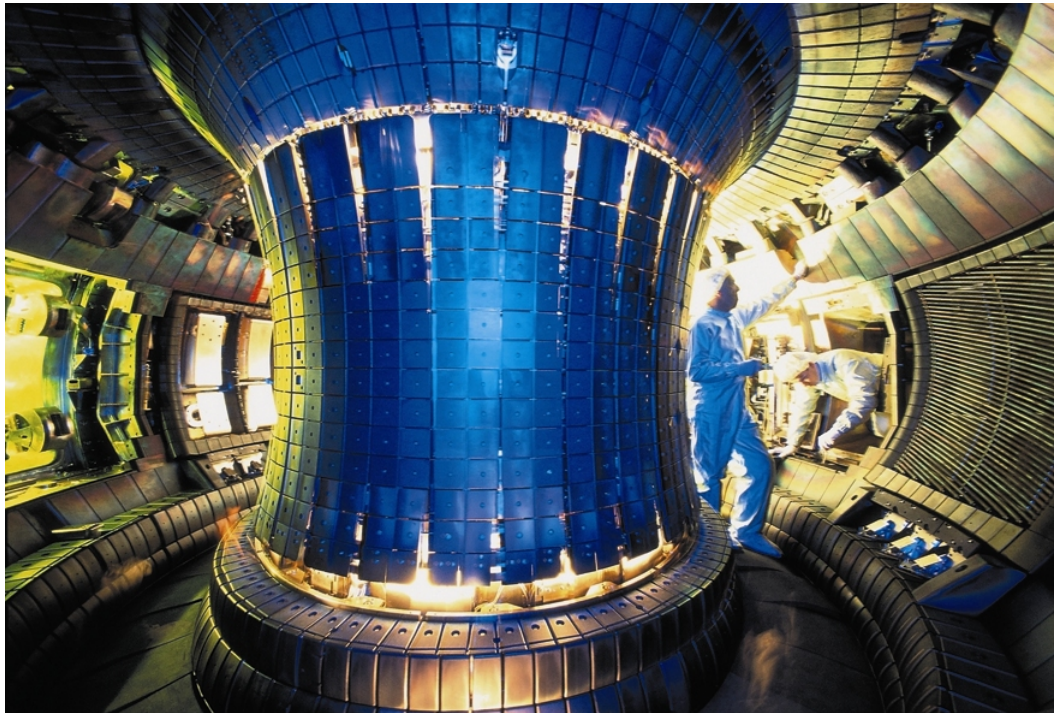




MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

# Energieforschung für die Zukunft

## Auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk



Dipl. Ing. (FH) Bernadett Gmeiner  
MPI für Plasmaphysik

Dank an:  
Dr. Rudolf Neu  
Dr. Hans Meister

85748 Garching, Boltzmannstr.2  
[Bernadett.Gmeiner@ipp.mpg.de](mailto:Bernadett.Gmeiner@ipp.mpg.de)  
<http://www.ipp.mpg.de>



## **Einleitung – warum brauchen wir eine alternative Energieerzeugung**

**physikalische Grundlagen- Energiegewinn durch Fusion**

**Das Experiment ASDEX Upgrade**

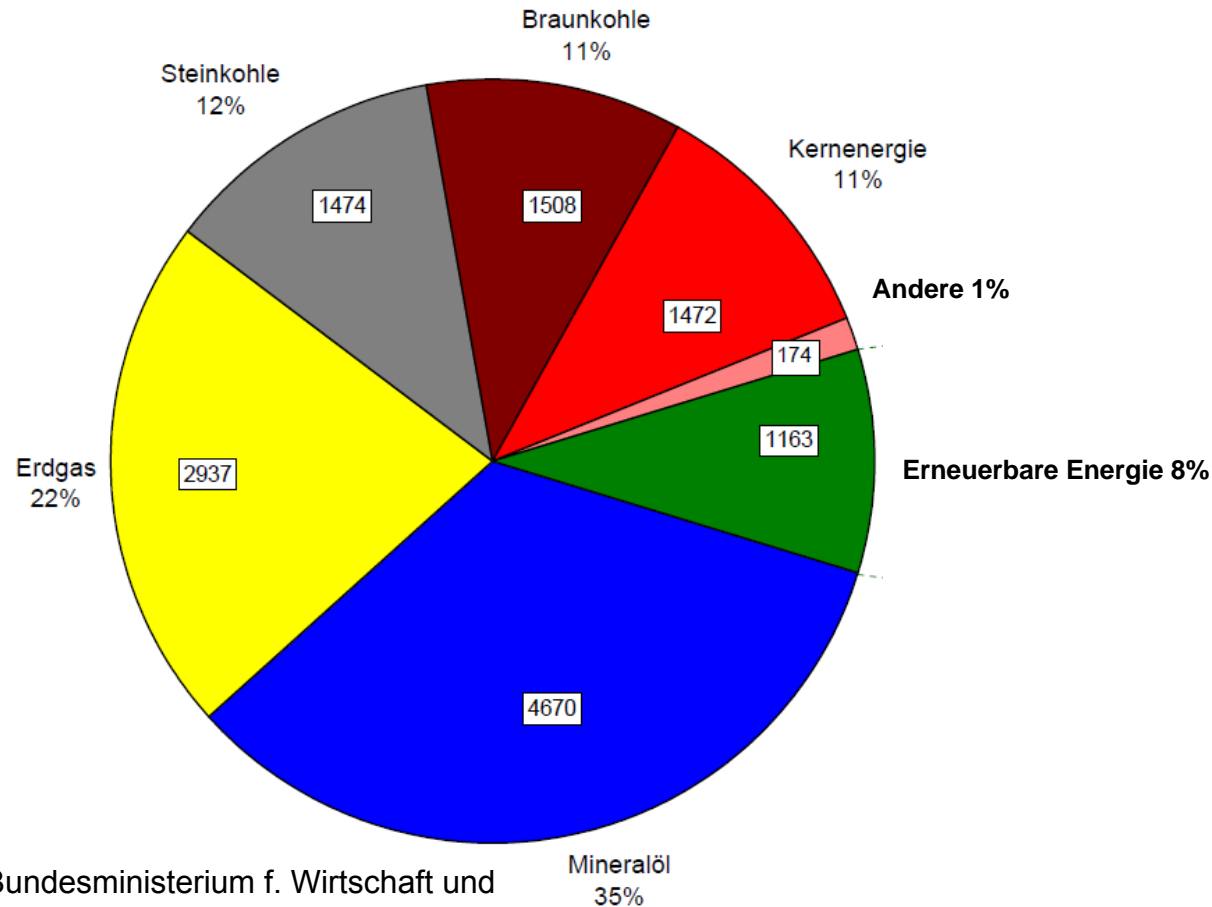
**Stand der Dinge in der Fusionsforschung**

**ITER der Weg zum Fusionsreaktor**

**Eigenschaften der Fusion**



### Primärenergieverbrauch in Deutschland 2009 13398 PJ \*



Quelle: Bundesministerium f. Wirtschaft und  
Technologie, Energiedaten ausgewählte  
Grafiken Stand: 13.01.2011



