

Energie au

#### Kernfusion

Forschung

Bedingungen für d

Fusion in der So

Wasserstoffbomb

#### Fusionsreakto

Trägheitsfusion
Erbrütung von

Sicherheit de Reaktoren

### Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Hans-Böckler-Berufskolleg

21. Februar 2018

### Gliederung

Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

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

#### Energie aus Masse

Kernfusion
Geschichte der

Fusion

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Trägheitsfusion Erbrütung von Tritium

Sicherheit Reaktoren

## Äquivalenz von Masse und Energie

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiel

#### Energie aus Masse

Kernfusic

Geschichte der Forschung

Bedingungen für

Fusion in der So

Wasserstoffbomb

Fusionsreakto

Magnetische Fu

Trägheitsfusio

Erbrütung von

Sicherheit der Reaktoren • hohe Effizienz -> riesige Mengen Energie

- $\bullet$   $E = mc^2$
- E -> Ruheenergie (ohne Bewegung)

## Äquivalenz von Masse und Energie

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kieb

#### Energie aus Masse

Kernfusic

Geschichte der Forschung

Bedingungen für

Fusion in der So

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fus

Trägheitsfusio

Erbrütung von

Sicherheit der

• hohe Effizienz -> riesige Mengen Energie

•  $E = mc^2$ 

• E -> Ruheenergie (ohne Bewegung)

### Äquivalenz von Masse und Energie

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Nie

#### Energie aus Masse

Kernfusio

Geschichte der Forschung Bedingungen für di

Fusion in der Son

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Trägheitsfusion Erbrütung von

Sicherheit der Reaktoren • hohe Effizienz -> riesige Mengen Energie

- $E = mc^2$
- E -> Ruheenergie (ohne Bewegung)

# Äquivalenz von Masse und Energie $E = mc^2$ vs. $E_{kin} = mgh$

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Masse

Kernfusi

Geschichte der Forschung Bedingungen für di

Fusion in der Sonn

Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor Magnetische Fusion

Trägheitsfusion Erbrütung von Tritium

Sicherheit d Reaktoren

#### Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht 0.22 J

#### Beispiel 2: Little Boy

< 1 kg genzündetes Reaktionsmaterial  $5.4 \pm 10^{16}$  L

a https://de.wikipedia.org/wiki/Little\_Boy

#### Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

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

b https://youtu.be/t-O-Qdh7VvQ?t=1

### Äquivalenz von Masse und Energie $E = mc^2$ vs. $E_{kin} = mgh$

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Energie aus

#### Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht 0.22 J

#### Beispiel 2: Little Boy

< 1 kg genzündetes Reaktionsmaterial<sup>a</sup>  $5.4 * 10^{16}$  J

a https://de.wikipedia.org/wiki/Little\_Boy

# Äquivalenz von Masse und Energie $E = mc^2$ vs. $E_{kin} = mgh$

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Energie aus

### Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht 0.22 J

#### Beispiel 2: Little Boy

> 70 Kugelschreiber genzündetes Reaktionsmaterial<sup>a</sup> 5.4 \* 10<sup>16</sup> I

a https://de.wikipedia.org/wiki/Little\_Boy

#### Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

https://youtu.be/t-O-Qdh7VvQ?t=10

# Äquivalenz von Masse und Energie $E = mc^2$ vs. $E_{kin} = mgh$

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Energie aus

### Beispiel 1: Kugelschreiber im freien Fall

~14g Gewicht 0.22 J

#### Beispiel 2: Little Boy

> 70 Kugelschreiber genzündetes Reaktionsmaterial  $^a$  5.4  $\times$   $10^{16}$  J

a https://de.wikipedia.org/wiki/Little\_Boy

#### Beispiel 3: Katze

~5kg Gewicht

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

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

### Gliederung

Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

Masse

#### Kernfusion

Forschung

Bedingungen für die Fusion

Fusion in der Soni Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusior Trägheitsfusion Erbrütung von Tritium Sicherheit der Äquivalenz von Masse und Energie

