

**FWU - Schule und Unterricht**

**DVD 46 02527** 18 min, Farbe



FWU-Klassiker  
**Kernfusion**

**FWU –  
das Medieninstitut  
der Länder**



## **Lernziele - nach Lehrplänen und Schulbüchern**

*Die Schüler lernen, dass bestimmte Atomkerne unter Energiefreisetzung verschmelzen können; sie erkennen den Unterschied zwischen der Kernfusion auf der Sonne und der in einem Fusionskraftwerk angestrebten Reaktion; sie verstehen, unter welchen Bedingungen die Kernfusion auf der Erde möglich ist und welche technischen Schwierigkeiten in einem Fusionskraftwerk überwunden werden müssen.*

## **Vorkenntnisse**

*Die Schüler sollten grundsätzliche physikalische Phänomene aus der Elektrodynamik kennen, zum Beispiel Magnetfelder, elektrische Ströme und Induktion. Auch der Aufbau der Atome aus Protonen, Neutronen und Elektronen ist Voraussetzung zum Verständnis des Films.*

## **Zum Inhalt**

Die Sonne wird eingeführt als der große Energiespender für die Erde und Quell allen irdischen Lebens. Der Grund für die scheinbar unerschöpfliche Energie der Sonne ist die Kernfusion. Diese Energiequelle wollen Forscher auf die Erde holen, sie wollen also Kernfusion in einem irdischen Kraftwerk betreiben. Die bedeutendste Forschungsstätte für Kernfusion in Deutschland ist das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München mit seinem Teilinstitut in Greifswald in Mecklenburg-Vorpommern.

Nun werden die Bedingungen auf der Sonne erläutert, die die Fusion, also das Verschmelzen der Atomkerne, möglich machen. Einmal sorgen hohe Temperaturen von über 15 Millionen Grad dafür, dass die Atome ein Plasma bilden. Animationen zeigen, dass sich in einem Plasma die Elektro-

nen und die Atomkerne voneinander gelöst haben und sich mit hoher Geschwindigkeit getrennt voneinander bewegen. Sehr schnelle Atomkerne haben die Energie, die nötig ist, um miteinander zu verschmelzen. Die Bilanz der Fusion: vier Wasserstoffkerne verschmelzen zu einem Heliumkern. Der Heliumkern ist leichter als die Ausgangsprodukte. Didaktisch wird dies veranschaulicht, indem die Fusionsreaktion auf einer Balkenwaage „abläuft“. Ein Teil der Masse hat sich somit in Energie umgewandelt. Diese Energie sorgt für die hohen Temperaturen auf der Sonne und hält die Fusion am Laufen; der größte Teil dieser Energie jedoch strahlt in den Weltraum ab und wird so zum Energiespender für die Erde. Nun stellt der Film in einer Kombination von Realsequenzen und Animationen die Forschungsarbeiten der Max-Planck-Wissenschaftler vor. Während auf der Sonne leichter Wasserstoff zu Helium verschmilzt, sollen in einem irdischen Kraftwerk die schwereren Wasserstoff-Isotope Deuterium und Tritium fusionieren. Dies ist die technisch am einfachsten realisierbare und ergiebigste Fusionsreaktion. Als Reaktionsprodukte entstehen ein Helium-Kern und ein Neutron. Da die gleichnamig geladenen Kerne sich abstoßen, müssen sie mit großer Geschwindigkeit aufeinander zulaufen, um diese Barriere zu durchbrechen und sich bis auf die Reichweite der anziehenden Kernkräfte anzunähern. Gäbe es nicht den Tunneleffekt, der in einer weiteren Animation veranschaulicht wird, würden die positiv geladenen Kerne ihre Abstoßung wohl nie überwinden.

Die Wissenschaftler müssen zahlreiche technische Schwierigkeiten meistern, um in einem Plasma Kernfusion zu betreiben. Zunächst müssen die zur Fusion nötigen Tem-

peraturen, etwa 100 Millionen Grad, erzeugt werden. Der Film zeigt die drei Heizmethoden:

1. Heizen durch Induktion eines elektrischen Stroms;
2. Heizen durch Stöße von schnellen, ungeladenen Atomen, die in das Plasma geschossen werden;
3. Heizen durch elektromagnetische Wellen, die die Plasmateilchen anregen.