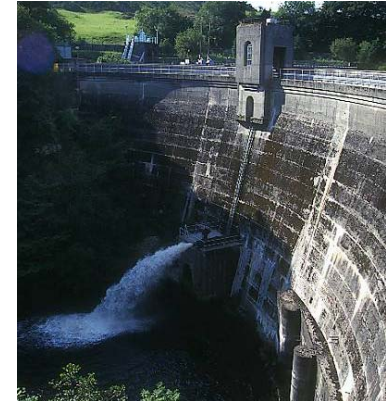
## Sonne



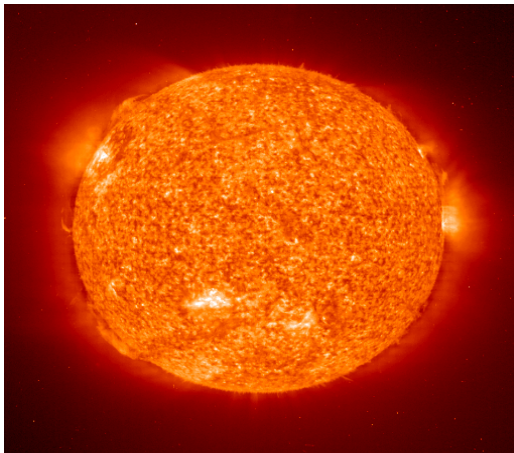
## Wind



## Wasser



## Fusion



## Geothermie



## Biomasse





## Die Sonne – ein kosmisches Fusionskraftwerk

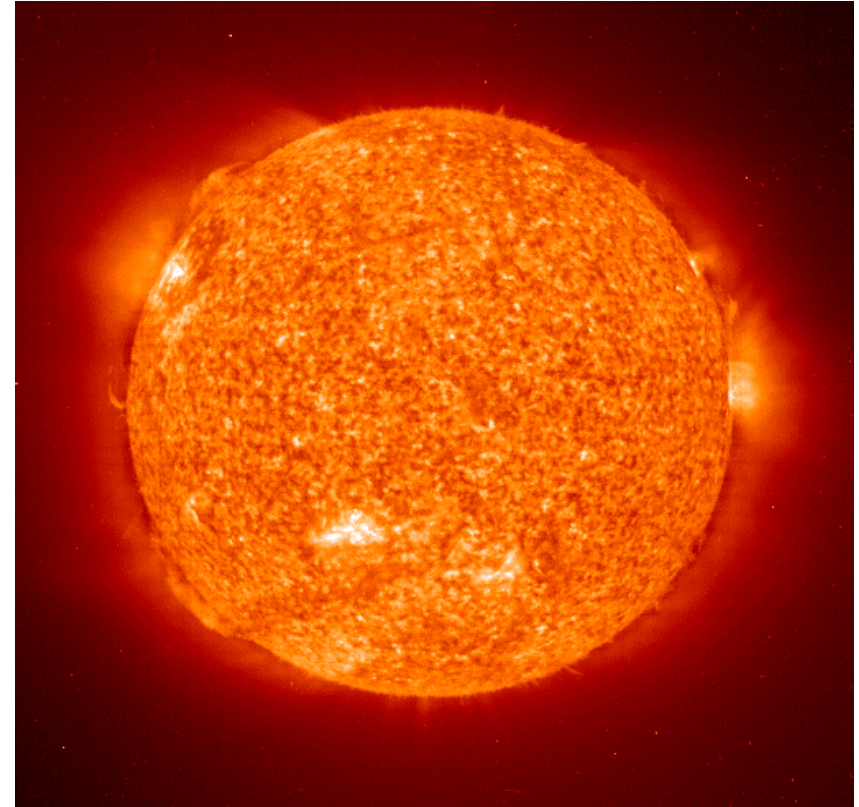
Fusion heißt Verschmelzen:

Zwei kleine Atomkerne werden zu  
einem größeren Atom verschmolzen.  
Dabei wird Energie frei.

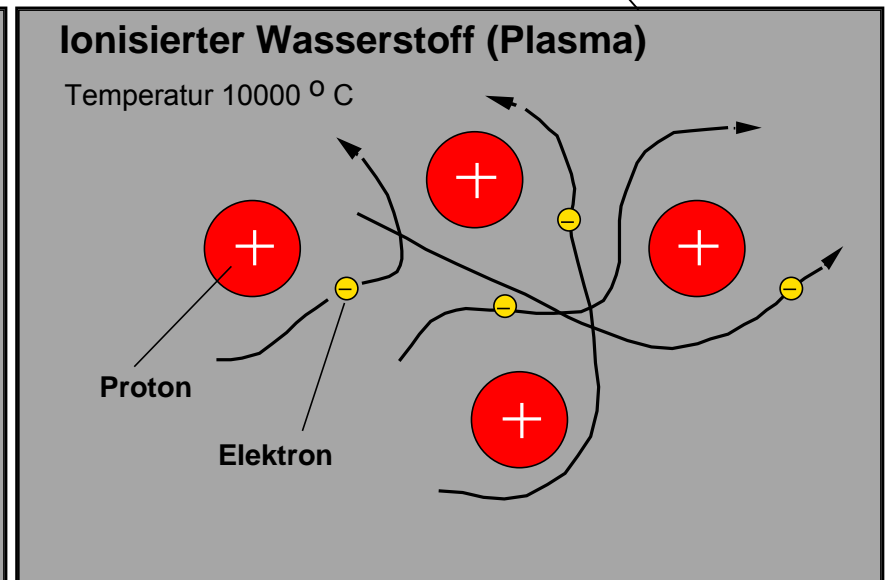
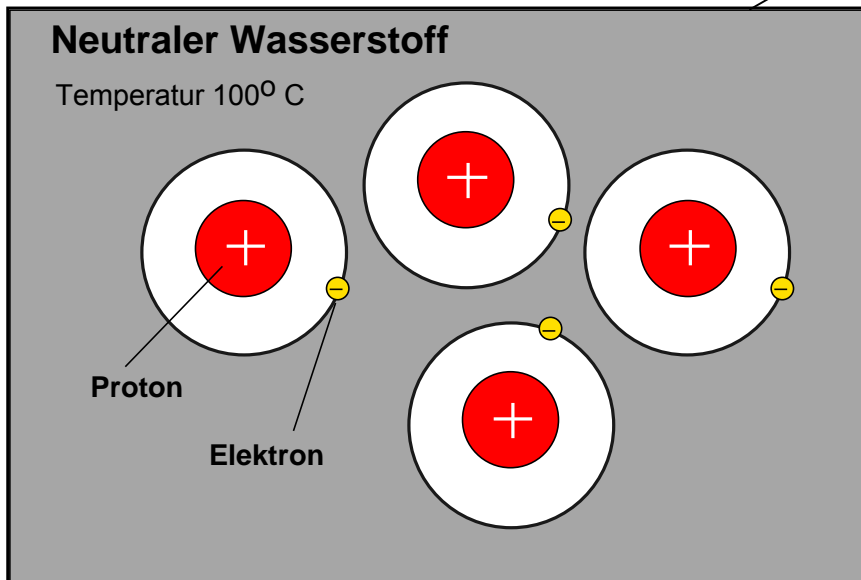
Die Sonne “verbrennt“ pro Sekunde  
600 Mio. Tonnen Wasserstoff zu  
596 Mio. Tonnen Helium

Oberflächentemperatur: 6000 K  
Zentrale Temperatur: 14·000 000 K

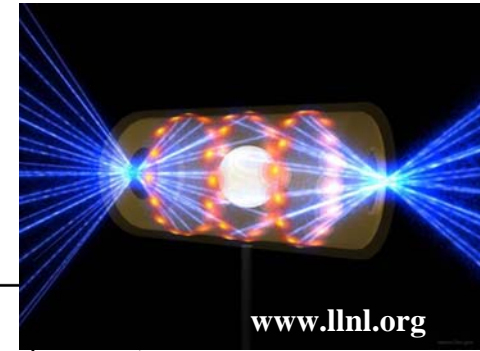
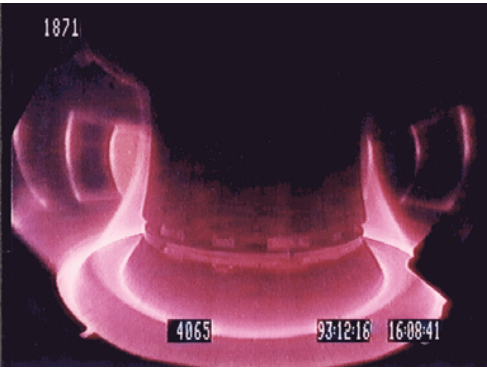
Die Sonne besteht aus Plasma



