

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Hans-Böckler-Berufskolleg

21. Februar 2018

1 Äquivalenz von Masse und Energie

2 Kernfusion

- Geschichte der Forschung
- Bedingungen für die Fusion
- Fusion in der Sonne
- Wasserstoffbombe

3 Fusionsreaktor

- Magnetische Fusion (Tokamak / Stellarator)
- Trägheitsfusion
- Erbrütung von Tritium
- Sicherheit der Reaktoren

Äquivalenz von Masse und Energie

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- hohe Effizienz → riesige Mengen Energie
- $E = mc^2$
- $E \rightarrow$ Ruheenergie (ohne Bewegung)

Äquivalenz von Masse und Energie

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- hohe Effizienz → riesige Mengen Energie
- $E = mc^2$
- $E \rightarrow$ Ruheenergie (ohne Bewegung)

Äquivalenz von Masse und Energie

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- hohe Effizienz → riesige Mengen Energie
- $E = mc^2$
- $E \rightarrow$ Ruheenergie (ohne Bewegung)

Äquivalenz von Masse und Energie

$$E = mc^2 \text{ vs. } E_{kin} = mgh$$

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion
Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht

0.22 J

Beispiel 2: Little Boy

< 1 kg gezündetes Reaktionsmaterial^a

$5.4 * 10^{16}$ J

^a https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy

Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$ J^b

^b <https://youtu.be/t-O-Qdh7VvQ?t=10>

Äquivalenz von Masse und Energie

$$E = mc^2 \text{ vs. } E_{kin} = mgh$$

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion
Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht

0.22 J

Beispiel 2: Little Boy

< 1 kg gezündetes Reaktionsmaterial^a

$5.4 * 10^{16}$ J

^a https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy

Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$ J^b

^b <https://youtu.be/t-O-Qdh7VvQ?t=10>

Äquivalenz von Masse und Energie

$$E = mc^2 \text{ vs. } E_{kin} = mgh$$

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht

0.22 J

Beispiel 2: Little Boy

> 70 Kugelschreiber gezündetes Reaktionsmaterial^a

$5.4 * 10^{16}$ J

^a https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy

Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$ J^b

^b <https://youtu.be/t-O-Qdh7VvQ?t=10>

Äquivalenz von Masse und Energie

$$E = mc^2 \text{ vs. } E_{kin} = mgh$$

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht

0.22 J

Beispiel 2: Little Boy

> 70 Kugelschreiber gezündetes Reaktionsmaterial^a

$5.4 * 10^{16}$ J

^a https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy

Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$ J^b

^b <https://youtu.be/t-O-Qdh7VvQ?t=10>

1 Äquivalenz von Masse und Energie

2 Kernfusion

- Geschichte der Forschung
- Bedingungen für die Fusion
- Fusion in der Sonne
- Wasserstoffbombe

3 Fusionsreaktor

- Magnetische Fusion (Tokamak / Stellarator)
- Trägheitsfusion
- Erbrütung von Tritium
- Sicherheit der Reaktoren

Geschichte der Forschung

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- ❶ 1917: Erste Kernreaktion (Rutherford)¹
- ❷ 1920: Fusionsreaktion mögliche Energiequelle von Sternen²
- ❸ 1934: Erste Fusionsreaktion im Labor³
- ❹ ab 1945: Erforschung der Nutzung von Fusionsreaktionen in Atombomben
- ❺ 1952: Zündung der ersten Wasserstoffbombe⁴
- ❻ 1991: Erste kontrollierte Kernfusion zur Energiegewinnung⁵

¹ <http://web.lemoyne.edu/~giunta/rutherford.html>

² Hans Bethe: *Energy Production in Stars*, Phys. Rev. 55, 1939, S. 434–456

³ M.L.E. Oliphant, Lord Rutherford: *Transmutation effects Observed with Heavy Hydrogen*, Rev. 144, 1934, S. 692

⁴ <http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Tests/Ivy.html>

⁵ P-H Rebut: *The JET preliminary tritium experiment*, Rev. 34, 1992

Bedingungen für die Fusion

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Hitze: 100 Millionen Kelvin
- → Wasserstoff ist Plasma
- Druck: Atomkerne ~ 1 Femtometer entfernt
- Sonne: Gravitation; Erde: Magnete

Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Licht und Wärme der Sonne entstehen in Fusionsreaktionen
- Genauer: Proton-Proton-Reaktion:

Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Licht und Wärme der Sonne entstehen in Fusionsreaktionen
- Genauer: Proton-Proton-Reaktion:

Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

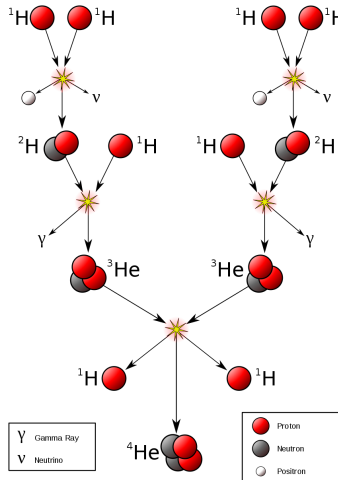


Abbildung: Fusion in der Sonne

Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

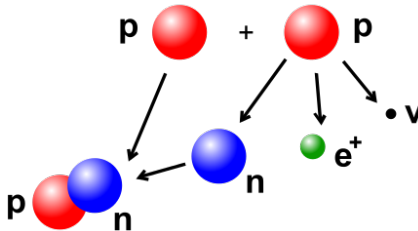
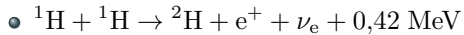
Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren



Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

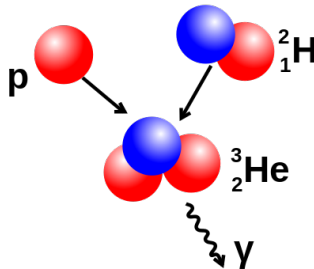
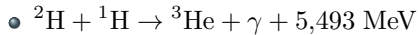
Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren



Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

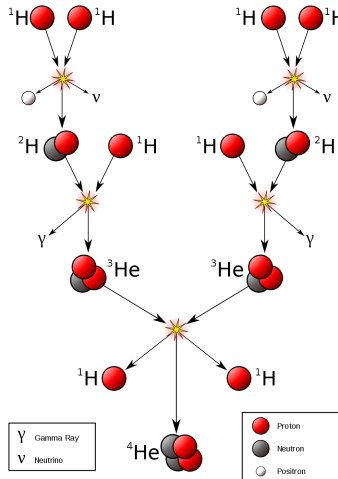


Abbildung: Fusion in der Sonne

Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

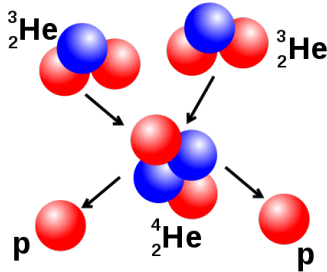
Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Proton-Proton-I-Kette: 83,30 %
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2 {}^1\text{H} + 12,86 \text{ MeV}$



Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Proton-Proton-I-Kette: 83,30 %
- Proton-Proton-II-Kette: 16,68 %
 - $2x\ ^4\text{He}$
- Proton-Proton-III-Kette: 0,02 %
 - $2x\ ^4\text{He}$

Fusion in der Sonne

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Meiste Fusion findet im Kern statt
- Größter Teil des Lebens eines Sternes: $H \rightarrow He$
- Nachdem der H-Vorrat ausgeht: Schwerere Elemente, bis Fe
- Schwerer als Fe: Supernova

Atombombe:

- Sprengstoff verdichtet Spaltmaterial
- → Kettenreaktion wird ausgelöst

Wasserstoffbombe:

- Atombombe verdichtet Spaltmaterial
- → Fusionsreaktionen beginnen

Atombombe:

- Sprengstoff verdichtet Spaltmaterial
- -> Kettenreaktion wird ausgelöst

Wasserstoffbombe:

- Atombombe verdichtet Spaltmaterial
- -> Fusionsreaktionen beginnen

Wasserstoffbombe

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

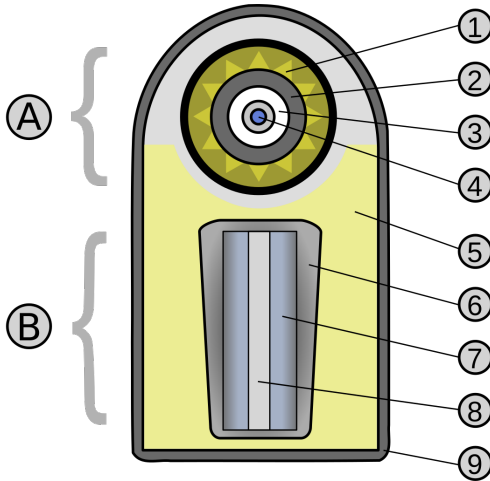


Abbildung: Wasserstoffbombe

Wasserstoffbombe

Kernfusion

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

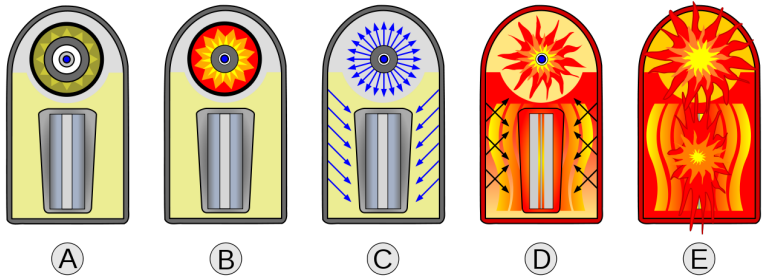


Abbildung: Explosion einer Wasserstoffbombe

Gliederung

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

1 Äquivalenz von Masse und Energie

2 Kernfusion

- Geschichte der Forschung
- Bedingungen für die Fusion
- Fusion in der Sonne
- Wasserstoffbombe