Genauso wichtig ist es, das Plasma einzuschließen. Auf der Sonne geschieht dies durch die große Masse wie von selbst: die Gravitation hält das Plasma zusammen. Auf der Erde ist dies nicht möglich, da die Plasmen der Forscher nur ein paar Gramm wiegen. Daher müssen Magnetfelder die Plasmateilchen, die ja elektrisch geladen sind, zusammenhalten. Forscher haben hierzu zwei verschiedene Prinzipien entwickelt: das Prinzip des so genannten Tokamak und das des Stellarators. Im Tokamak sorgen ein Magnetfeld von außen und das Magnetfeld eines elektrischen Stroms im Plasma selbst für den Zusammenhalt. Der Nachteil: Dauerbetrieb ist nur mit aufwändigen Zusatzmaßnahmen möglich.

Im Stellarator schließen nur äußere Magnetspulen das Plasma ein. Der Preis für diesen Vorteil ist die komplexe Form der Spulen, die erst mithilfe von leistungsfähigen Computern genau errechnet werden konnte.

Der Film stellt nun wichtige Vorhaben der Fusionsforschung vor: den Tokamak ASDEX Upgrade in Garching und den Stellarator Wendelstein 7-X in Greifswald. Das Max-Planck-Projekt soll die Kraftwerkstauglichkeit des Stellarator-Prinzips zeigen. Dann JET, den Joint European Torus, im englischen Culham. Dieses weltweit größte Experiment hält den irdischen Rekord. Hier hat

zum ersten Mal das Sonnenfeuer geglimmt, wenn auch nur für zwei Sekunden. Das vierte wichtige Forschungsvorhaben ist ITER, der Internationale Experimentalreaktor. Europa, Russland, Kanada und Japan sind an ITER beteiligt. Der Film zeigt in maßstabsgetreuen Animationen die gewaltigen Ausmaße dieses Fusionsreaktors. ITER soll um das Jahr 2012 gebaut werden. Zum ersten Mal würde ein Fusionsplasma mehr Energie erzeugen, als man für die Aufheizung aufwenden muss. Mit einer Leistung von 500 Megawatt wäre ITER schon mit konventionellen Kraftwerken zu vergleichen. Der Film erklärt anhand von ITER, wie ein Fusionskraftwerk elektrische Energie erzeugen soll. Die bei der Fusionsreaktion entstehenden schnellen Neutronen werden in der Gefäßwand abgebremst und erwärmen sie. Diese Wärme erzeugt wie in einem konventionellen Kraftwerk elektrische Energie mithilfe von Wasserdampf, der Turbinen antreibt.

Der Film geht auch kurz auf Sicherheitsaspekte ein. In einem Fusionskraftwerk entstehen radioaktive Produkte. Am Ende der Betriebsdauer muss ein Teil der Materialien deponiert werden.

## **Ergänzende Informationen**

### ***Sonne und Kernfusion***

Die Sonne ist 330.000 mal so massereich wie die Erde und hat einen Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometern. Ein riesiger Fusionsreaktor! Die Fusion selbst läuft im Kern der Sonne ab. Hier herrschen Temperaturen von rund 15 Millionen Grad. Trotz dieser hohen Temperatur dürften eigentlich keine Fusionsreaktionen stattfinden - zumindest nicht nach den Gesetzen der klassischen Physik. Die Bewegungsenergie der

