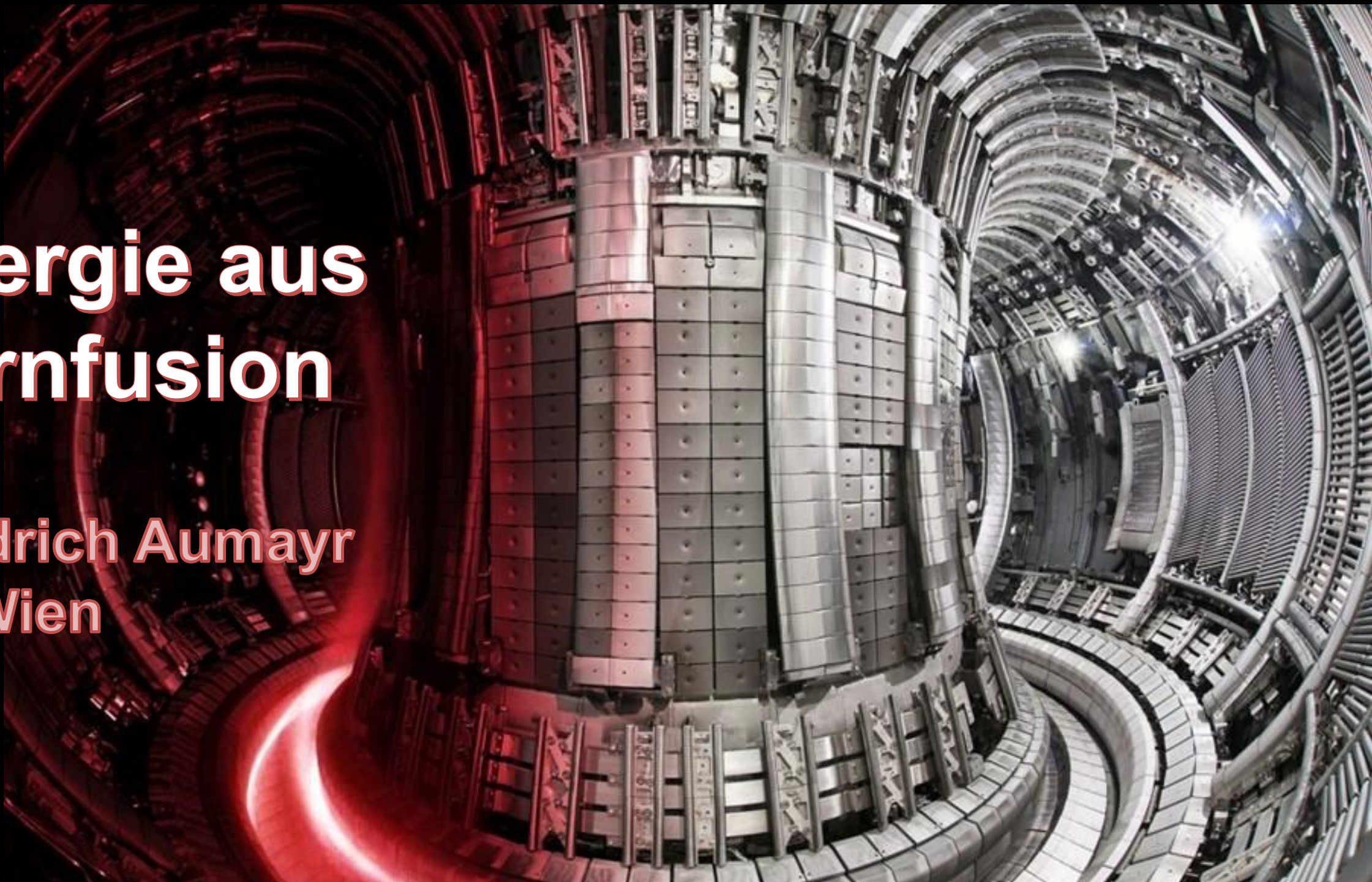