- 2 Kernfusion
  - Geschichte der Forschung
  - Bedingungen für die Fusion
  - Fusion in der Sonne
  - Wasserstoffbombe
  - Fusionsreaktor
    - Magnetische Fusion (Tokamak / Stellarator)
    - Trägheitsfusion
    - Erbrütung von Tritium
    - Sicherheit der Reaktoren

# Geschichte der Forschung Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktorei

- 1917: Erste Kernreaktion (Rutherford)<sup>1</sup>
- ¶ 1920: Fusionsreaktion mögliche Energiequelle von Sternen²
- 1934: Erste Fusionsreaktion im Labor<sup>3</sup>
- ab 1945: Erforschung der Nutzung von Fusionsreatkionen in Atombomben
- 1952: Zündung der ersten Wasserstoffbombe<sup>4</sup>
- 1991: Erste kontrollierte Kernfusion zur Energiegewinnung<sup>5</sup>

http://web.lemovne.edu/~giunta/rutherford.html

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

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

http://nuclearweaponarchive.org/Usa/Tests/Ivy.html

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



Luca Kiebel

Kernfusio

Forschung

Bedingungen für die

Fusion in der Sonne

Fusionsreaktor

Trägheitsfusion Erbrūtung von Tritium

Sicherheit de Reaktoren • Hitze: 100 Millionen Kelvin

-> Wasserstoff ist Plasma

• Druck: Atomkerne ~1 Femtometer entfernt

• Sonne: Gravitation; Erde: Magnete



Luca Kieb

. . . .

Kernfusio

Geschichte der Forschung

Bedingungen für d Fusion

Wasserstoffbombe

Fusionsreakto

Trägheitsfusion Erbrütung von

Sicherheit der Reaktoren

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



Karnfucian

Geschichte der

Forschung Bedingungen für d Fusion

Wasserstoffbombe

Fusionsreakto

Trägheitsfusion Erbrūtung von

Sicherheit der

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

# Fusion in der Sonne Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

Masse

Kernfusi

Geschichte der Forschung

Fusion

Fusion in der 50

E ...

1 asionsicalition

Trägheitsfusion

Tritium

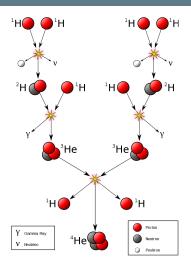


Abbildung: Fusion in der Sonne



# Fusion in der Sonne Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebe

Masse

Kernfusi

Forschung

Fusion in der Sc

Wasserstoffbomb

Fusionsreakto

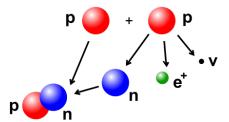
. . . . . .

Trägheitsfusio

Tritium

Sicherheit de Reaktoren

$$\bullet$$
 <sup>1</sup>H + <sup>1</sup>H  $\to$  <sup>2</sup>H + e<sup>+</sup> +  $\nu_{\rm e}$  + 0,42 MeV



# Kernfusion und

# Fusion in der Sonne Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Masse

Kernfusio

Forschung Bedingungen für o

Fusion in der Son

Wasserstoffbomb

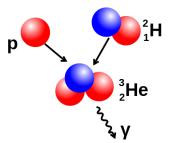
Fusionsreakto

Magnetische Fusio

Erbrütung vor

Sicherheit d





# Fusion in der Sonne Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

Masse

Kernfusi

Geschichte der Forschung

Fusion

Fusion in der 50

E ...

1 asionsicalition

Trägheitsfusion

Tritium

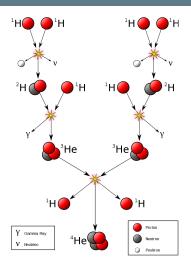


Abbildung: Fusion in der Sonne

# Kernfusion und

# Fusion in der Sonne Kernfusion

Fusionsreaktoren

Luca Kiebe

Masse

Kernfusi

Geschichte der Forschung

Fusion

Wasserstoffhomh

Eucioneroakto

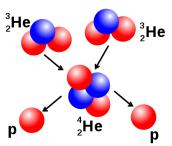
Trägheitsfusion

Erbrütung vo

Sicherheit d

Proton-Proton-I-Kette: 83,30 %

$$\bullet$$
  ${}^{3}\text{He} + {}^{3}\text{He} \rightarrow {}^{4}\text{He} + 2\,{}^{1}\text{H} + 12,86 \text{ MeV}$ 