geladenen Teilchen reicht bei 15 Millionen Grad nicht aus, um die gegenseitige elektrische Abstoßung zu überwinden. Nicht einmal die schnellsten Teilchen, die sich mehr als zehnmal schneller bewegen als der Durchschnitt, können miteinander verschmelzen. Im Jahr 1928 haben Forscher an der Universität in Göttingen das Rätsel mit Hilfe der Quantenmechanik gelöst. Die Unschärferelation von Heisenberg lässt einen erstaunlichen Effekt zu: Manchmal können die Teilchen die elektrische Abstoßung ignorieren und die Energiebarriere einfach durchtunneln. Dann kommen sie sich so nahe, dass eine andere, viel stärkere Kraft die elektrische Abstoßung spielend überwindet: die Kernkraft. Die Teilchen verschmelzen miteinander. Energie wird frei in Form von energiereicher Gammastrahlung, die auch bei der Explosion von Atombomben entsteht. Diese Strahlung besteht - wie sichtbares Licht - aus Quanten. Die Gammaquanten gelangen aus dem Kern in die Hülle der Sonne. Diese Hülle ist sehr wichtig für die Kernverschmelzung. Sie isoliert und hält so den Fusionsreaktor im Inneren auf Betriebstemperatur und den Druck so hoch, dass der Reaktor nicht explodieren kann. Die Gammaquanten benötigen rund eine Million Jahre, um die Hülle zu durchqueren! Dabei werden sie in energieärmere Lichtquanten umgewandelt, die dann die Sonnenoberfläche verlassen. Wäre dies nicht so, könnten wir die Sonne nicht sehen. Außerdem würde kein warmes, gelbes Licht auf die Erde scheinen, sondern ein Tod bringender Hagel an Gammastrahlung. Der Fusionsreaktor Sonne verbrennt jede Sekunde rund 600 Millionen Tonnen Wasserstoff. Der Brennstoff reicht noch für die nächsten etwa viereinhalb Milliarden Jahre.

### ***Irdische Forschung***

Die Wissenschaftler versuchen nicht, die Fusionsprozesse auf der Sonne identisch nachzuahmen. Sie konzentrieren sich auf eine leichter handhabbare Fusionsreaktion. Dabei verschmelzen die schweren Isotope des Wasserstoffs, Deuterium und das radioaktive Tritium, zu Helium. Dabei entsteht zusätzlich ein Neutron.

Deuterium kommt in beinahe unbegrenztem Maß in den Weltmeeren vor. Tritium entsteht im Reaktor selbst, und zwar aus dem ebenfalls häufig vorkommenden Element Lithium.

In einem Fusionskraftwerk muss die Energie aus der Verschmelzung der Atomkerne ausreichen, um die Temperatur im Plasma aufrechtzuerhalten. Das Plasma brennt dann ohne Energiezufuhr von außen. Vorher muss aber das Plasma erst einmal gezündet werden. Drei wichtige Kriterien müssen erfüllt sein: Temperatur, Dichte und Energieeinschlusszeit. Letzteres ist ein Maß für die Güte der Wärmeisolation. Das Produkt aus diesen Größen muss einen bestimmten Wert überschreiten, dann zündet das Plasma. Die Forscher haben herausgefunden, dass besonders günstige Bedingungen dafür bei einer Temperatur von rund 100 Millionen Grad herrschen.

### ***Der magnetische Einschluss:***

Die Plasmen der Forscher wiegen nur bis zu zwei Gramm. Somit spielt die Schwerkraft - im Gegensatz zur Fusion in der Sonne - keine Rolle für den erwünschten Zusammenhalt des Plasmas. Also müssen die Wissenschaftler andere Möglichkeiten finden, das Plasma einzuschließen. Ein nahezu perfekter Einschluss ist wichtig, denn der Brennstoff des Fusionskraftwerkes soll möglichst wenig mit den Reaktorwänden in Kontakt kommen. Jeder Kontakt verunreinigt das

Plasma und kühlt es ab. Da das Plasma aus negativ geladenen Elektronen und positiv geladenen Atomkernen besteht, kann man es mithilfe von Magnetfeldern kontrollieren. In einem Magnetfeld wirkt auf elektrisch geladene Teilchen die so genannte Lorentzkraft. Sie zwingt die Teilchen auf kreis- oder schraubenförmige Bahnen um die magnetischen Feldlinien herum. So gewährleistet das Magnetfeld, dass die Teilchen in senkrechter Richtung zu den Feldlinien magnetisch eingeschlossen sind. In Richtung der Feldlinien selber allerdings wirkt keine Kraft auf die Teilchen. Daher schließen die Forscher das Magnetfeld zu einem Ring zusammen. Aber auch das löst nicht alle Probleme: auf der Innenseite des ringförmigen Magnetfeldes sind die Feldlinien dichter als außen. Das bewirkt eine Drift der Teilchen nach außen. Sie könnten dann aus dem magnetischen Käfig entweichen. Daher greifen die Wissenschaftler zu zusätzlichen Maßnahmen, um die Teilchen einzuschließen. Man unterscheidet zwei Experimenttypen, die dies auf unterschiedliche Weise können.