3 Fusionsreaktor

- Magnetische Fusion (Tokamak / Stellarator)
- Trägheitsfusion
- Erbrütung von Tritium
- Sicherheit der Reaktoren

Magnetische Fusion

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Meistverfolgter Entwicklungsweg für Gewinnung von Energie aus Kernfusion
- Fortgeschrittener und vielversprechender als Trägheitsfusion
- Plasma kann nicht in herkömmlichen Gefäßen gehalten werden
- → Einschluss in B-Feld

Magnetische Fusion

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Meistverfolgter Entwicklungsweg für Gewinnung von Energie aus Kernfusion
- Fortgeschrittener und vielversprechender als Trägheitsfusion
- Plasma kann nicht in herkömmlichen Gefäßen gehalten werden
- → Einschluss in B-Feld

Tokamak

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

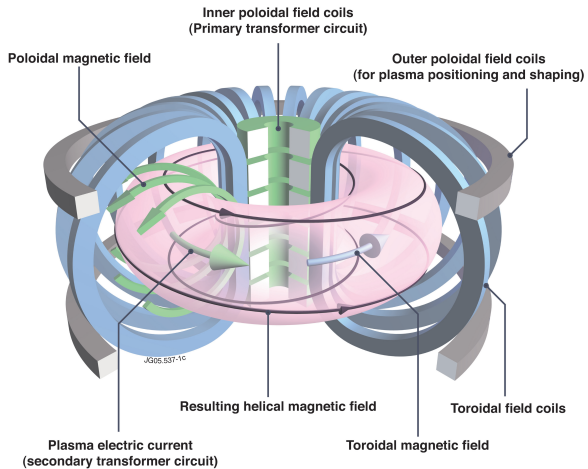


Abbildung: Tokamak-Prinzip

Tokamak - Funktion

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- 1 Plasma wird durch Hitze und Druck erzeugt
- 2 Plasma wird durch Magnete in Torusform gehalten
- 3 Im Plasma fusioniert Wasserstoff zu Proton-Proton-II-Kette

Stellarator

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

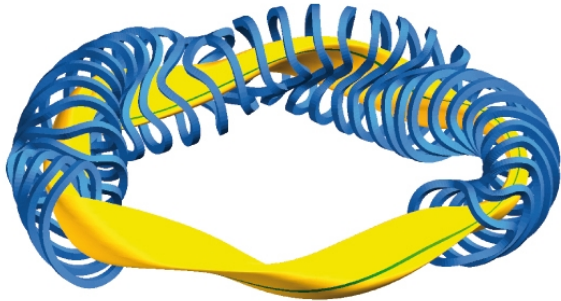


Abbildung: Stellarator-Prinzip

Stellarator - Funktion

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

Funktionsweise ähnelt der eines Tokamak, Form des Plasmas unterscheidet sich.

Trägheitsfusion

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

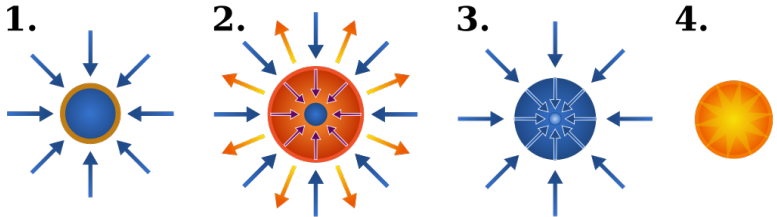


Abbildung: Zünden einer Trägheitsfusionsreaktion

Erbrütung von Tritium aus Lithium-6

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- zu 90 %
- ${}^6\text{Li} + \text{n} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4,8 \text{ MeV}$
- Hohe Energieausbeute

Erbrütung von Tritium aus Lithium-7

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- zu 10 %
- ${}^7\text{Li} + \text{n} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + \text{n}' - 2,5 \text{ MeV}$
- Neutron nicht verbraucht
- Hohe Energieschwelle

Sicherheit der Reaktoren: Vorteile

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne
Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Keine Kettenreaktionen → kein Super-GAU
- Ohne Kühlung kommt Fusionsreaktion nicht zustande
- Halbwertszeit von Tritium nur 12,3 Jahre

Sicherheit der Reaktoren: Nachteile

Fusionsreaktor

Kernfusion und
Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus
Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für die
Fusion

Fusion in der Sonne

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von
Tritium

Sicherheit der
Reaktoren

- Tritium ist leicht \rightarrow kann durch Lecks entweichen
- Beta-Strahlung kann beim einatmen Zellen schaden
- Bauteile können durch Neutronenstrahlung aktiviert werden
- 10 % der Bauteile für 100 Jahre verstrahlt

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Hans-Böckler-Berufskolleg

21. Februar 2018