

Fusionsreaktionen sind die Energiequelle der Sonne und der Sterne. Bei einer Fusionsreaktion verschmelzen leichte Atomkerne zu massereicheren. Der Fusionsprozeß wandelt Masse (m) gemäß der Einstein-Formel $E = mc^2$ in kinetische Energie (E) um. Eine Abfolge verschiedener Fusionsreaktionen, die sich "Proton-Proton-Kette" nennt, erzeugt den größten Teil der Energie unserer Sonne und wird dies noch für einige Milliarden Jahre tun. Die p-p-Kette geht aus von Protonen, den Kernen des einfachen Wasserstoffatoms, und endet bei Alphateilchen, den Kernen des Heliumatoms.

ENERGIEQUELLEN UND UMWANDLUNG

EIN ÜBERBLICK ÜBER ENERGIEUMWANDLUNGSPROZESSE

Energie kann viele verschiedene Formen annehmen und eine Vielzahl von Mechanismen kann eine Form in eine andere umwandeln. Während der Gesamtbetrag der Energie immer gleich bleibt, schränken die meisten Umwandlungsprozesse den tatsächlich nutzbaren Betrag spürbar ein.

Grundtyp	Umwandlung	nutzbare Energie
chemisch, Schwerkraft, nuklear, solar, usw.	nutzbare $E_{\text{aus}} = \eta E_{\text{ein}}$ η = thermodynamischer Wirkungsgrad: 10-40% sind typisch.	mechanisch elektrisch Wärme

Abfall-Materialien Verlust-Energie

Physikalische Parameter energiefreisetzender Reaktionen

Reaktionstyp:	chemisch	Kernspaltung	Kernfusion
Beispielreaktion	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$^1_0n + ^{235}_{92}\text{U} \Rightarrow ^{143}_{54}\text{Ba} + ^{91}_{38}\text{Kr} + 2^1_0n$	$D(^2\text{H}) + T(^3\text{H}) \Rightarrow ^4\text{He} + ^1_0n$
verwendeter Brennstoff	Kohle, Öl und Luft	UO_2 (3% ^{235}U + 97% ^{238}U)	Deuterium und Lithium
Typ. Temperatur (K)	1000	1000	100 000 000
pro kg Brennstoff freigesetzte E (J/kg)	$3,3 \times 10^7$	$2,1 \times 10^{12}$	$3,4 \times 10^{14}$

WIE DIE FUSION FUNKTIONIERT

DIE KERNPHYSIK DER FUSION

Die Verschmelzung von Elementen geringer Masse setzt genau wie die Spaltung von Elementen hoher Masse Energie frei.

Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit der Kernmasse

nur Elemente geringer Masse

Nukleare Reaktionsenergie : $\Delta E = k (m_i - m_f) c^2$

Abgeleitet aus der Einstein-Formel $\Delta E = mc^2$. ΔE = pro Reaktion freigesetzte Energie; m_i = Summe der Einzelmassen vor der Reaktion; m_f = Summe der Massen der Reaktionsprodukte. In SI-Einheiten beträgt der Umrechnungsfaktor $k=1$; er beträgt 931,466 MeV/uc², wenn E in MeV und m in atomaren Masseeinheiten (u) genommen wird.

Einige Kernmassen
(Die Masse des Elektrons beträgt 0,000549 u.)

Bezeichnung	Teilchen	Masse (u*)
n (¹ n)	Neutron	1,008665
p (¹ H)	Proton	1,007276
D (² H)	Deuteron	2,013553
T (³ H)	Triton	3,015500
³ He	Helium-3	3,014932
α (⁴ He)	Helium-4	4,001506

* 1 u = 1,66054 x 10⁻²⁷ kg = 931,466 MeV/c²

Ratenkoeffizienten von Fusionsreaktionen

Reaktionsrate der Fusion = $R n_1 n_2$

n_1, n_2 = Dichten der Reaktionspartner (Ionen/m³); R = Ratenkoeffizient (m³/s). Multipliziert mit ΔE erhält man die Leistungsdichte des Fusionsprozesses.

Fusion

Physik einer fundamentalen Energiequelle

ZWEI WICHTIGE FUSIONSPROZESSE

$D + T \Rightarrow ^4\text{He} + ^1_0n$

für die erste Generation von Fusionskraftwerken

Brennstoffe Fusion Endprodukte

1 eV = 1,6022 x 10⁻¹⁹ J. Die mittlere kinetische Energie von 1 eV entspricht einer Temperatur von 11 600 K.