#### *Tokamak:*

Im Experimenttyp namens Tokamak - zum Beispiel in der Anlage ASDEX Upgrade in Garching - überlagern die Wissenschaftler zwei unterschiedliche Magnetfelder. Einmal erzeugen äußere Spulen ein Magnetfeld. Dieses wird aber noch überlagert durch ein zusätzliches Feld, das von einem elektrischen Strom im Plasma erzeugt wird. Die Feldlinien beider Felder verdrillen sich und sorgen so für den notwendigen Einschluss. Der elektrische Strom im Plasma hat noch einen nützlichen Nebeneffekt: Er heizt das Plasma auf.

Der Nachteil des Tokamak-Prinzips: der elektrische Strom im Plasma wird durch ei-

nen Transformator induziert. Ein Transformator erzeugt aber nur kurze Zeit einen ansteigenden Strom. Damit ein Tokamak dennoch kontinuierlich und nicht nur zeitweise, also gepulst, betrieben werden kann, sind aufwändige Zusatzmaßnahmen nötig.

#### *Stellarator:*

Im Experimenttyp des Stellarators sorgen ausschließlich äußere Spulen für das Magnetfeld. Daher ist der Stellarator ohne weiteres für den Dauerbetrieb geeignet. Doch um die gewünschte Verdrillung der Feldlinien zu erreichen, müssen die Spulen sehr komplex geformt sein. Erst mithilfe von leistungsfähigen Computern waren die Forscher in der Lage, Form und Lage der Magnetspulen zu berechnen.

#### *Wendelstein 7-X:*

Das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X in Greifswald soll die Kraftwerkstauglichkeit des Stellaratorkonzepts demonstrieren. Die supraleitenden Magnetspulen werden auf unter vier Kelvin abgekühlt, sodass der Strom in ihnen verlustfrei fließen kann. Das Experiment soll im Jahr 2006 in Betrieb gehen.

#### *ITER:*

ITER, der Internationale Experimentalreaktor, soll zeigen, dass es auf der Erde physikalisch und technisch möglich ist, durch Kernverschmelzung Energie zu gewinnen. ITER soll der erste Fusionsreaktor werden, der mehr Energie liefert als für die Aufheizung des Plasmas verbraucht wird. Dennoch ist ITER kein Fusionskraftwerk. Er soll auch an kein Versorgungsnetz angeschlossen werden. Im Vordergrund steht immer noch die Forschung, z. B. die Untersuchung eines Energie liefernden Plasmas oder die Entwicklung großer, supraleitender

Magnetspulen. Fragen der Reaktorsicherheit und der Umwelt sollen beantwortet werden. Daneben soll ITER auch die Materialforschung vorantreiben, vor allem die Entwicklung der ersten, das Plasma unmittelbar umgebenden Reaktorwand. Für die Planungs-, Bau- und Betriebszeit von ITER rechnen die Forscher mit 25 Jahren. Danach soll ein Demonstrationskraftwerk namens DEMO gebaut werden. DEMO soll alle Funktionen eines Energie gewinnenden Kraftwerks erfüllen, allerdings ohne wirtschaftlich arbeiten zu müssen. Dafür sind noch einmal 20 Jahre eingeplant. Falls die Fusionsforschung nach diesem Plan voranschreitet, könnte Mitte dieses Jahrhunderts die Kernfusion wirtschaftlich nutzbar sein.

Eine Vision - das erste Fusionskraftwerk: Wir schreiben das Jahr 2050 - das erste wirtschaftliche Fusionskraftwerk geht in Betrieb. Die Startheizung führt dem Plasma für einige Sekunden eine Leistung von etwa 50 bis 100 Megawatt zu. Das Plasma zündet: Atomkerne verschmelzen, die frei werdende Energie heizt das Plasma nun allein, die äußere Heizung kann abgeschaltet werden. Die bei der Fusionsreaktion entstehenden ungeladenen Neutronen verlassen ungehindert den Magnetfeldkäfig, schlagen in der Gefäßwand ein und erwärmen sie. Alles andere funktioniert wie bei einem konventionellen Kraftwerk: die Wärme erzeugt Wasserdampf, der Turbinen antreibt. Transformatoren erzeugen schließlich elektrischen Strom.