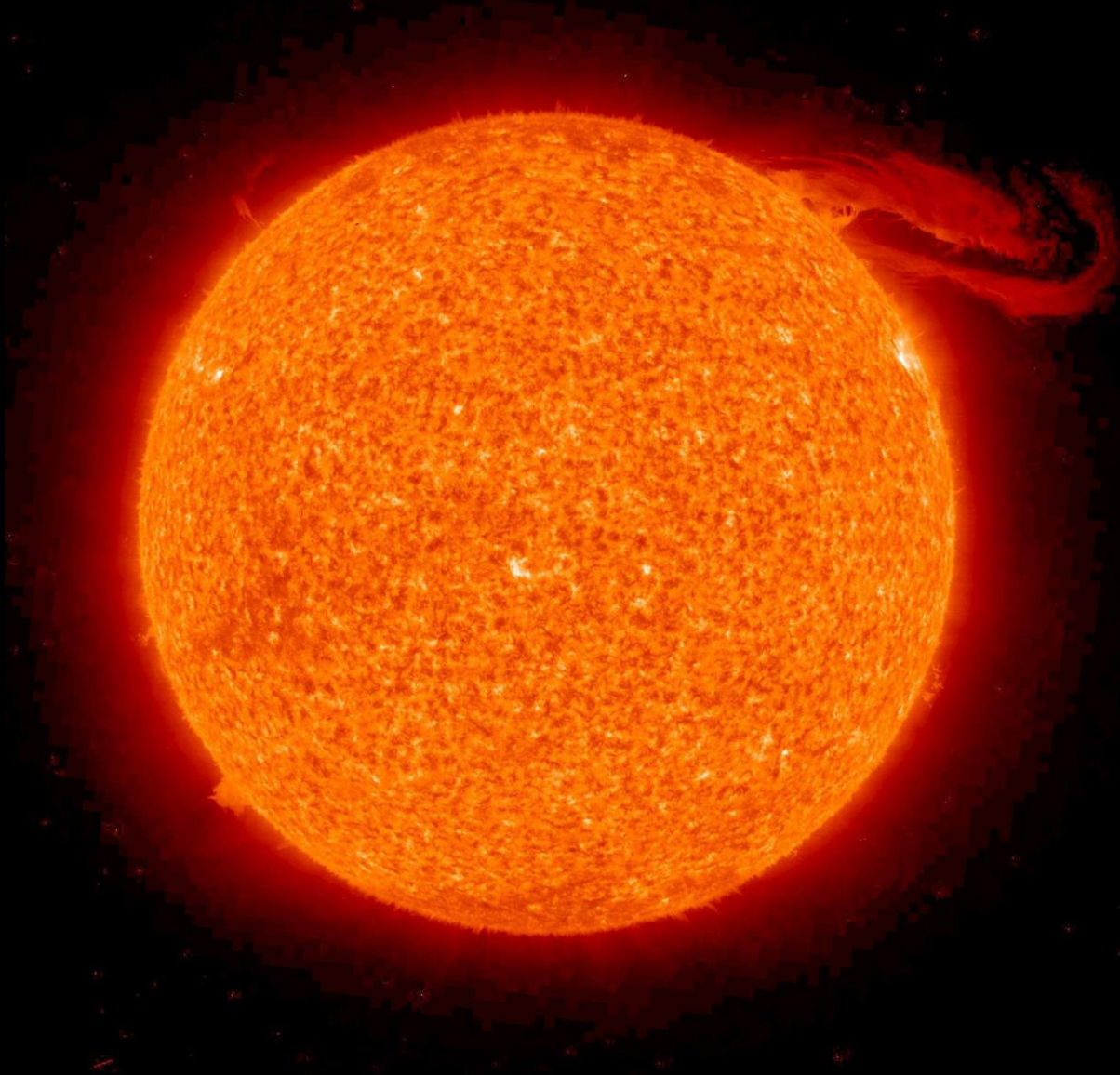