# Fusion in der Sonne Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Masse

Geschichte der Forschung Bedingungen für d

Fusion in der Sonr

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion
Erbrütung von
Tritium
Sicherheit der

Proton-Proton-I-Kette: 83,30 %

ullet Proton-Proton-II-Kette: 16,68 %

• 2x <sup>4</sup>He

Proton-Proton-III-Kette: 0,02 %

• 2x <sup>4</sup>He

# Fusion in der Sonne Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Energie ai Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für
Fusion

Fusion in der Son

Fusionsreaktor Magnetische Fusion Trägheitsfusion

Erbrütung von Tritium Sicherheit der Reaktoren Meiste Fusion findet im Kern statt

Größter Teil des Lebens eines Sternes: H → He

• Nachdem der H-Vorrat ausgeht: Schwerere Elemente, bis Fe

Schwerer als Fe: Supernova



Luca Kiebel

iviasse

Kernfusio

Forschung Bedingungen für d

Fusion in der S

Wasserstoffhom

Fusionsreaktor

. . . . .

Trägheitsfusio

Erbrütung vo

Sicherheit

### Atombombe:

- Sprengstoff verdichtet Spaltmaterial
- -> Kettenreaktion wird ausgelöst

### Wasserstoffbombe:

- Atombombe verdichtet Spaltmateria
- -> Fusionsreaktionen beginner



### Atombombe:

- Sprengstoff verdichtet Spaltmaterial
- -> Kettenreaktion wird ausgelöst

### Wasserstoffbombe:

- Atombombe verdichtet Spaltmaterial
- -> Fusionsreaktionen beginnen

Luca Kiebel

Kernfusio Geschichte

Bedingungen für die Fusion Fusion in der Sonne

Wasserstoffbomb

Magnetische Fusi Trägheitsfusion Erbrütung von Tritium

Sicherheit Reaktoren

### Wasserstoffbombe Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebe

Energie au

Kernfus

Geschichte der Forschung

Bedingungen für o Fusion

Wasserstoffbom

Fusionsreakto

Magnetische Fusio

Erbrütung von Tritium

Sicherheit de

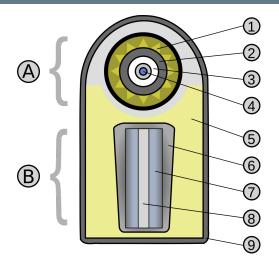


Abbildung: Wasserstoffbombe

# Wasserstoffbombe Kernfusion

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebe

Energie Masse

Kernfus

Geschicht

Bedingungen für

Fusion

Wasserstoffho

Eucloperoalsto

1 asionsicalition

Trägheitsfusio

Erbrütung von

Sicherheit

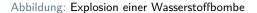












### Gliederung

Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

Äquivalenz von Masse und Energie

Kernfusion

Geschichte der

Geschichte der Forschung

Fusion
Fusion in der Sonr
Wasserstoffbombe

Bedingungen f
ür die Fusion

#### Fusionsreakto

Fusion in der SonneWasserstoffbombe

Trägheitsfusion Erbrütung von Tritium Sicherheit der Reaktoren

Section Fusion Fusio

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

# Magnetische Fusion Fusionsreaktor

Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

Kernfusion

Geschichte der Forschung Bedingungen für d Fusion

Wasserstoffbombe

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion
Erbrütung von
Tritium
Sicherheit der

- Meistverfolgter Entwicklungsweg f
  ür 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

Masse Kernfusio

Geschichte der Forschung Bedingungen für d Fusion

Fusion in der Sonn Wasserstoffbombe

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion Erbrütung von Tritium Sicherheit der  Meistverfolgter Entwicklungsweg f
ür 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