Weitere Informationen zur Fusionsforschung finden Sie unter:  
<http://www.ipp.mpg.de>

### **Allgemeine Haftung für Internet-Links**

Für illegale, fehlerhafte oder unvollständige Informationen der gelinkten Seiten haftet ausschließlich der Anbieter der Seite, auf welche verwiesen wird. Sollten Links nicht schalten oder veraltet sein, bitten wir Sie um eine kurze Mitteilung an [info@fwu.de](mailto:info@fwu.de)

**Produktion**

KARMANN Medienproduktion und Verlag GmbH,  
München im Auftrag des FWU Institut für Film und  
Bild und des Max-Planck-Instituts für Plasmaphy-  
sik (Euratom-Assoziation), 2001

**Buch und Regie**

Dr. Manfred Baur

**Kamera**

Rainer Hartmann

**Schnitt**

Hannes Schuler

**Animation**

CAT Production

**Aufnahmeleitung**

Michaela Plötz

**Begleitkarte**

Christian Friedl

**Fachberatung**

Isabella Milch  
Dr. Hans-Stephan Bosch

**Pädagogische Referentin im FWU**

Dr. Christine Fischer

**Verleih durch Landes-, Kreis- und Stadtbildstellen**

**Verkauf durch FWU Institut für Film und Bild,  
Grünwald**

Nur Bildstellen/Medienzentren: öV zulässig

© 2008

FWU Institut für Film und Bild  
in Wissenschaft und Unterricht  
gemeinnützige GmbH  
Geiselsgasteig  
Bavariafilmpfad 3  
D-82031 Grünwald  
Telefon (0 89) 64 97-1  
Telefax (0 89) 64 97-300  
E-Mail [info@fwu.de](mailto:info@fwu.de)  
[vertrieb@fwu.de](mailto:vertrieb@fwu.de)  
Internet [www.fwu.de](http://www.fwu.de)



FWU Institut für Film und Bild  
in Wissenschaft und Unterricht  
gemeinnützige GmbH  
Geiseltalsteig  
Bavariafilmplatz 3  
D-82031 Grünwald  
Telefon (0 89) 64 97-1  
Telefax (0 89) 64 97-300  
E-Mail [info@fwu.de](mailto:info@fwu.de)  
Internet <http://www.fwu.de>

**zentrale Sammelnummern für  
unsere Vertriebe:**

**Telefon (0 89) 64 97-4 44**  
**Telefax (0 89) 64 97-2 40**  
**E-Mail [vertrieb@fwu.de](mailto:vertrieb@fwu.de)**

Laufzeit: 18 min  
Kapitelwahl auf DVD-Video  
Sprache: Deutsch

**Systemvoraussetzungen  
bei Nutzung am PC**  
DVD-Laufwerk und  
DVD-Player-Software,  
empfohlen ab Windows 98

Alle Urheber- und  
Leistungsrechte  
vorbehalten.  
Nicht erlaubte/  
genehmigte Nutzungen  
werden zivil- und/oder  
strafrechtlich verfolgt.

**LEHR-  
Programm  
gemäß  
§ 14 JuSchG**

## **FWU - Schule und Unterricht**

**46 02527** DVD mit Kapitelwahlpunkten

18 min, Farbe

FWU-Klassiker

### **Kernfusion**

Womit spendet die Sonne dem All Licht und Wärme? Durch die Verschmelzung von Wasserstoffkernen zu Helium, einem Prozess, bei dem sehr große Energiemengen freigesetzt werden. Schon seit Jahrzehnten fasziniert Forscher die Vorstellung, diese Reaktion auch in einem Kraftwerk auf der Erde nutzbar zu machen. Die immer knapper werdenden Rohstoffe lassen zahlreiche Institute in aller Welt, darunter auch das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching und Greifswald, fieberhaft an der Verwirklichung dieser Vision arbeiten. Der Film veranschaulicht das Potenzial dieser Energieform und zeigt, welche technischen Hürden überwunden werden müssen.

Bei diesem Film handelt es sich um eine FWU-Produktion aus dem Jahr 2001.

### **Schlagwörter**

Kernfusion, Energie, Plasma, Tokamak, Stellarator, ASDEX Upgrade, Wendelstein 7-X, JET, ITER

### **Physik**

Kernphysik • Radioaktivität, Kernumwandlung, Technische Anwendungen

Allgemeinbildende Schule (10-13)  
Erwachsenenbildung