Energie aus Kernfusion

Friedrich Aumayr
TU Wien



Fusion – die Energiequelle unserer Sonne



Alle Sterne sind gigantische Fusionsreaktoren!

Jede Sekunde verschmilzt unsere Sonne
564 Millionen Tonnen Wasserstoff zu
560 Millionen Tonnen Helium.

$$E = m c^2$$

4 Millionen Tonnen Masse pro Sekunde werden
in Energie umgewandelt und als Strahlung
emittiert (insgesamt 3.6×10^{17} GW)

Energie, die auf der Erde ankommt: 1.4 kW/m^2

Science advise from Stephen Hawking

Q: What world-changing idea, small or big, would you like to see implemented by humanity?

A: This is easy. I would like to see the development of fusion power to give an unlimited supply of clean energy



Stephen Hawking

'Brief Answers to the Big Questions', 2018

Vorteile der Fusion



1 KEINE CO₂ EMISSION

Fusion ist klimafreundlich, mit geringem Flächenverbrauch



2 SICHER

Der Fusionsprozess ist leicht und sicher kontrollierbar



3 VERLÄSSLICH

Fusionsenergie ist grundlastfähig & unterliegt keinen jahreszeitlichen Schwankungen



4 NACHHALTIG

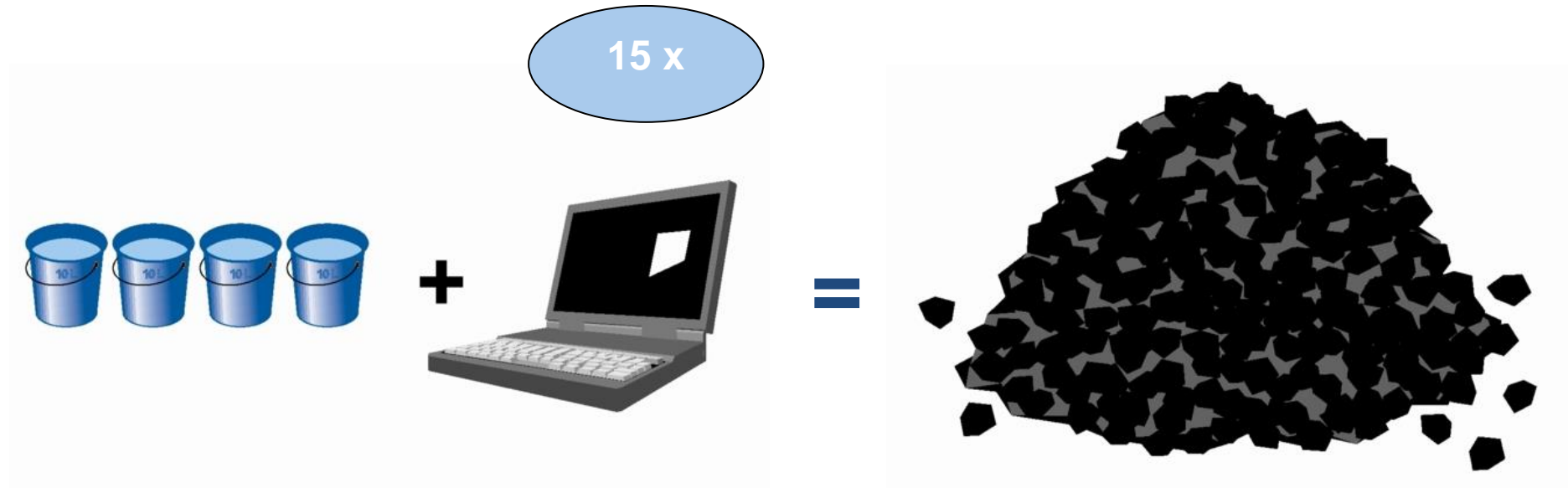
Fusionsbrennstoff ist in unseren Meeren und der Erdkruste fast unbegrenzt vorhanden



5 ENERGIEEFFIZIENT

Fusion ist der energiereichste Prozess den die Menschheit zur Verfügung hat

Die Fusionsreaktion ist sehr energiereich



Deuterium in
40 Liter Wasser

70 Gramm Lithium
(15 Laptop-Akkus)

40 Tonnen Kohle
(320 000 kWh)

zum Erbrüten von
Tritium verwendet

Vergleich verschiedener Energiequellen



Produktion von 1 GW_{elektrisch} (3 GW_{thermisch}) während eines Jahres (d.h. 8760 GWh/Jahr) erfordert:



2 700 000 Tonnen Kohle



1 800 000 Tonnen Öl



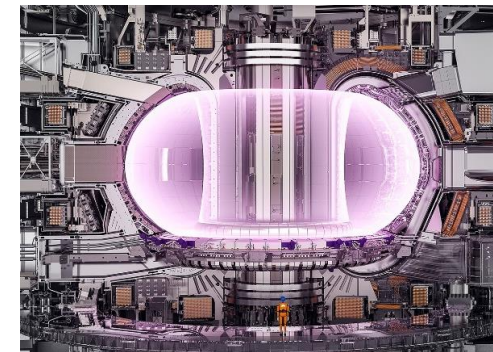
25 Tonnen Uran



1 000 Windkraftanlagen mit
einer Leistung von 3 MW
(70 km²)



50 km² Sonnenkollektoren



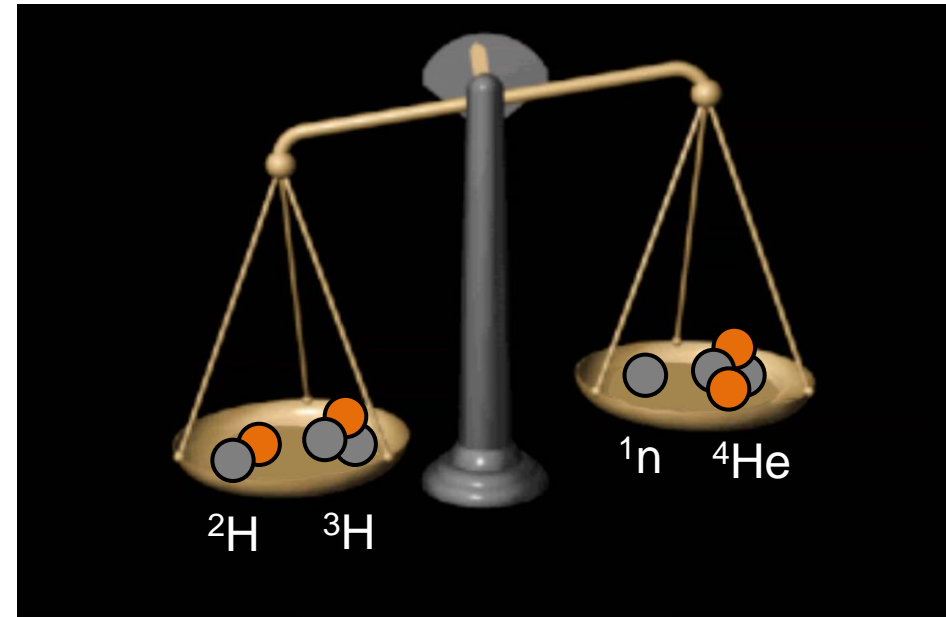
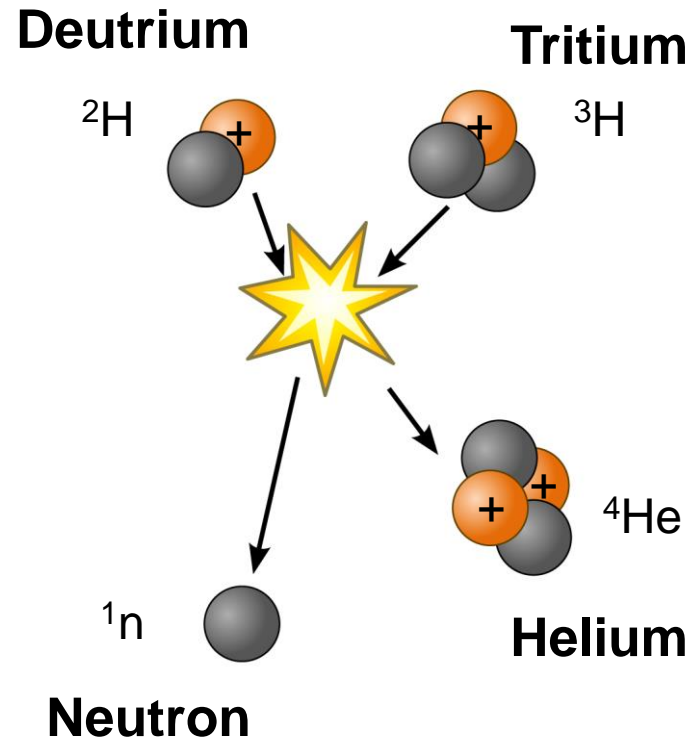
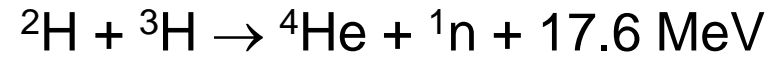
350 kg Deuterium-Tritium

Kernfusion auf der Erde



Brennstoff:

Schwerer und superschwerer Wasserstoff:



Aber es ist nicht einfach, das zu erreichen



Die Wasserstoff-Kerne sind elektrisch positiv geladen.