# Plasma: ionisiertes Gas (vierter Aggregatzustand)

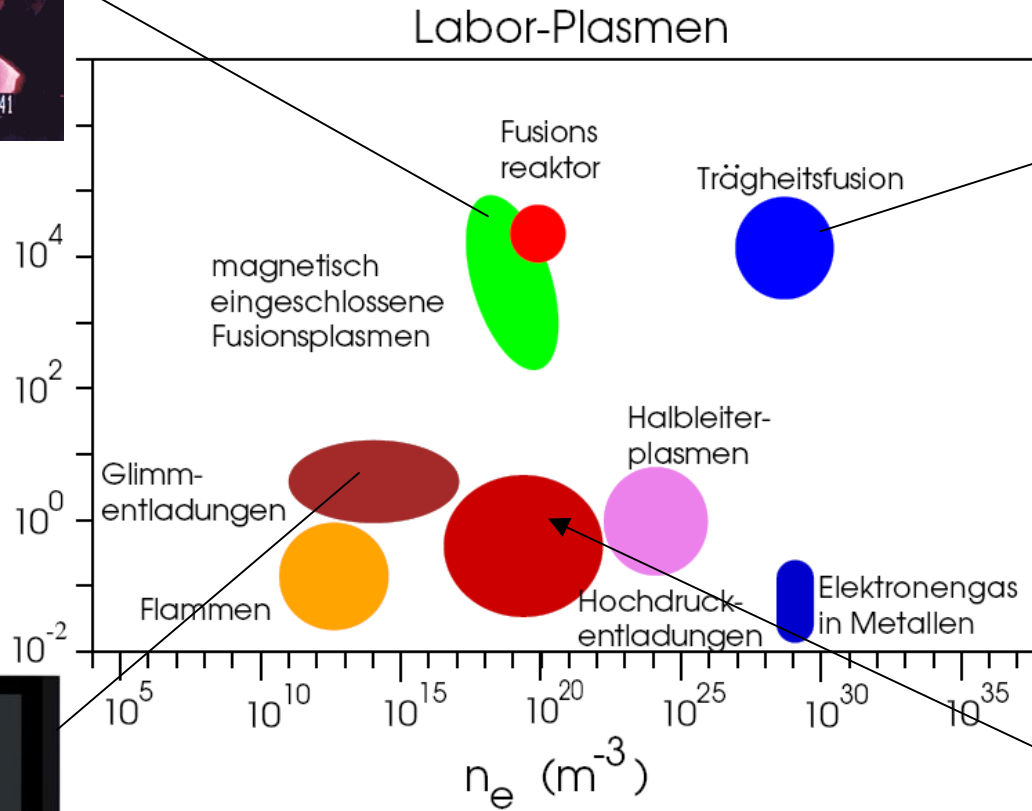


Kerne und Elektronen bewegen sich unabhängig von einander



Energie

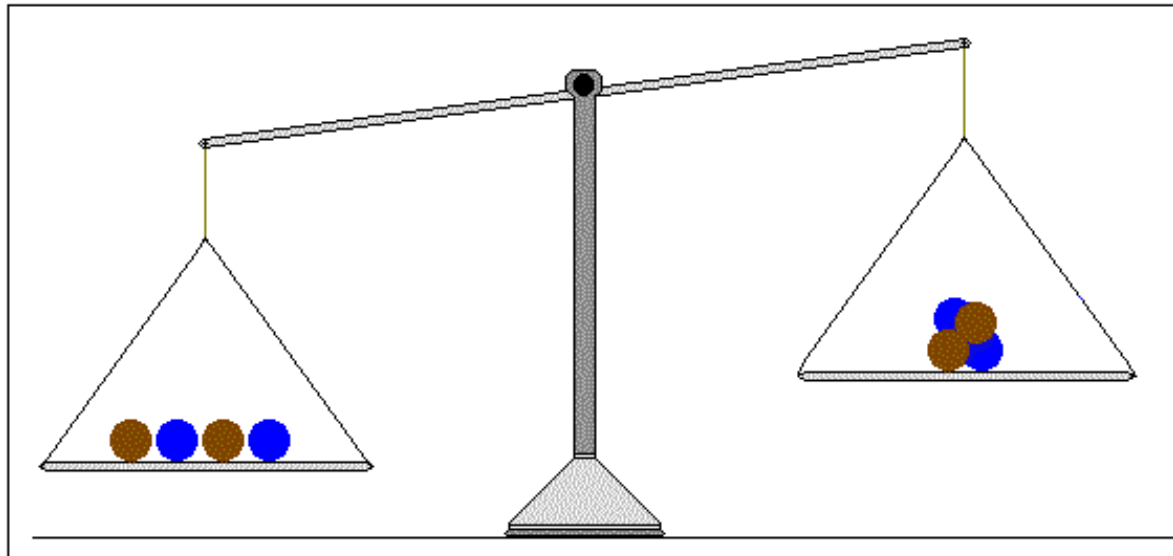
$T_e$  (eV)



Teilchendichte



## Warum lässt aus durch Fusion Energie gewinnen?



2 Neutronen, 2 Protonen

1 Heliumkern

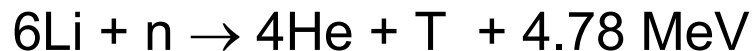
Massenunterschied wird bei der Fusion entsprechend der wohlbekanntesten Einstein'schen Formel als Energie freigesetzt.

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





## Fusionsreaktion: Deuterium und Tritium

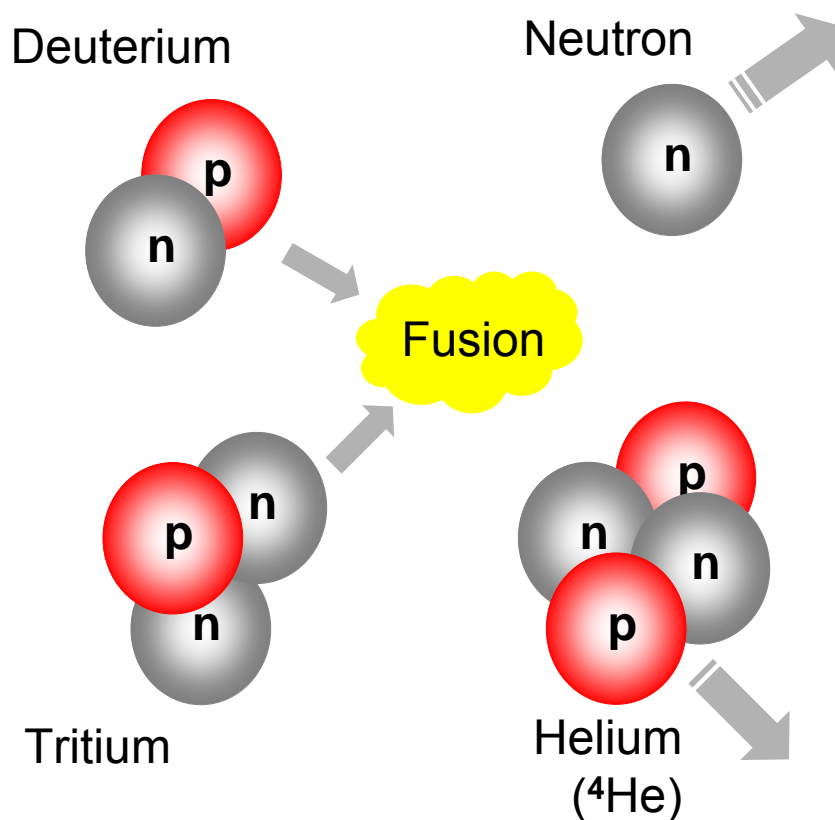


Die Ausgangsstoffe sind für  
Millionen von Jahren vorhanden:

Deuterium natürlich vorhanden  
im Wasser

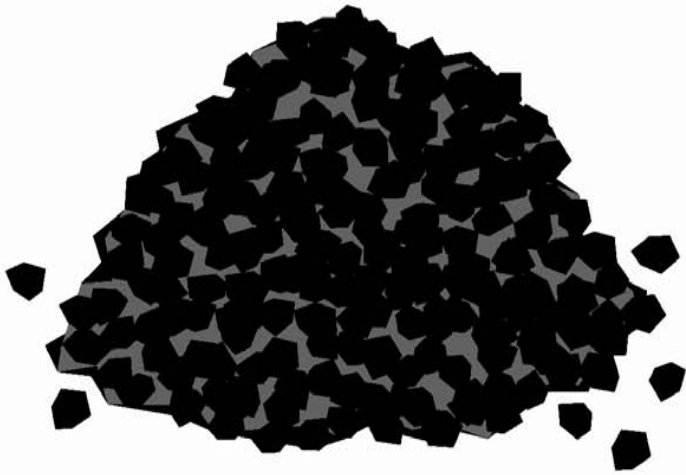
Lithium (für Tritiumgewinnung)

## Fusionsreaktion: Deuterium und Tritium



- Neutronen erhalten den Großteil der Fusionsenergie als kinetische Energie. So kann aus Lithium Tritium gewonnen werden.
- Energie der Neutronen und des Heliums wird in Wärme umgewandelt -Wärmetauscher

## Brennstoffeffizienz



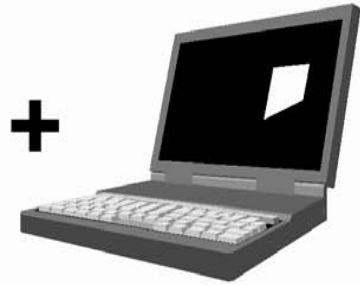
40t Kohle  
(320.000 kWh)

=



Deuterium in  
40l Wasser

+



5g Lithium  
(Laptop-Batterie)

**oder**

Kohlekraftwerk mit 1GW: 2,7 Mio. Tonnen Kohle pro Jahr

Fusionskraftwerk mit 1GW: 100 kg Deuterium und 300 kg Lithium



## Was braucht ein Kraftwerk

**Brennstoff:** Wasserstoff mit entsprechender Dichte ( $10^{20}$  Teilchen/m<sup>3</sup>)

**Geringen Wärmeverlust:**  $\tau_E$  (Maß für die Wärmeisolation)

**Hohe (Zünd-)Temperatur:** 150 Mio. °C

Wasserstoffteilchen müssen um fusionieren zu können die abstoßenden Coulomb-Kräfte überwinden.

