

# Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Hans-Böckler-Berufskolleg

20. 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 → 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<sup>a</sup>

$5.4 * 10^{16}$  J

---

<sup>a</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Little\\_Boy](https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy)

## Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$  J<sup>b</sup>

---

<sup>b</sup> <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<sup>a</sup>

$5.4 * 10^{16}$  J

---

<sup>a</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Little\\_Boy](https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy)

## Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$  J<sup>b</sup>

---

<sup>b</sup> <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<sup>a</sup>

$5.4 * 10^{16}$  J

---

<sup>a</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Little\\_Boy](https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy)

## Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$  J<sup>b</sup>

---

<sup>b</sup> <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<sup>a</sup>

$5.4 * 10^{16}$  J

---

<sup>a</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Little\\_Boy](https://de.wikipedia.org/wiki/Little_Boy)

## Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

$\sim 4.2 * 10^{17}$  J<sup>b</sup>

---

<sup>b</sup> <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)<sup>1</sup>
- ❷ 1920: Fusionsreaktion mögliche Energiequelle von Sternen<sup>2</sup>
- ❸ 1934: Erste Fusionsreaktion im Labor<sup>3</sup>
- ❹ ab 1945: Erforschung der Nutzung von Fusionsreaktionen in Atombomben
- ❺ 1952: Zündung der ersten Wasserstoffbombe<sup>4</sup>
- ❻ 1991: Erste kontrollierte Kernfusion zur Energiegewinnung<sup>5</sup>

---

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

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

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

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

<sup>5</sup> 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  $\sim 1$  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

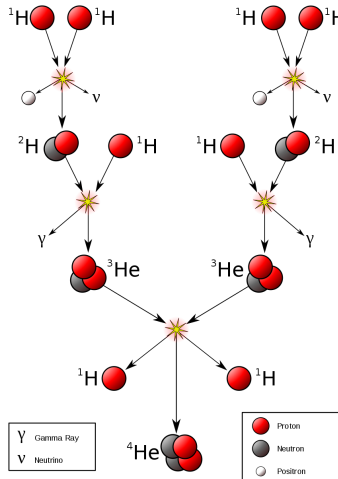


Abbildung: Fusion in der Sonne

# 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

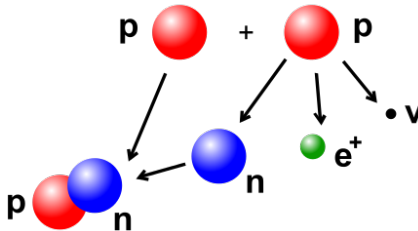
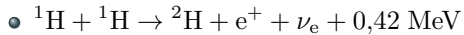
Fusionsreaktor

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

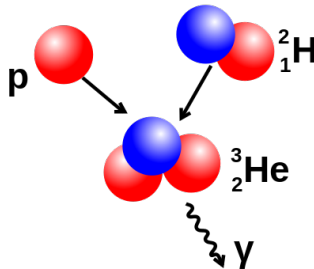
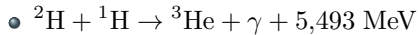
Fusionsreaktor