Für die Fusion müssen sie

(a) ihre elektrostatische Abstoßung überwinden & sich nahe genug aneinander annähern, um die starke (anziehende) Kernkraft zu spüren.

⇒ Temperatur von mehreren

100 Millionen °C

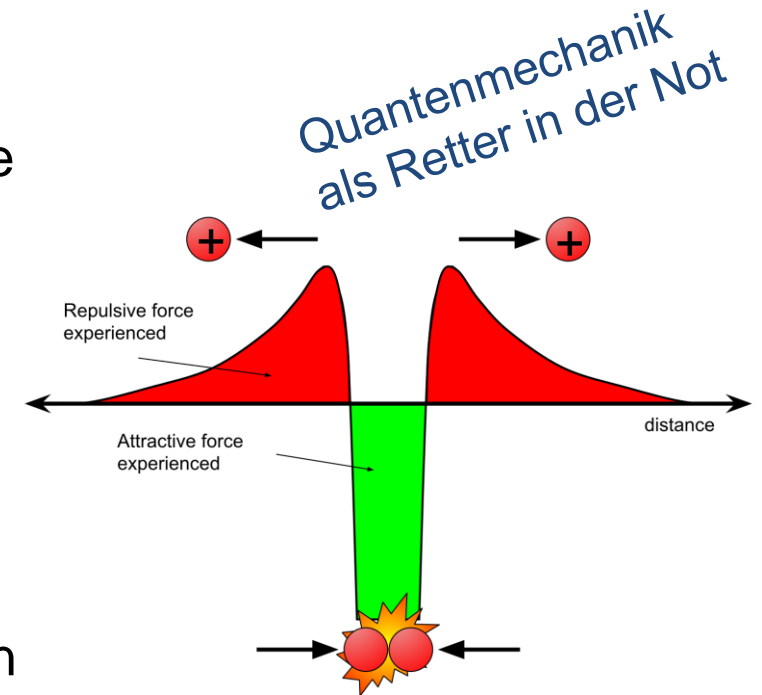
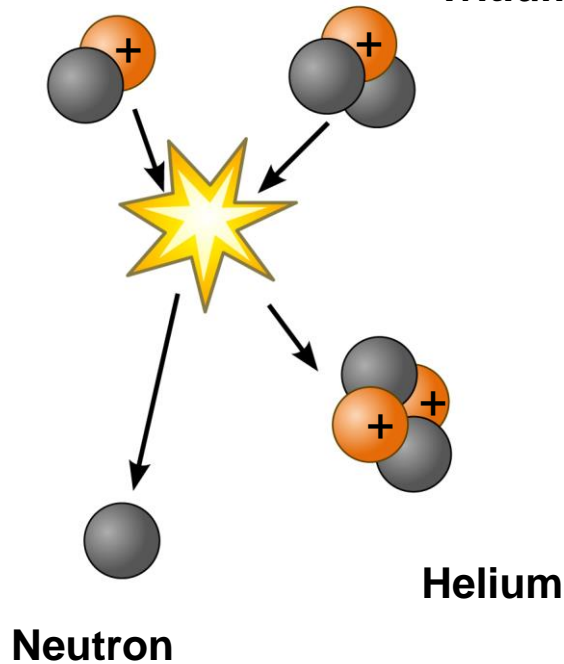
⇒ Plasma!