Hier ist eine Energie von mehreren 10 keV notwendig (entspricht mehreren 100 Mio °C)

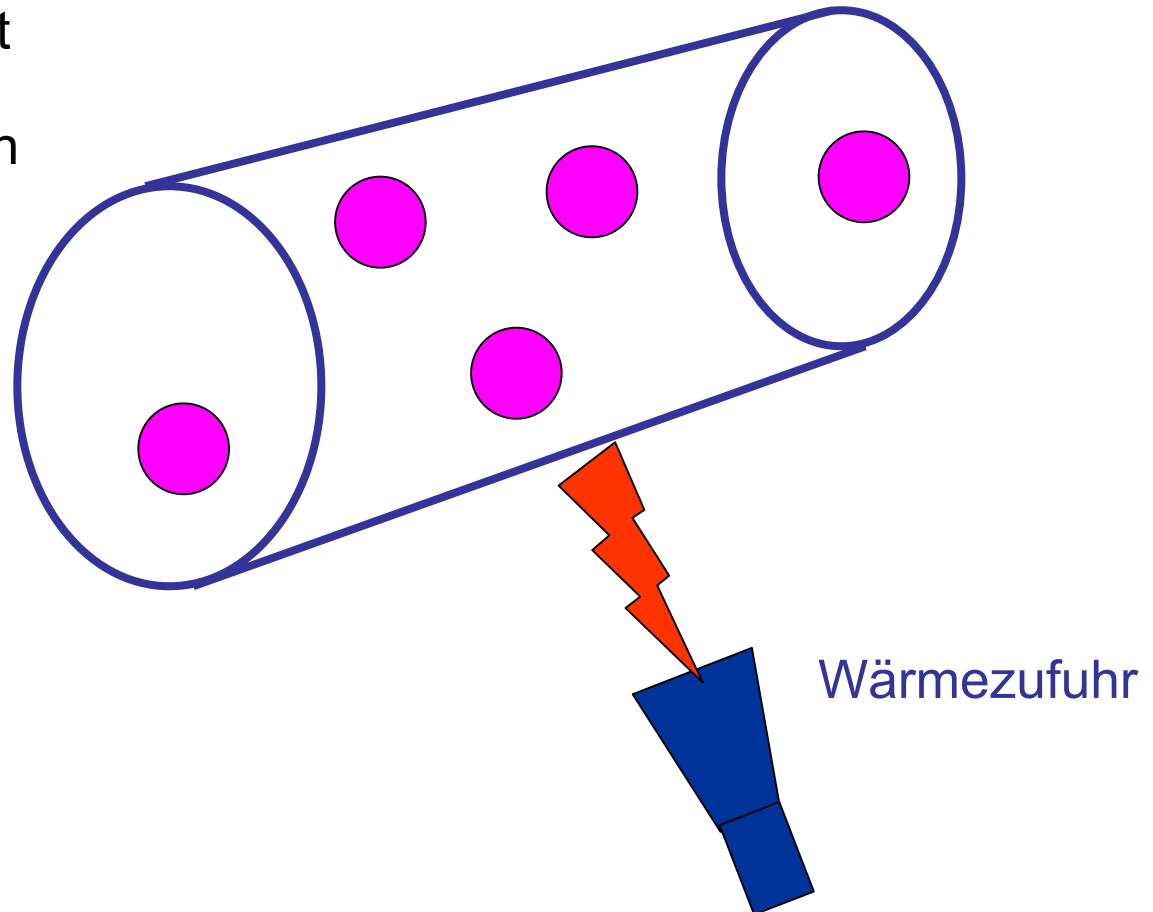
Bei solchen Temperaturen liegt ein Wasserstoffgas als Plasma vor d.h. vollständig ionisiert – Gas aufgeladenen Teilchen

