

Was ist Kernfusion?

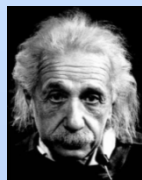
Kernfusion ist die Nutzbarmachung von Energie durch Verschmelzen von Atomkernen. In der Sonne passiert dieser Prozess andauernd: Vier Protonen werden zu einem Heliumatom verschmolzen und dabei wird Energie frei. In einem Kraftwerk auf der Erde wäre die Kernfusion eine Energiequelle für die Zukunft. In solch einem Kraftwerk sollen jeweils ein Deuterium- und ein Tritiumkern verschmolzen werden.



Wo kommt die Energie her?

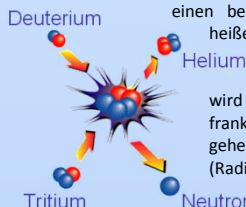
Die Masse des bei der Verschmelzung entstandenen Heliumatoms ist kleiner als die zusammengezählten Massen von Deuterium- und Tritiumkern. Die fehlende Masse ist aber nicht verschwunden, sie wurde in Energie umgewandelt und zwar nach der berühmten Formel von Albert Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$



Da die Lichtgeschwindigkeit sehr groß ist ($c=1.1$ Milliarden km/h) ergibt bereits eine sehr kleine Massedifferenz eine große Energie. Daher benötigt ein Fusionskraftwerk viel weniger Brennstoff als zum Beispiel ein Kohlekraftwerk: Der Jahresenergiebedarf einer Familie kann durch 2 l Wasser (Deuterium) und 250 g Steine (Lithium, welches in Tritium umgewandelt werden kann) gedeckt werden – anstelle von 1000 l Öl.

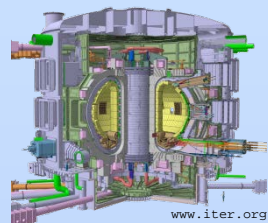
Ein ähnliches Prinzip wird übrigens auch bei Kernspaltungskraftwerken verwendet: Bei der Spaltung von schweren Atomkernen geht ebenfalls ein kleiner Teil Masse



verloren und wird in Energie umgewandelt. Im Gegensatz zu Kernspaltungsreaktoren entsteht bei der Fusion allerdings sehr viel weniger langlebige radioaktive Strahlung. Schwere Reaktorunfälle sind ausgeschlossen und der benötigte Brennstoff ist auf der Erde in großen Mengen vorhanden.

Was ist ITER?

In Fusionsexperimenten wird seit etwa 60 Jahren untersucht, wie das Sonnenfeuer auf die Erde geholt werden kann. Im Laufe dieser Zeit wurde das Verständnis der im Plasma stattfindenden Prozesse immer besser. Zudem wurden die Experimente immer größer – das größte existierende Fusionsexperiment, JET in England hat einen Radius von 2.96 Metern (bis zum Zentrum des Plasmas). Die zunehmende Größe der Experimente hat einen besseren Einschluss der Energie im heißen und dichten Plasma zur Folge. Der nächste Schritt ist ITER.

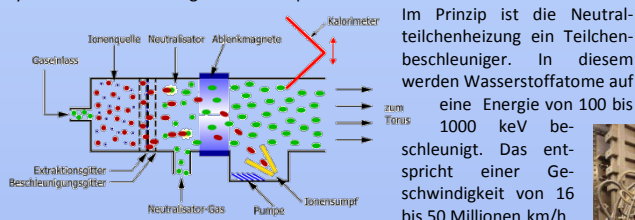


Dieses internationale Experiment wird momentan in Cadarache in Südfrankreich aufgebaut und 2020 in Betrieb gehen. ITER ist so groß (Radius=6.2 Meter), dass erstmals in einem Experiment mehr Energie durch Fusion erzeugt werden kann, als extern durch Heizungen eingebracht wird (es ist ein Energieverstärkungsfaktor von zehn geplant). Somit ist ITER ein wichtiger Zwischenschritt auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk.

Neutralteilchenheizung

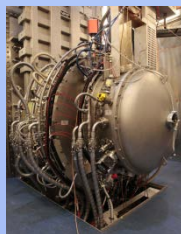
Funktionsweise

Das Plasma in einem Fusionsreaktor muss auf über 100 Millionen Grad Celsius (zehn mal heißer als die Sonne!) aufgeheizt werden. Dazu stehen verschiedene Techniken zur Verfügung: Durch einen im Plasma fließenden Strom, durch eingestrahlte elektromagnetische Wellen oder durch Einschleusen schneller Wasserstoffatome (Neutralteilchenheizung). Am IPP betreibt der Bereich ITED die Neutralteilchenheizung für ASDEX Upgrade und konstruiert bzw. entwickelt die Systeme für die zukünftigen Fusionsexperimente Wendelstein 7-X und ITER.



Da keine Methode zur Verfügung steht, neutrale Atome gerichtet auf derartige Geschwindigkeiten zu beschleunigen, wird ein Trick verwendet: Der erste Teil des Teilchenbeschleunigers besteht aus einer Ionenquelle, in der geladene Wasserstoffteilchen erzeugt werden. Diese Ionen werden mit Hilfe einer starken elektrischen Spannung abgesaugt und beschleunigt. Anschließend werden die Ionen in einem Neutralisator in elektrische neutrale Atome umgewandelt.

Im Prinzip ist die Neutralteilchenheizung ein Teilchenbeschleuniger. In diesem werden Wasserstoffatome auf eine Energie von 100 bis 1000 keV beschleunigt. Das entspricht einer Geschwindigkeit von 16 bis 50 Millionen km/h.