(b) häufig genug miteinander stoßen

⇒ **Einschluss** des Plasmas notwendig

Deuterium

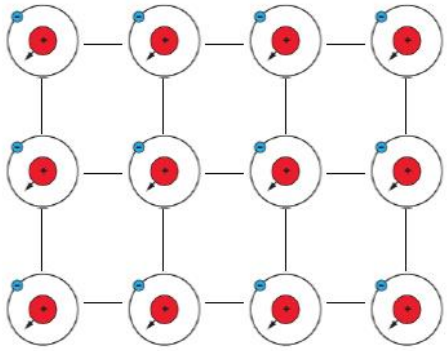
Tritium



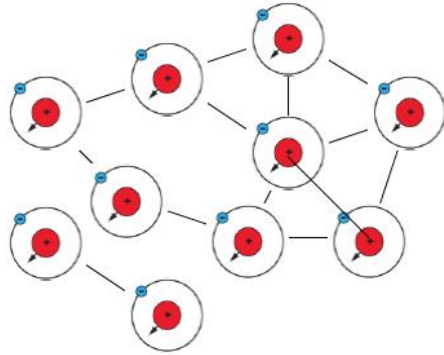
Wie sieht Materie bei 100 Millionen Grad aus?



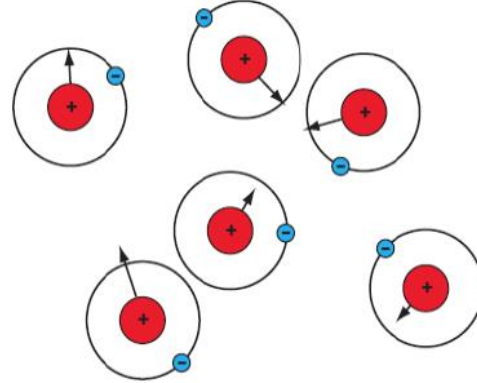
fest



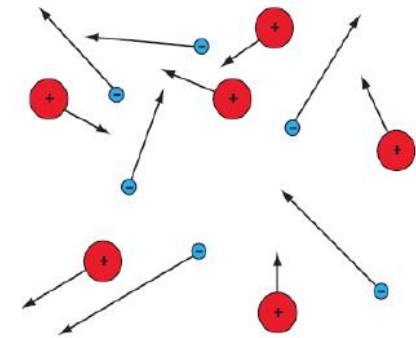
flüssig



gasförmig



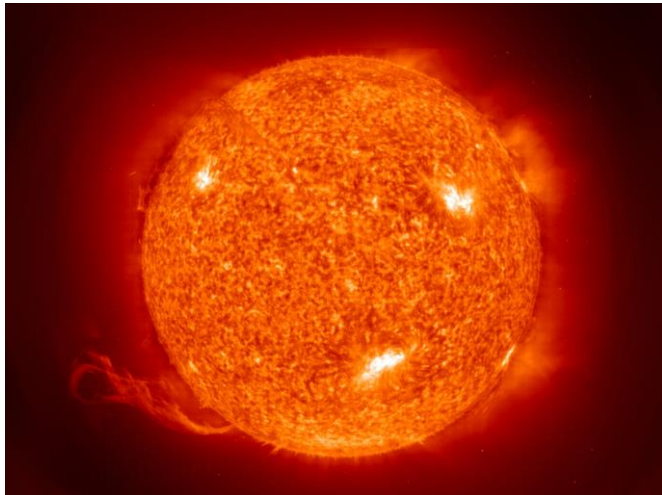
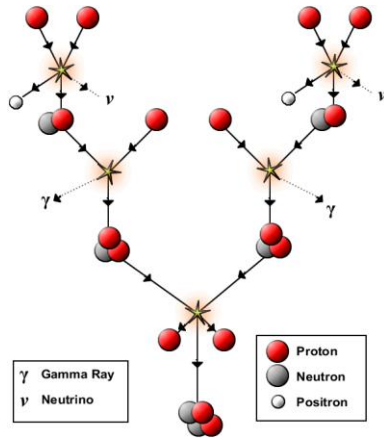
Plasma