## Der Fusionsofen

Wasserstoffgas in einem  
festen Volumen wird geheizt

Die Temperatur der Teilchen  
steigt

Der Wasserstoff wird  
ionisiert



## Der Fusionsofen

heißes Wasserstoff-  
Plasma

Teilchen bewegen sich  
sehr schnell

Teilchen berühren die Ofen-  
Wand und kühlen ab

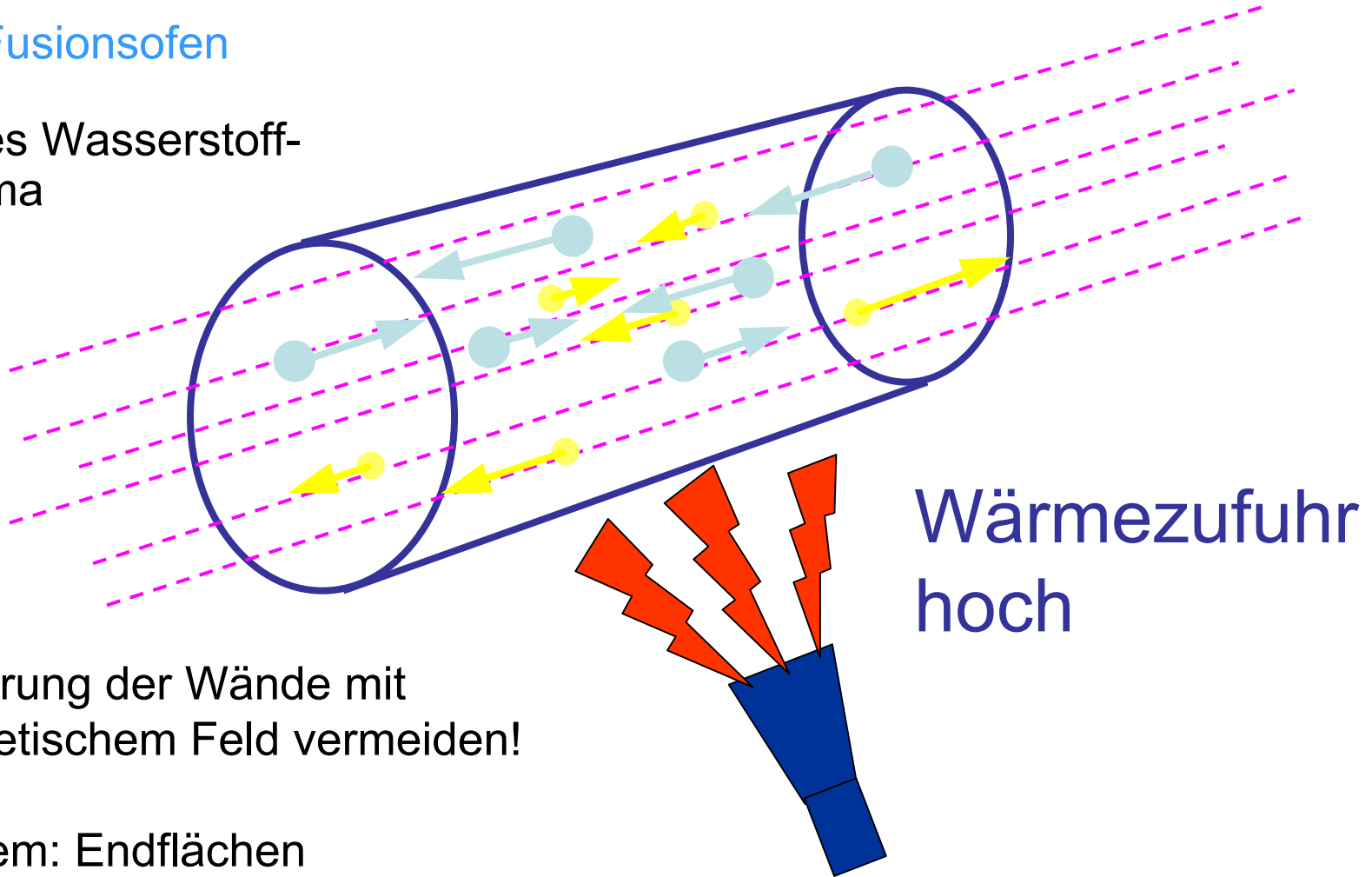
Problem: Wärmeisolation



Wärmezufuhr  
hoch

## Der Fusionsofen

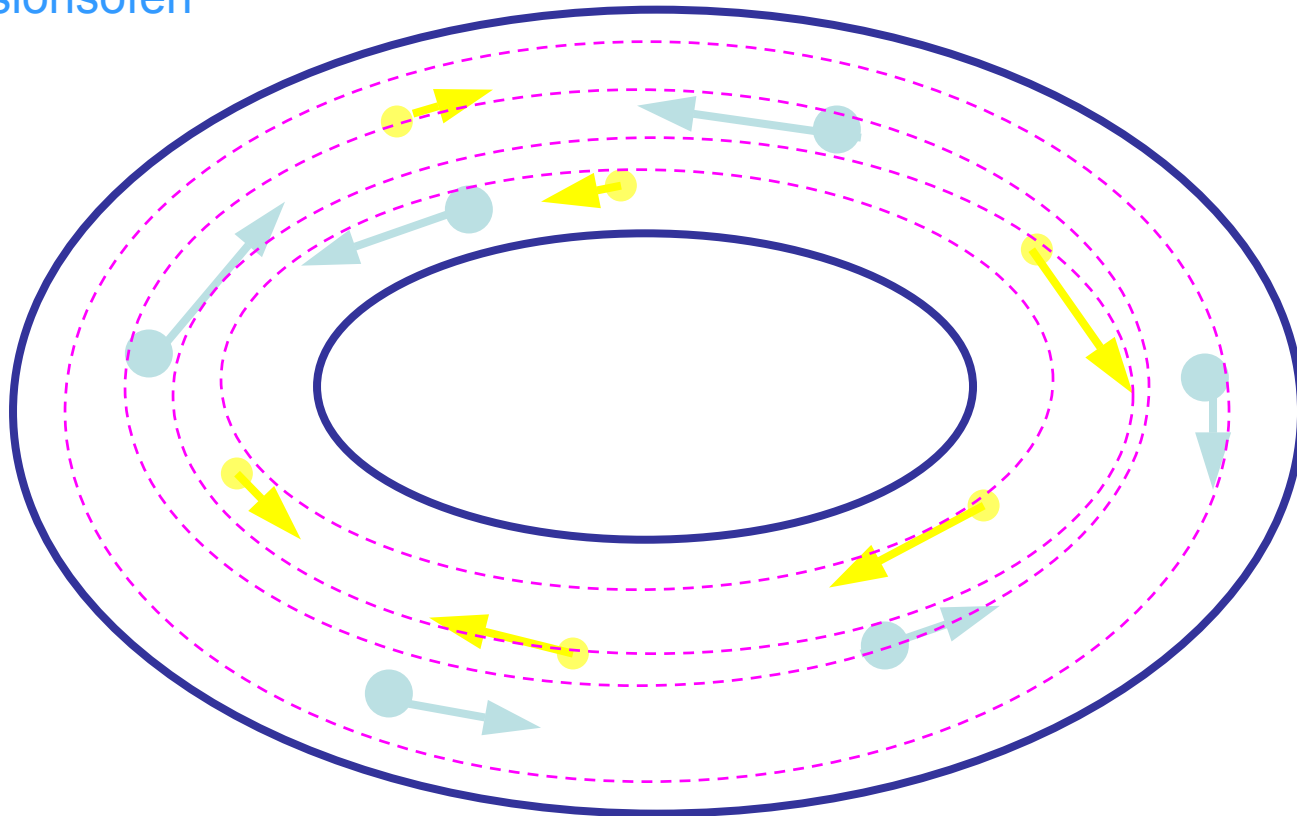
heißes Wasserstoff-  
Plasma



Berührung der Wände mit  
magnetischem Feld vermeiden!

Problem: Endflächen

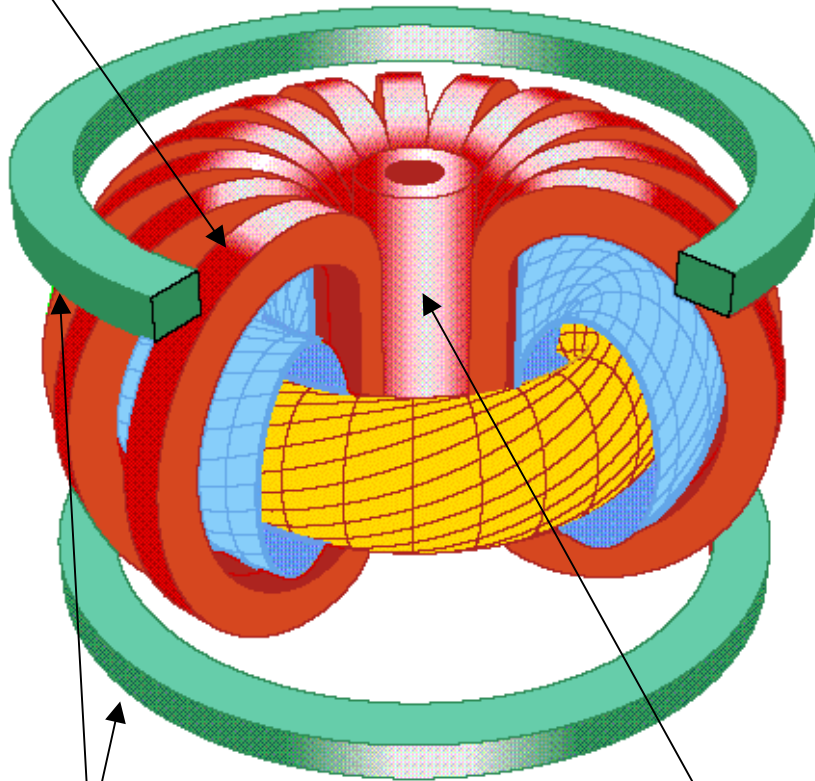
## Der Fusionsofen



**Keine Endflächen: Torus!**



Toroidalfeldspulen



Poloidalfeldspule (Kontrolle von Form und Lage)

Transformator (Primärspule: Induktion des Plasmastroms)

## Der Tokamak

- Tokamak (russ.): toroidale Kammer mit Magnetfeldspule)
- Toroidale Magnetfeld von äußeren Spulen erzeugt
- Plasma – Sekundärwicklung des Transformators

Der Strom heizt das Plasma.

