

# Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Hans-Böckler-Berufskolleg

17. Februar 2018

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

Aufbau eines  
Reaktors

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 / Stellerator)
- Trägheitsfusion
- Aufbau eines Reaktors
- 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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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
- Aufbau eines Reaktors
- 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

Aufbau eines  
Reaktors

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 FR 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

Aufbau eines  
Reaktors

Erbrütung von  
Tritium

Sicherheit der  
Reaktoren

- Hitze: 100 Millionen Kelvin
- $\Rightarrow$  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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

Erbrütung von  
Tritium

Sicherheit der  
Reaktoren

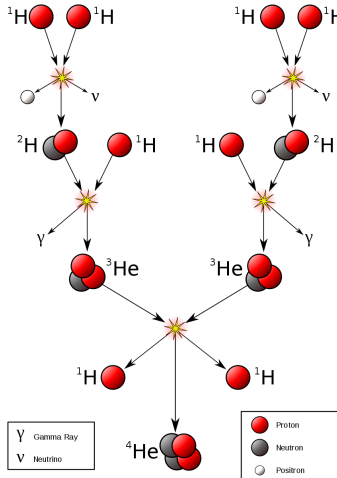


Abbildung: Fusion in der Sonne

# 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

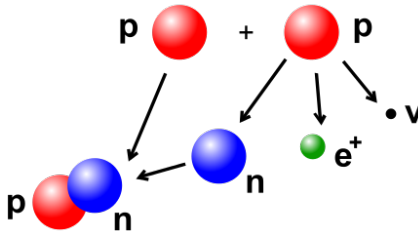
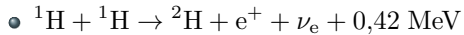
Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Aufbau eines  
Reaktors

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

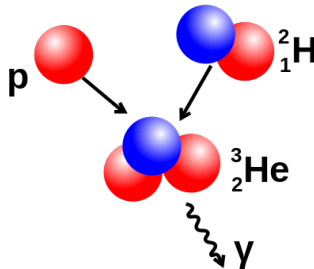
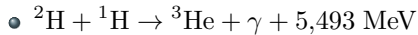
Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

Erbrütung von  
Tritium

Sicherheit der  
Reaktoren

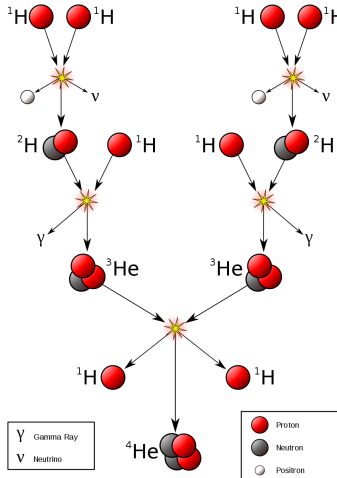


Abbildung: Fusion in der Sonne

# 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

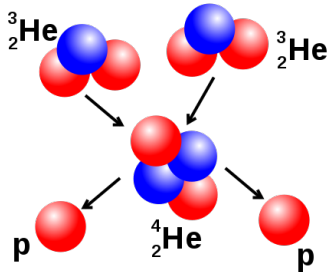
Trägheitsfusion

Aufbau eines  
Reaktors

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

Aufbau eines  
Reaktors

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 %
  - $2x\ ^4\text{He}$

# 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

Aufbau eines  
Reaktors

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
- Aufbau eines Reaktors
- Erbrütung von Tritium
- Sicherheit der Reaktoren

# Magnetische Fusion (Tokamak / Stellerator)

## 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

Aufbau eines  
Reaktors

Erbrütung von  
Tritium

Sicherheit der  
Reaktoren



# 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**

Aufbau eines  
Reaktors

Erbrütung von  
Tritium

Sicherheit der  
Reaktoren



# Aufbau eines Reaktors

## 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

**Aufbau eines  
Reaktors**

Erbrütung von  
Tritium

Sicherheit der  
Reaktoren

# Erbrütung von Tritium

## 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

Aufbau eines  
Reaktors

**Erbrütung von  
Tritium**

Sicherheit der  
Reaktoren

# Sicherheit der Reaktoren

## 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

Aufbau eines  
Reaktors

Erbrütung von  
Tritium

Sicherheit der  
Reaktoren

# Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Hans-Böckler-Berufskolleg

17. Februar 2018