E----!- ----

Kernfusi

Kerntus

Forschung

Fusion

Fusion in der So

Wasserstoffbom

Fusionsreaktor

Magnetische Fusi

I ragheitstusio

Tritium

Sicherheit d

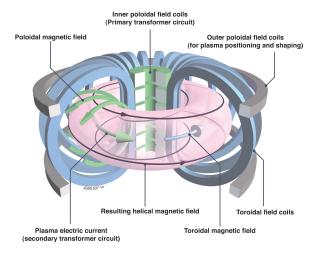


Abbildung: Tokamak-Prinzip

# Tokamak - Funktion Fusionsreaktor

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Energie ai Masse

Geschichte der Forschung Bedingungen für d

Fusion in der Sonn Wasserstoffbombe

Magnetische Fusion

Erbrütung von Tritium Sicherheit der Plasma wird durch Hitze und Druck erzeugt

Plasma wird durch Magnete in Torusform gehalten

Im Plasma fusioniert Wasserstoff zu Proton-Proton-II-Kette

### Stellarator Fusionsreaktor

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebe

Energie a Masse

Kernfusi

Geschichte d

Forschung

Bedingungen für

F . . . . .

Wasserstoffhom

Fusionsreaktor

Magnetische Fusi

i ragneitstu

Erbrütung v

Sicherheit d

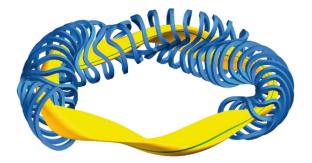


Abbildung: Stellarator-Prinzip



iviasse

Kernfusio

Forschung

Bedingungen für d
Fusion

Fusion in der Sonr Wasserstoffbombe

Fusionsreakto

Trägheitsfusion

Sicherheit der

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

# Trägheitsfusion Fusionsreaktor

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebe

Masse

Kernfusi

Geschichte der Forschung Bedingungen für die

Fusion in der Son

Wasserstoffbon

I usionsieaktoi

Trägheitsfusion

Erbrütung von Tritium

Sicherheit d

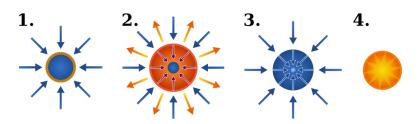


Abbildung: Zünden einer Trägheitsfusionsreaktion



## Erbrütung von Tritium aus Lithium-6 Fusionsreaktor

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebe

ividasc

Kernfusio

Forschung

Fusion

Wasserstoffbombe

Husionsreaktor

Magnetische Fusion

Magnetische Fusion
Trägheitsfusion

Erbrütung von Tritium

Sicherheit d

• zu 90 %

$$\bullet$$
 <sup>6</sup>Li + n  $\rightarrow$  <sup>4</sup>He + <sup>3</sup>H + 4,8 MeV

Hohe Energieausbeute



# Erbrütung von Tritium aus Lithium-7 Fusionsreaktor

Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Masse

Kernfusio

Geschichte der Forschung Bedingungen für di

Fusion in der Sonr

Wasserstoffbombe

Magnetische Fusion

Erbrütung von

Sicherheit o

• zu 10 %

 $\bullet$  <sup>7</sup>Li + n  $\rightarrow$  <sup>4</sup>He + <sup>3</sup>H + n' - 2.5 MeV

Neutron nicht verbraucht

Hohe Energieschwelle



Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

Energie ai Masse

Kernfusion

Geschichte der
Forschung

Bedingungen für

Fusion in der Son

Fusionsreaktor

Magnetische Fusi

Trägheitsfusion

Sicherheit der Reaktoren

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



Kernfusion und Fusionsreaktoren Luca Kiebel

Energie ai Masse

Geschichte der Forschung Bedingungen für Fusion

Fusion Fusion in der Sonne Wasserstoffbombe

Fusionsreaktor

Magnetische Fusion

Trägheitsfusion

Erbrütung von

Sicherheit de Reaktoren

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



Luca Kiehel

Masse

Kernfusion

Forschung

Fusion in der Soi

Wasserstoffbomb

Fusionsreaktor

Trägheitsfusion

Tritium Sicherheit der Reaktoren Kernfusion und Fusionsreaktoren

Luca Kiebel

Hans-Böckler-Berufskolleg

21. Februar 2018