### Weitere Heizmethoden

Teilchenheizung

Mikrowellenheizung

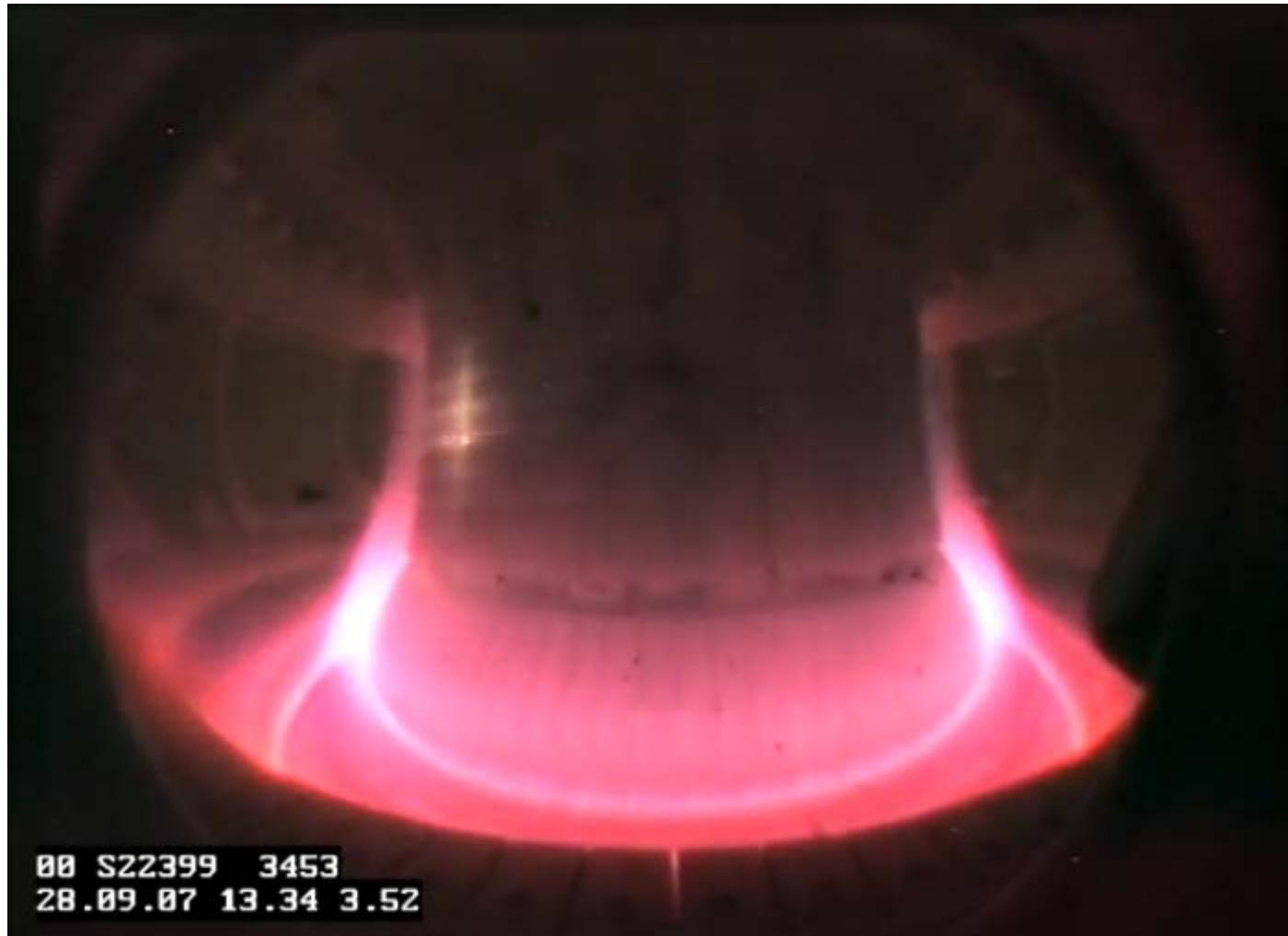


Blick in den Tokamak ASDEX Upgrade





## Plasmaentladung in ASDEX Upgrade



## Stand der Forschung

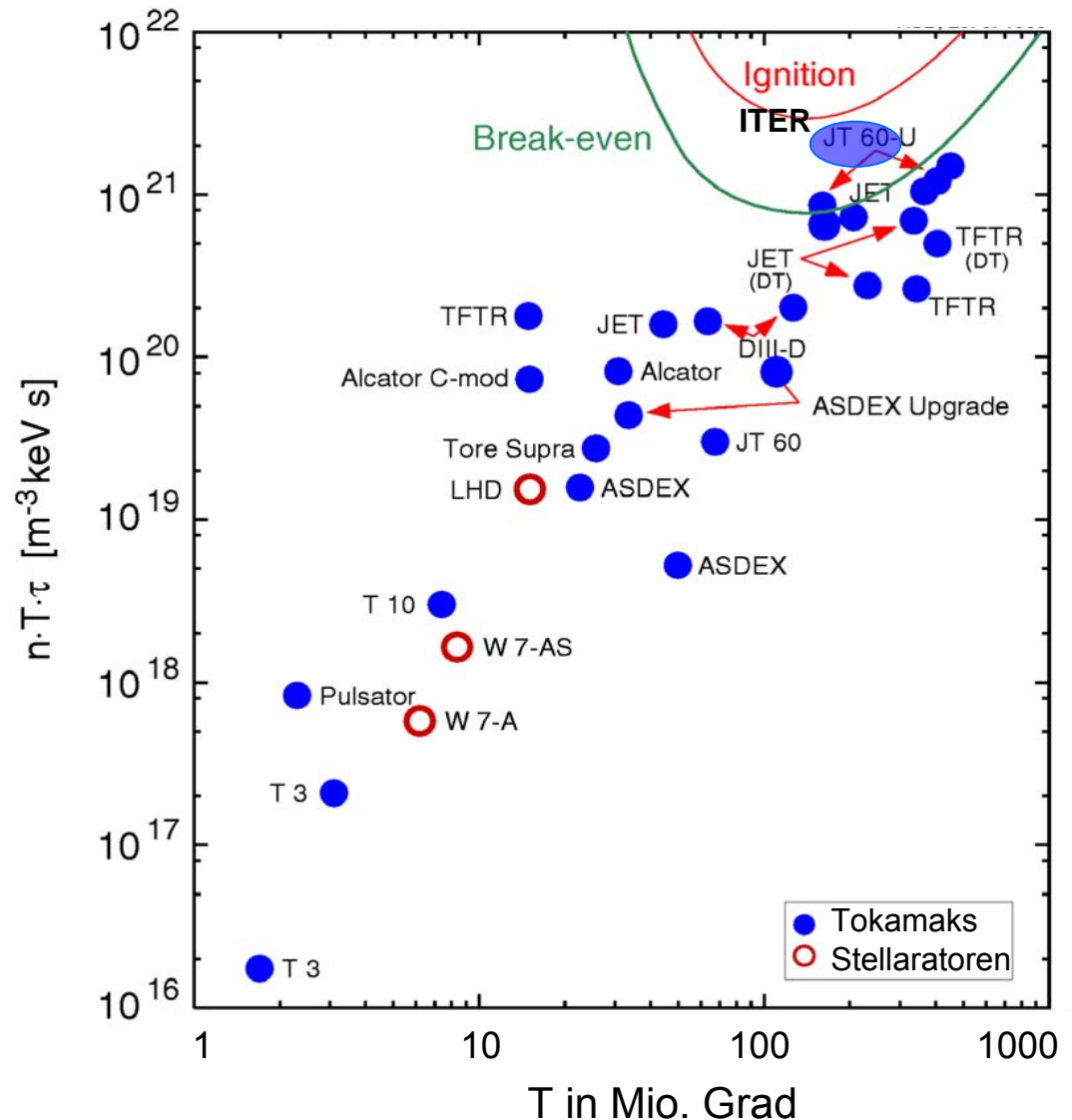
Zur Zündung notwendig:

- hohe Temperatur:  
200 Mio. °C erreicht ✓

- hohe Dichte:  
 $10^{20} / \text{m}^3$  erreicht ✓

- gute Wärmeisolation:  
 $\tau_E < 1 \text{ s}$

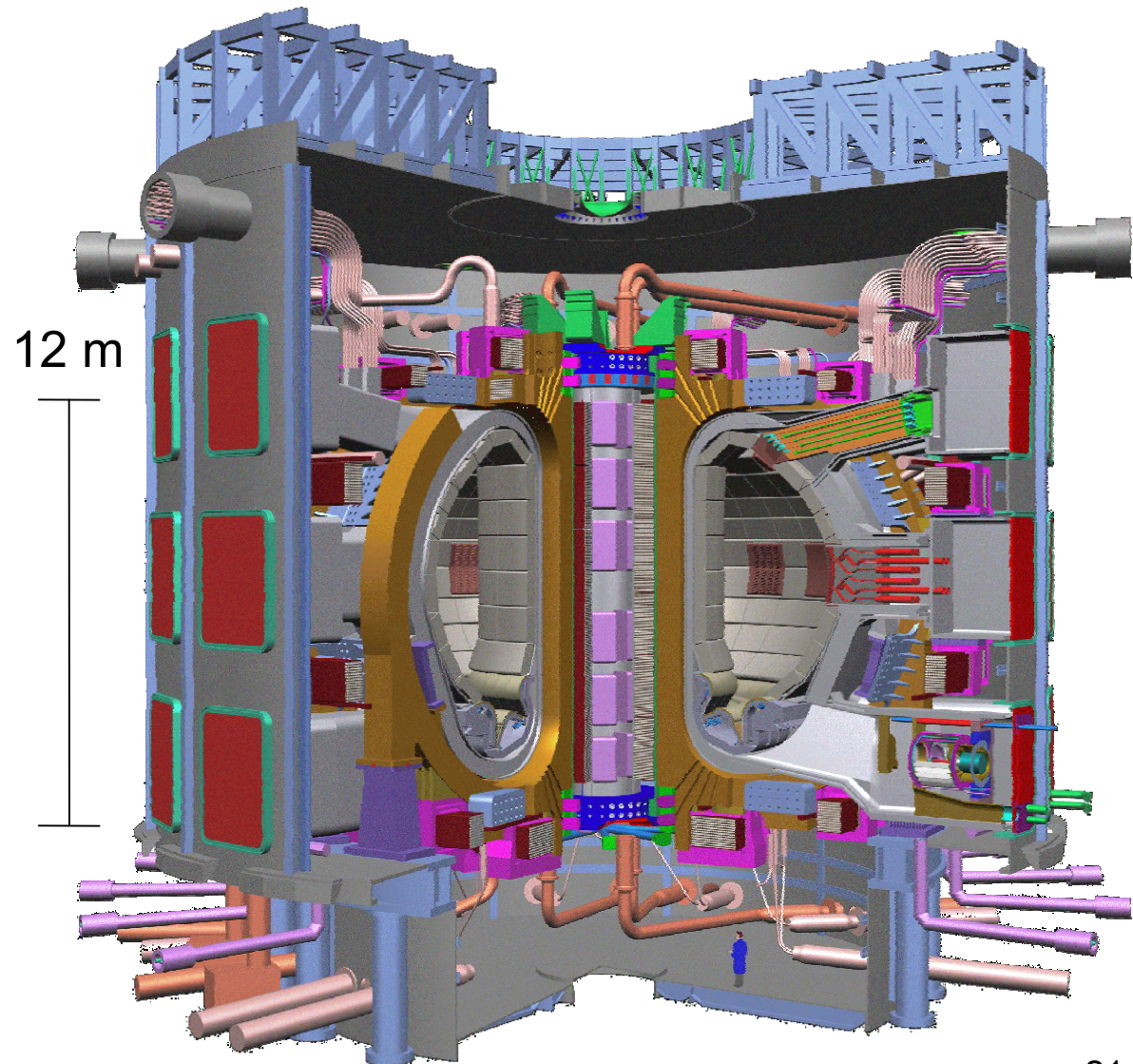
(notwendig: 2-3 s)



→ Demonstration der physikalischen und technologischen Machbarkeit der Fusion als Energiequelle

### Einige Parameter

Leistungsverstärkung	10
Magnetfeld	5.3 T
Strom	15 MA
Dichte	$10^{20} \text{ m}^{-3}$
Temperatur	20 keV
Zusatz Heiz.	73 MW
Fusionsleist.	500 MW
Pulsdauer	500 s





- 1985, Genfer Gipfeltreffen: Vorschlag von M. Gorbachov an R. Reagan: Bau des nächsten Fusionsexperimentes zusammen mit Europa und Japan
- 1988: „Joint Conceptual Design“ beginnt am IPP in Garching
- 1998: Rückzug der USA, Vorschlag: Eine Machbarkeitsstudie über eine kleinere, billigere und technisch weniger anspruchsvolle Version bringt 2001 die aktuelle ITER-Version.
- 2001-2005: Projekt- und Standortverhandlungen
- 2003: China und Süd-Korea stoßen dazu, USA kehren zurück.
- 2005: Standortentscheidung für Frankreich, Indien tritt bei.