"p-p": DIE SOLARE FUSIONSKETTE

SCHAFFUNG FUSIONSRELEVANTER BEDINGUNGEN

PLASMAHEIZUNG UND -EINSCHLUSS

Einschluß:	Schwerkraft	Magnetfelder	Massenträgheit
Typische Dimensionen:	<----- Größe: 10 ¹⁹ m -----> Lebensdauer: 10 ¹⁵ - 10 ¹⁸ s	<----- Größe: 10 m -----> Lebensdauer: 10 ⁻² - 10 ⁶ s	<----- Größe: 10 ⁻¹ m -----> Lebensdauer: 10 ⁻⁹ - 10 ⁻⁷ s
Heiz-mechanismen:	<ul style="list-style-type: none">KompressionEnergie der Fusionsprodukte	<ul style="list-style-type: none">elektromagnetische Wellenohm'sche Heizung (elektrischer Strom)Neutralstrahl-Injektion (Wasserstoff-Atomstrahlen)KompressionEnergie der Fusionsprodukte	<ul style="list-style-type: none">Kompression (durch Laser- oder Ionenstrahlen bzw. durch in Folge entstehende Röntgenstrahlen verursachte Implosion)Energie der Fusionsprodukte

Um Fusion auf der Erde Wirklichkeit werden zu lassen, müssen Atome auf extrem hohe Temperaturen aufgeheizt werden, typisch auf mehr als 10 Millionen K. In diesem Zustand sind Atome ionisiert, sie bilden ein Plasma. Für die Erzeugung nutzbarer Energie ist es notwendig, das Plasma lange genug zusammenzuhalten, d.h. es einzuschließen, damit genügend viele Verschmelzungsreaktionen stattfinden können. Wenn es gelingt, Fusionskraftwerke zu bauen, hätten wir eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung. Die Brennstoffe Deuterium und Lithium sind im Überfluß auf der Erde vorhanden. Wesentliche Fortschritte sind auf dem Weg zu diesem Ziel bereits erreicht worden.

PLASMA – DER VIERTE AGGREGATZUSTAND

EIGENSCHAFTEN TYPISCHER PLASMEN

Plasmen bestehen aus frei beweglichen geladenen Teilchen, d.h. Elektronen und Ionen. Sie entstehen bei extrem hohen Temperaturen, wenn Elektronen vom bis dahin neutralen Atom abgetrennt werden. Sie sind in der Natur und im Universum allgegenwärtig. So bestehen Sterne z.B. vorwiegend aus Plasma. Man bezeichnet Plasmen als den vierten Aggregatzustand, weil sie einzigartige physikalische Eigenschaften aufweisen, die sie von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen deutlich unterscheiden. Die Temperaturen und Dichten von Plasmen erstrecken sich über einen extrem weiten Parameterbereich.

FUSION MÖGLICH MACHEN

EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE DER FUSIONSFORSCHUNG

Sowohl die Trägheitsfusion als auch die magnetische Fusion konzentrieren sich auf das Verständnis von Plasmaeinschluß und -heizung. Die Forschungsanstrengungen haben zu höheren Plasmatemperaturen T_i , Dichten n_i und Energieeinschlußzeiten τ geführt. Zukünftige Fusionskraftwerke werden eine Leistung von typisch 1 GW liefern. Ihre Plasmen werden eine Temperatur von etwa $T_i = 120$ Millionen K haben, während der Einschlußparameter $n_i \tau$ etwa $2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$ betragen wird.

Copyright © 1996 Contemporary Physics Education Project (CPEP). Translation by Forschungszentrum Jülich / TEC

CPEP ist eine gemeinnützige Organisation von Lehrern, Dozenten und Physikern mit maßgeblicher Beteiligung von Studenten. Öffentlich und private Förderung sowie die Unterstützung durch Forschungsinstitute waren für dieses Projekt wesentlich und werden es auch Zukunft sein. Dieses Poster wurde von CPEP mit Hilfe der folgenden Organisationen entworfen: the AIP Journal *Physics of Plasmas*, the Division of Plasma Physics of the APS, General Atomics, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Princeton Plasma Physics Laboratory, the University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, the U.S. Department of Energy and the Trilateral Euregio Cluster. Graphiken: NASA, the National Solar Observatory, Steve Albers und die oben genannten Organisationen.