

*An dieser Stelle taucht ein neuer Materiezustand auf (nach fest, flüssig und gasförmig), der in der Physik des 20. Jahrhunderts eine große Bedeutung erlangt hat für das Materieverhalten bei hohen Energiedichten.*

*Der Ablauf einer Kernfusion ist alles andere als einfach oder naheliegend, da eine außergewöhnlich große Kraft versucht, die Protonen am fusionieren zu hindern. Beachte: die Coulombkraft zwischen Punktladungen wächst mit  $1/r^2$  !*

## 3.6 Energieerzeugung im Inneren der Sonne (2)

### Plasma

Bei den ....., die in der Sonne vorherrschen, werden alle Atome durch heftige Stöße vollständig ....., so dass ..... und ..... einen einheitlichen Brei bilden, diesen Materiezustand nennt man **Plasma**.

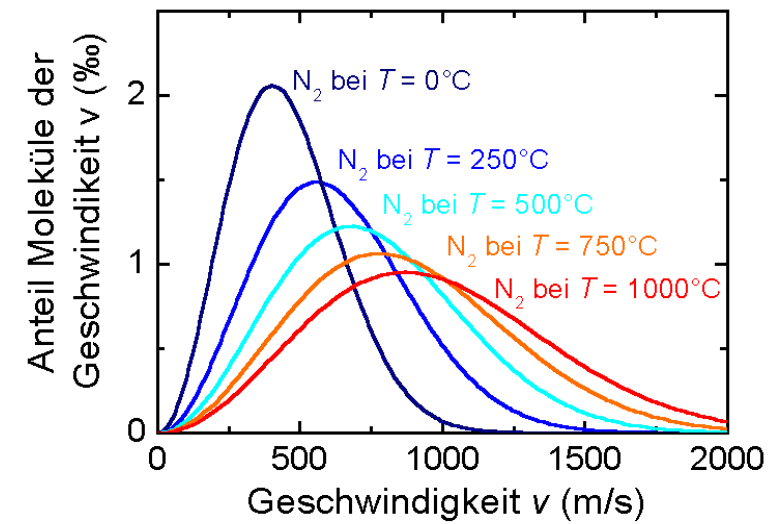
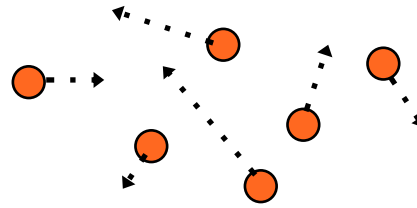
### Coulombabstoßung bei p-p-Reaktion



Damit zwei Protonen miteinander verschmelzen (fusionieren) können, müssen sie sich auf eine ..... .  
Dabei werden sie durch eine (äußerst hohe) .....  
..... (Coulombkraft) voneinander ..... .  
Um sie zu überwinden, müssen die Protonen eine .....  
Geschwindigkeit haben, das Plasma also eine hohe ..... .

Eigentlich müsste das Plasma eine Temperatur von etwa 1 Mrd. K erreichen, damit ein durchschnittliches Proton schnell genug ist, um die Coulombabstoßung zu überwinden. Doch selbst im Inneren der Sonne herrschen "nur" 15 Mio K. Damit es doch klappt, helfen zwei "Tricks" der Natur, die Maxwell-Verteilung und der Tunneleffekt.

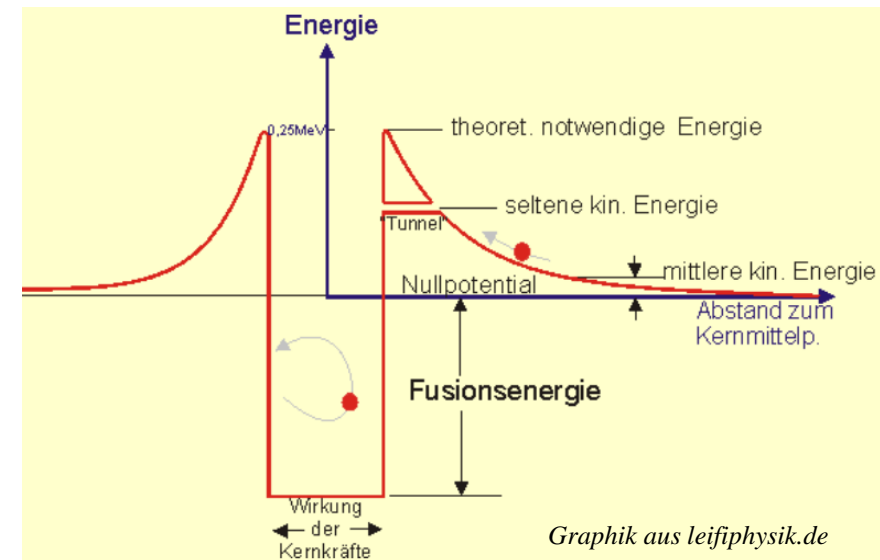
## 1. Trick: Die Maxwell-Verteilung



Graphik aus wikipedia.de

Der Tunnel-Effekt ist für uns schwer zu verstehen, da wir mit der Quantenphysik nicht vertraut sind. Es ist eine Eigenheit von Quantenobjekten (zu denen auch unsere Protonen zählen), dass sie zwischen zwei Orten wechseln können, obwohl sie sich im Bereich zwischen diesen Orten nicht aufhalten können.