ITER-Design 2010: aktuelle Kosten von 15 Mrd. € (auf 10 Jahre)



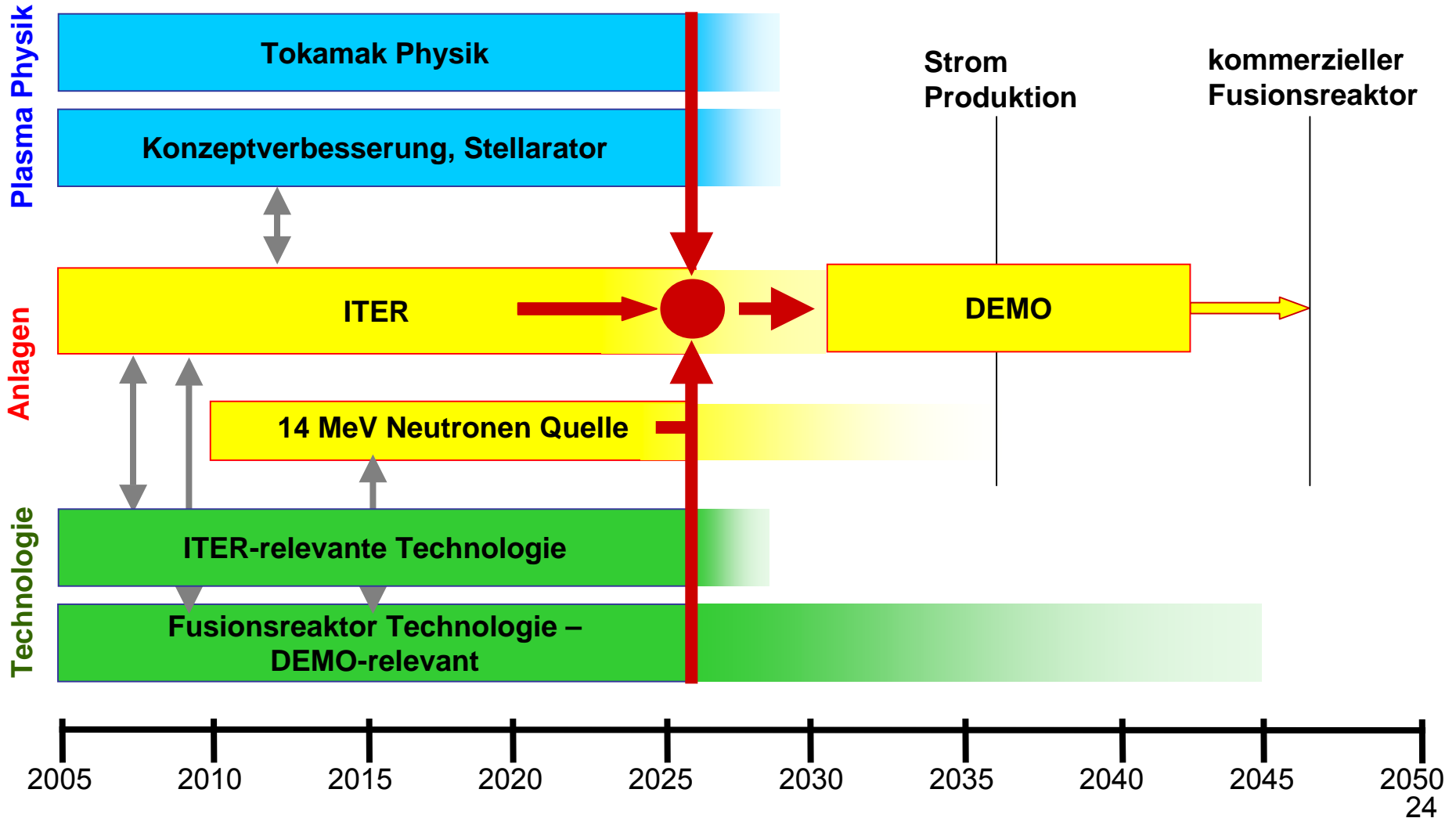
## ITER - Status

- ITER Team: seit 2 Jahren in Cadarache, ca. 280 Personen
- Vorbereitungen des Baugrunds abgeschlossen





## Der Weg zur Stromerzeugung durch Fusion





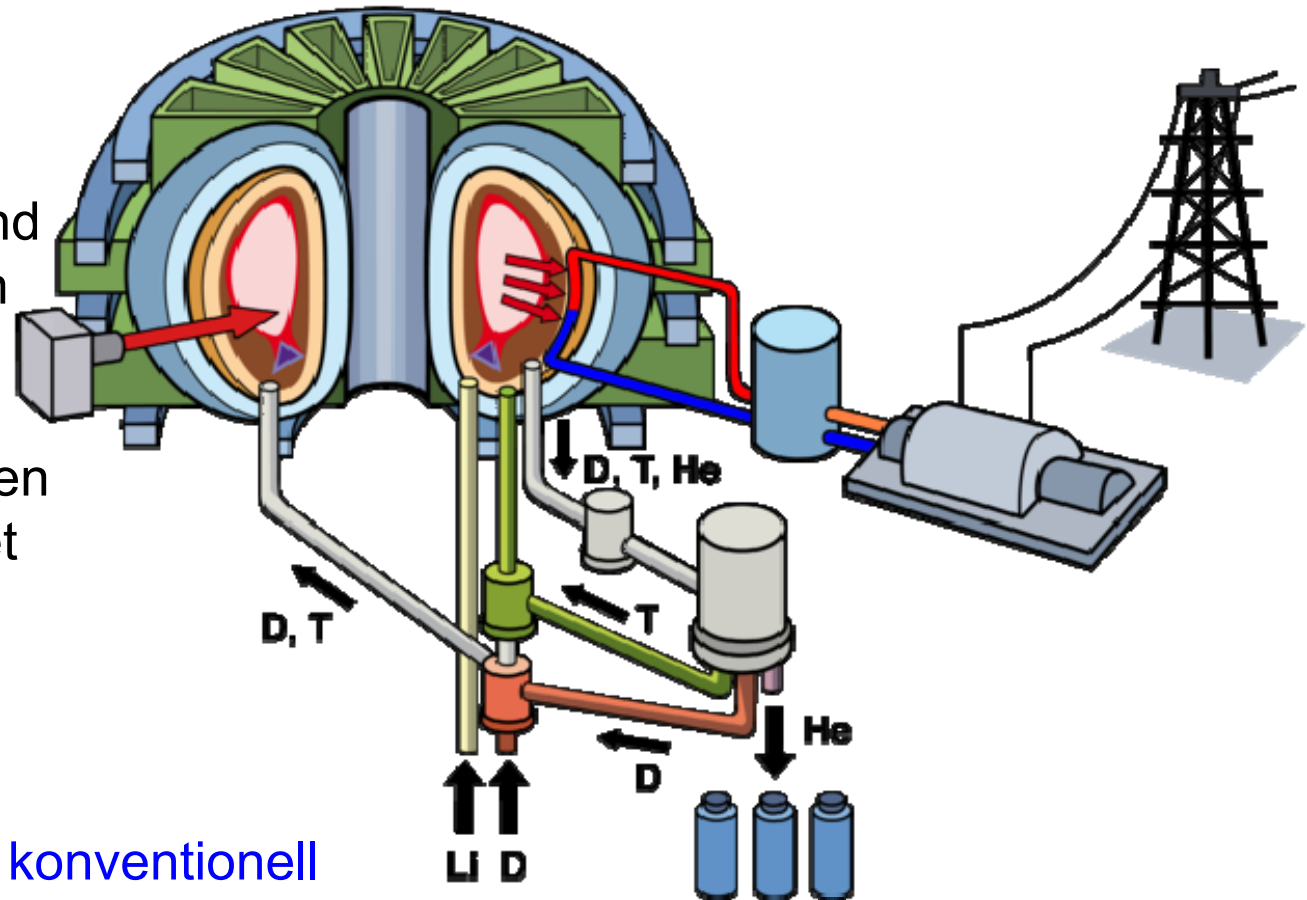
## Funktionsweise ein Fusionsreaktors

Helium aus der Fusionsreaktion heizt das Plasma und hält Fusionsreaktion aufrecht