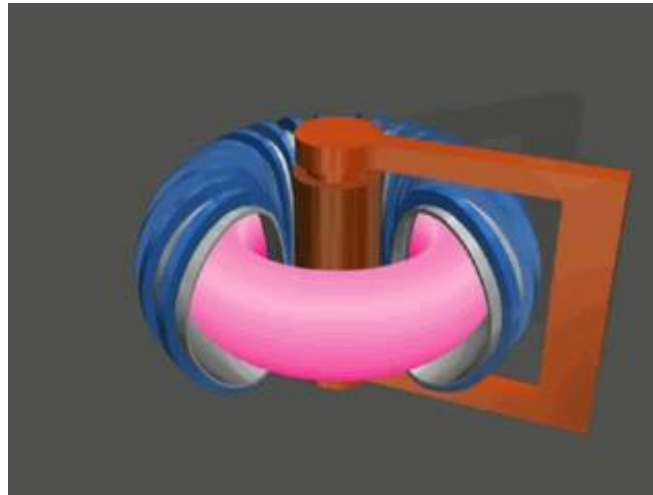
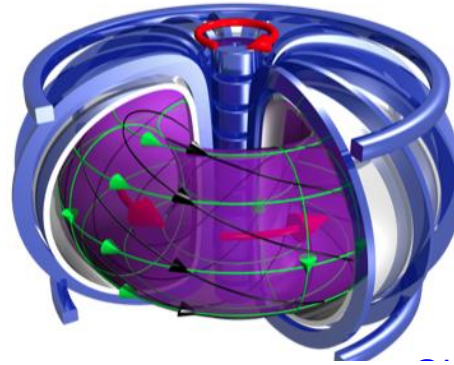
Temperatur

Verschiedene Möglichkeiten, ein Plasma einzuschließen

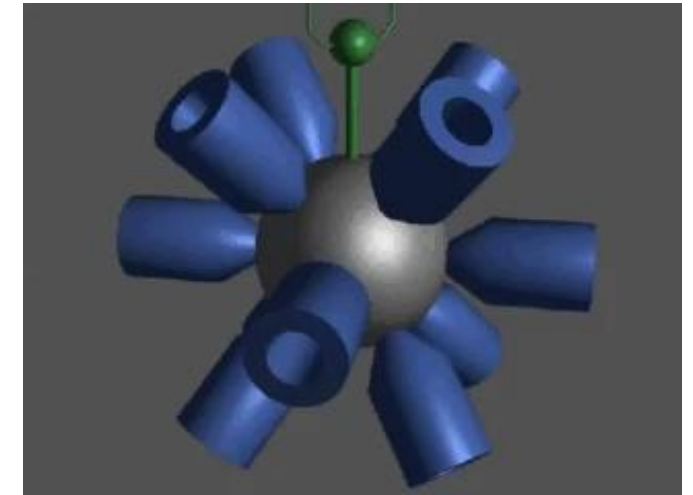
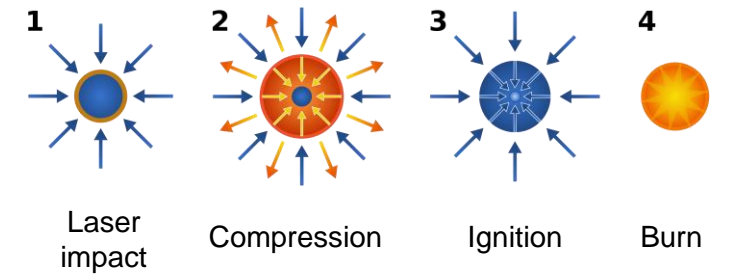
Gravitations-Einschluss



Magnetischer Einschluss

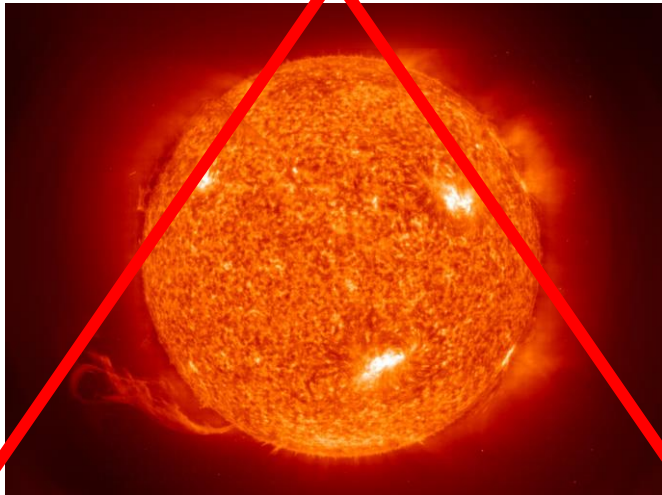
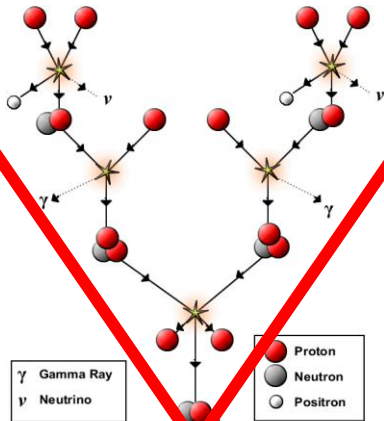