Aufbau und Betrieb positiver Ionenquellen

Die Neutralteilchenheizung am ASDEX Upgrade liefert eine Heizleistung von insgesamt 20 MW über zehn Sekunden. In Ionenquellen wird ein Wasserstoffplasma (positive Wasserstoffionen und Elektronen) erzeugt und die Ionen mit Hilfe einer negativen Spannung extrahiert, beschleunigt (auf bis zu 100 keV) und dann neutralisiert. Dieses Verfahren funktioniert so zuverlässig, dass die Neutralteilchenheizung aus dem Betrieb von ASDEX Upgrade fast nicht mehr wegzudenken ist. An Wendelstein 7-X wird ein im Prinzip identisches System wie an ASDEX Upgrade aufgebaut. Allerdings ist für den Betriebsstart eine reduzierte Heizleistung von insgesamt 5 MW vorgesehen.

Negative Ionenquellen für ITER

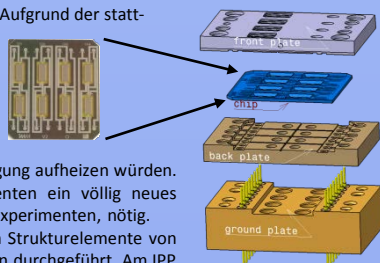
Aufgrund der Größe von ITER muss die Neutralteilchenheizung deutlich höhere Energien als bei ASDEX Upgrade zur Verfügung stellen (40 A Strom bei einer Energie von bis zu 1 MeV). Bei diesen Energien ist es nicht möglich, positive Wasserstoffionen in einem Neutralisator in Atome umzuwandeln. Negative Wasserstoffionen lassen sich dagegen auch bei hohen Energien leicht neutralisieren. Daher wird die Neutralteilchenheizung für ITER auf der Erzeugung, Beschleunigung und Neutralisation von negativen Ionen basieren. Da ein Plasma hauptsächlich aus positiven Ionen und Elektronen besteht, ist die Erzeugung ausreichend negativer Wasserstoffionen sehr anspruchsvoll. Am IPP wird seit mehr als zehn Jahren an negativen Ionenquellen für ITER geforscht. 2007 wurde von ITER entschieden, das Design der am IPP entwickelten Ionenquelle für die Neutralteilchenheizung zu verwenden.

Diagnostik an ITER

Motivation

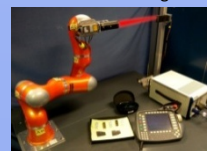
Als Diagnostiken werden Geräte bezeichnet, mit denen bestimmte Eigenschaften eines Systems gemessen werden können. Zum Beispiel der Tachometer in einem Auto oder ein Quecksilberthermometer. In Fusionsexperimenten dienen Diagnostiken zum einen, um einen stabilen Plasmazustand sicherzustellen und zu überwachen. Zum anderen werden Messungen durchgeführt, deren Resultate dazu dienen, das Verständnis der ablaufenden Prozesse und der zugrunde liegenden Physik zu vertiefen.

Das oben als Beispiel genannte Quecksilberthermometer würde allerdings in ITER nicht sehr lange überleben: Aufgrund der stattfindenden Kernfusionsprozesse werden die Materialien einer starken Neutronenstrahlung ausgesetzt. Zudem sollen Pulse von bis zu einer Stunde durchgeführt werden (ASDEX Upgrade: wenige Sekunden) – mit der Folge, dass nicht ausreichend gekühlte Teile sich bis zur Beschädigung aufheizen würden. Zusammengekommen ist für die Komponenten ein völlig neues Design, verglichen zu den bisherigen Fusionsexperimenten, nötig. Der Entwurf und der Bau der grundlegenden Strukturelemente von ITER wird von anderen Ländern bzw. Instituten durchgeführt. Am IPP existiert aber viel Erfahrung in Entwicklung und Bau bestimmter Diagnostiken und das Institut wird diese Erfahrung bei ITER mit einbringen. Dabei ist der Bereich ITED federführend.



Bolometer

In einem Fusionsplasma herrscht ein Gleichgewicht aus eingebrachter (entweder durch die Fusion selber oder externe Heizungen) und abgeführter (durch Transportprozesse oder Strahlung) Leistung. Derjenige Anteil der Leistung, der in Form von Strahlung abgeführt wird, kann mit Hilfe von Bolometern bestimmt werden. In so einem Bolometer trifft die Strahlung auf einen Absorber, der sich dadurch erwärmt. Misst man den Temperaturunterschied, so kann auf die eingebrachte Strahlungsleistung zurück geschlossen werden. Für ITER sind insgesamt 105 Bolometer geplant, die auf dem am IPP entwickelten Konzept von miniaturisierten Metallwiderstandsbolometern beruhen. Aufgrund der hohen Belastungen in ITER ist eine sehr aufwendige Weiterentwicklung nötig. Diese wurde seit 2008 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Dabei wurden Detektorprototypen und Diagnostikkomponenten entwickelt und getestet.



Manometer

Manometer sind Druckmessgeräte. Sie werden in Fusionsanlagen zur Regelung und Steuerung der Plasmaentladung benötigt. Das Design der Manometer für ITER basiert auf dem am IPP entwickelten Konzept eines für den Betrieb in Magnetfeldern modifizierten Ionisationsmanometers. Auch hierfür ist für ITER eine aufwendige Weiterentwicklung der bisher verwendeten Geräte nötig. Dieses am IPP durchgeführte Projekt wird über die kommenden Jahre mit europäischen Geldern unterstützt werden.