Neutronen generieren Tritium im Li-Blanket

Neutronen heizen Kühlmedium

⇒ Stromerzeugung konventionell über Wärmetauscher und Turbine/Generator





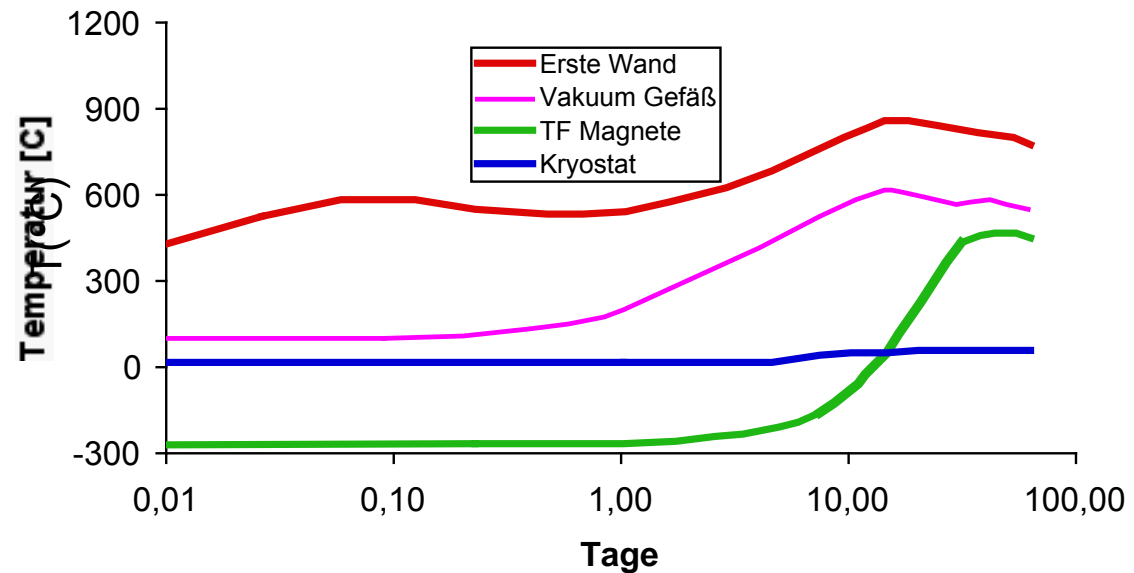
## Eigenschaften der Kernfusion

- **hohe Rohstoff-Reserven bei geringem Verbrauch**  
Vorkommen Deuterium:  $4.6 \cdot 10^{13}$  t, Lithium:  $10^{10}$  t;  
(500 t Li und 150 t D könnten weltweiten, jährlichen Strombedarf decken)
- **keine radioaktiven Rohstoffe** (D,Li)
- **kleine Brennstoffmenge** (Tritium) im Plasma ( $\leq 1$ g)  
Gesamtinventar (T) des Reaktor ca. 1 kg
- **keine Kettenreaktion**  
(Plasma bricht bei geringfügigen Abweichungen der Operationsbedingungen selbständig ab)

## Eigenschaften der Kernfusion

- mäßige Nachwärme
- kurze Halbwertszeit der aktivierten Materialien
- keine Emission von Treibhausgasen
- hoher technologischer Aufwand
- hohe Investitionskosten
- Voraussichtlich erst ab 2050 kommerziell verfügbar

Nachwärme bei Ausfall der Kühlung



Quelle: Safety and Environmental Assessment of Fusion Power ( SEAFP 1995)

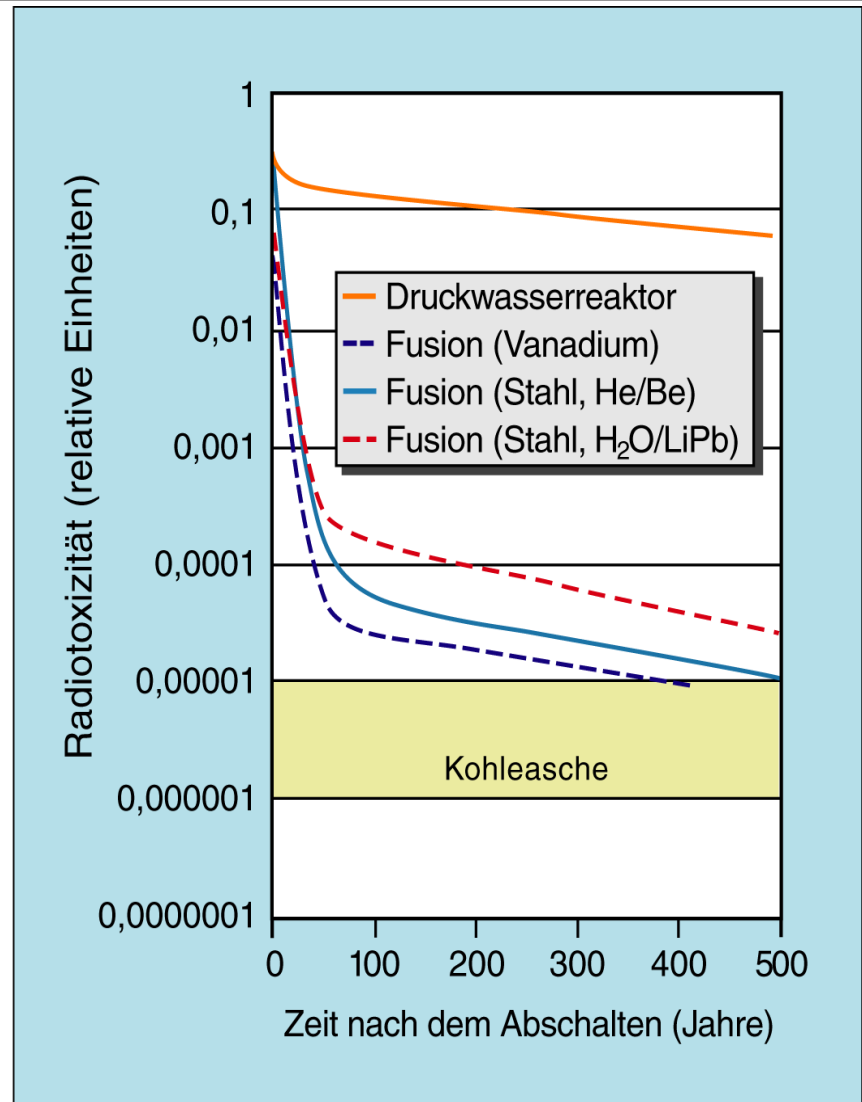
## Radioaktive Abfälle

Annahmen: Laufzeit 30 Jahre  
Fusionsleistung 1GW

### Radioaktive Abfälle

- Kontamination mit Tritium
- Aktivierung der Strukturmaterialien durch Neutronenfluss

Insbesondere die Aktivierung der Strukturmaterialien kann durch eine geeignete Wahl der Materialien minimiert werden.





## IPP Standort Greifswald / Das IPP in Zahlen



<b>Standort</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
Personal Garching	731	734	708
Personal Greifswald	433	428	448
Personal gesamt	1.164	1.162	1.156

	<b>IPP Gesamt</b>		<b>Garching</b>		<b>Greifswald</b>	
	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
Bund	76.376	103.272	34.210	43.374	42.166	59.898
Länder	8.575	11.330	3.801	4.896	4.774	6.434
EURATOM	14.360	28.305	10.468	8.656	3.892	19.649
Erträge	32.030	27.970	22.078	22.709	9.952	5.261
Summe	131.341	170.877	70.557	79.635	60.784	91.242



## Zusammenfassung

- Das heutige Wissen gibt große Zuversicht, dass die Kernfusion zukünftig einen bedeutenden Beitrag zur Energieversorgung leisten wird. Kraftwerksstudien sagen konkurrenzfähige Strompreise voraus.
- Die Kernfusion ist eine klima- und umweltfreundliche Energiequelle mit günstigen Sicherheitseigenschaften. Dennoch wird sie – obwohl sie die großen Probleme der Kernspaltung, z.B. Endlagerung, vermeidet – als nukleare Technik auch zukünftig um Akzeptanz werben müssen.
- Die Kernfusion trägt wesentlich zur Versorgungssicherheit bei: Da die Brennstoffe überall in nahezu unerschöpflicher Menge vorhanden sind, reduziert sie die Importabhängigkeit nachhaltig. Damit leistet sie einen wichtigen Beitrag zum friedlichen Zusammenleben der Menschheit.



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

## Literatur auf den Internet-Seiten des IPP:

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/>

insbesondere

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/berichte.html>

auch kostenlos zu abonnieren: Energie-Perspektiven

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/>

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/archiv/index.html>