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

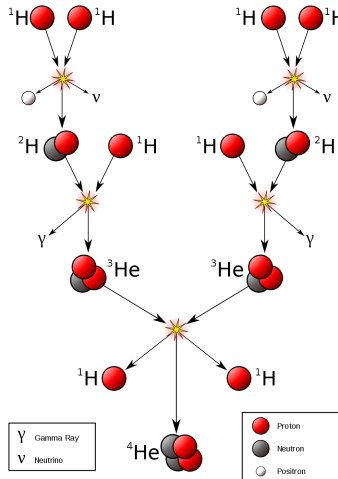


Abbildung: Fusion in der Sonne

# 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

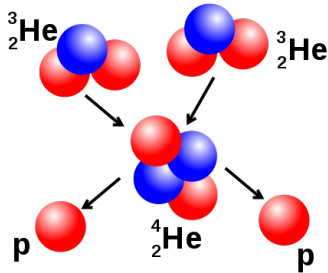
Magnetische Fusion

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

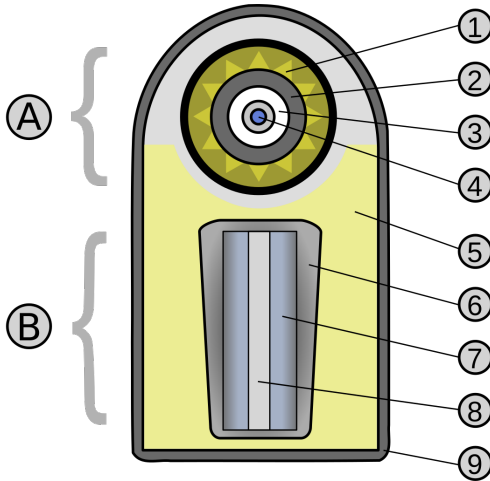


Abbildung: Wasserstoffbombe



# 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

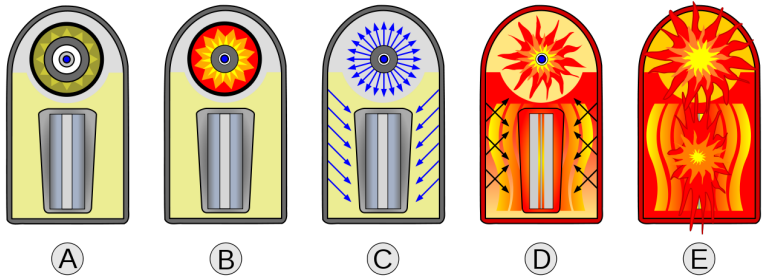


Abbildung: Explosion einer Wasserstoffbombe

# 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

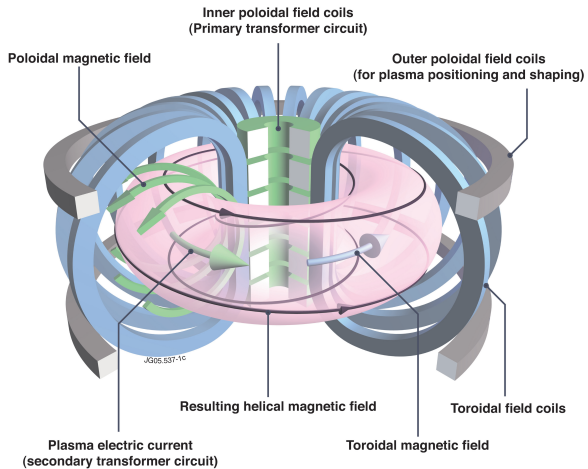


Abbildung: Tokamak-Prinzip

# 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

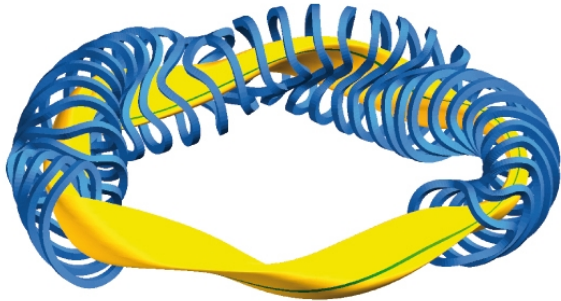


Abbildung: Stellarator-Prinzip

# 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

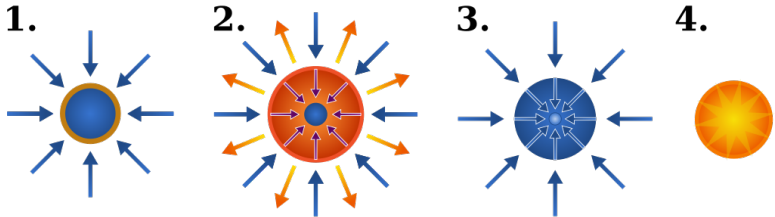


Abbildung: Zünden einer Trägheitsfusionsreaktion

# 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

20. Februar 2018