipedia.org/wiki/National_Ignition_Facility)  
Kernspaltung.svg: Original: Stefan-Xp (Diskussion · Beiträge) / Vektorisierung: Wondigoma (Diskussion · Beiträge), CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons  
Deuterium-tritium fusion.svg: Wykis (Diskussion · Beiträge), Public domain, via Wikimedia Commons  
W7X-Spulen Plasma blau gelb.jpg: Max-Planck Institut für Plasmaphysik, CC BY 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>>, via Wikimedia Commons  
Schematic-of-a-tokamak-chamber-and-magnetic-profile.jpg: S. Li, H. Jiang, Z. Ren, C. Xu, CC BY 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>>, via Wikimedia Commons  
Pcombustion methane intl.png: Original author was Christophe Dang Ngoc Chan (cdang), CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons  
Pb0001, CC0, via Wikimedia Commons  
Inertial confinement fusion: Benjamin D. Esham, Public domain, via Wikimedia Commons

## TUTORIUM Berlin Nachhilfe -TUTORIUM

Inhaber u. Pädagogischer Leiter: **Holger Schackert**  
Diplom-Mathematiker, Lerntherapeut,  
Psychologischer Berater u. Personal Coach

**Hasenmark 5 in 13585 Berlin-Spandau, Büro: Gartenhaus 1.Etage**

### Anmeldung, Beratung und Informationen:

**Montag - Freitag: 14.30-17.00 Uhr**

und / oder nach Vereinbarung unter

☎: **030 – 85018820** und 030 – 353 053 20

[www.Tutorium-Berlin.de](http://www.Tutorium-Berlin.de)

E-Mail: [info@tutorium-berlin.de](mailto:info@tutorium-berlin.de)

[www.Nachhilfe-Tutorium.de](http://www.Nachhilfe-Tutorium.de)

E-Mail: [info@nachhilfe-tutorium.de](mailto:info@nachhilfe-tutorium.de)