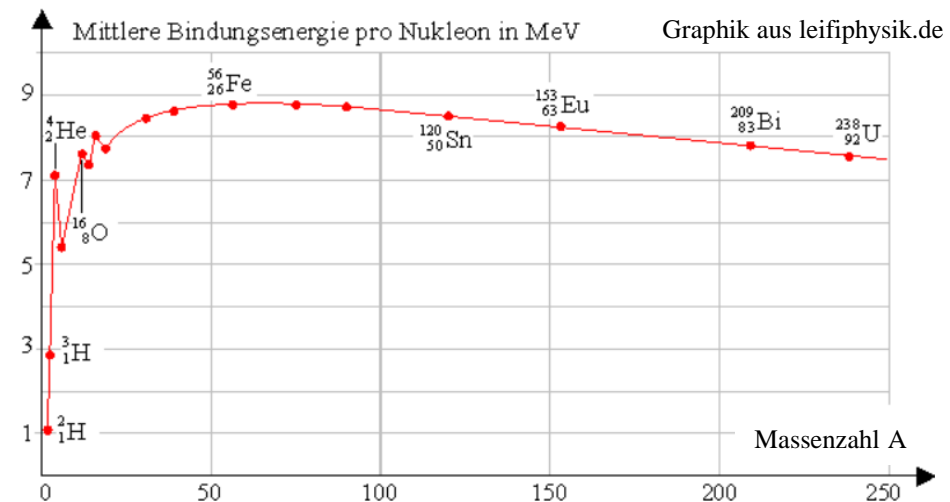
## 2. Trick: Der Tunnel-Effekt



Graphik aus leifiphysik.de

Natürlich kann man außer Helium auch andere Atomkerne aus Nukleonen oder kleineren Atomkernen fusionieren. Die Reaktionen laufen aber nur dann "von selbst" ab, wenn sie exotherm sind, also Energie liefern. Das Diagramm zeigt die mittlere Bindungsenergie pro Nukleon  $B/A$  in Abhängigkeit von der Massenzahl. Welche Reaktionen verlaufen exotherm?

## Fusion höherer Elemente



Reaktionen verlaufen exotherm, wenn die Bindungsenergie pro Nukleon dabei ..... . Deren Betrag wird dabei ..... .

## Kernbindungsenergie pro Nukleon (Beispiele)

Die Kernbindungsenergie können wir leicht mit Hilfe des Massendefekts berechnen, der sich zwischen der Summe der Massen der Nukleonen und der Masse des Endkerns ergibt. Berechne auch für Fe56 ( $m_{\text{Fe56}} = 55,920708 \text{ u}$ ) die Bindungsenergie pro Nukleon. Die Massen der Nukleonen findest Du auf dem vorhergehenden Blatt.

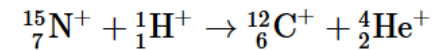
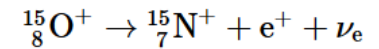
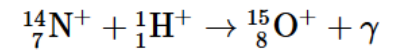
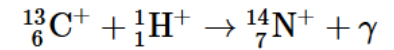
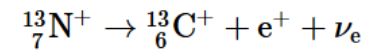
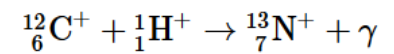
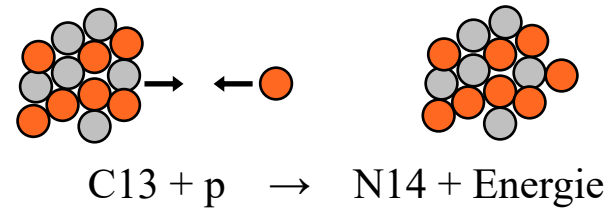
Neben der p-p-Reaktion finden sich noch andere Möglichkeiten, aus Wasserstoff Helium zu fusionieren. Die berühmteste wurde von den Physikern Bethe und Weizsäcker unabhängig voneinander gefunden. **Berechne die freiwerdende Energie im 3. Schritt des Bethe-Weizsäcker-Zyklus.**

**Durch solche Reaktionen entstanden alle Elemente, die wir im Universum vorfinden, durch Fusion in früheren Sternen!**

## Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus

Bei niedrigen Temperaturen ist eine Fusion von Protonen zu Helium dadurch möglich, dass Kohlenstoffkerne quasi als Katalysatoren dienen, die am Ende des Fusionsprozesses wieder in ihrer Ursprungsform vorliegen (siehe Reaktionstabelle).

### Bsp: Fusion von Stickstoff



entnommen aus leifiphysik.de

$$m_{\text{p}} = 1,007277 \text{ u}$$

$$m_{\text{C13}} = 13,000064 \text{ u}$$

$$m_{\text{N14}} = 13,999236 \text{ u}$$

$$1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

### **Selbst-Check:**

- Plasma
- Coulomb-Abstoßung
- Maxwell-Verteilung
- Tunneleffekt
- Bindungsenergie pro Nukleon
- Bethe-Weizsäcker-Zyklus

### Aufgabe:

Hier passt gut die Fusion von Deuterium zu Helium aus der p-p-Reaktion. Suchbegriff auf Leifiphysik: „relativer massendefekt“