Trägheitseinschluss

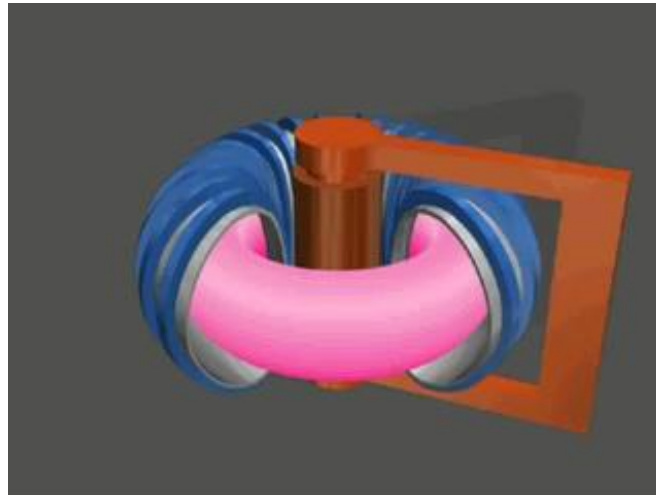
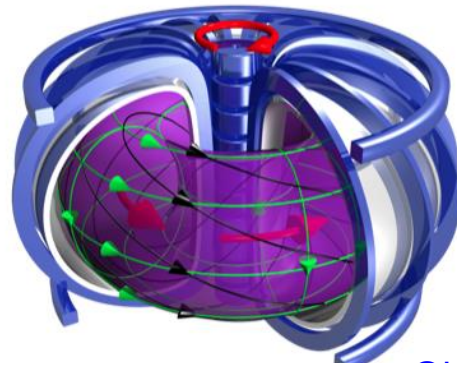


Verschiedene Möglichkeiten, ein Plasma einzuschließen

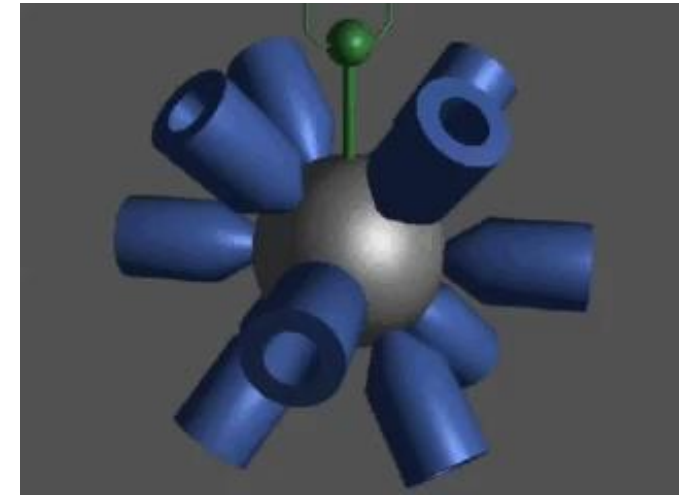
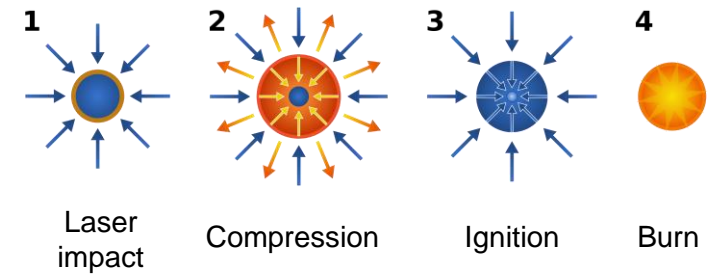
Gravitations-Einschluss



Magnetischer Einschluss

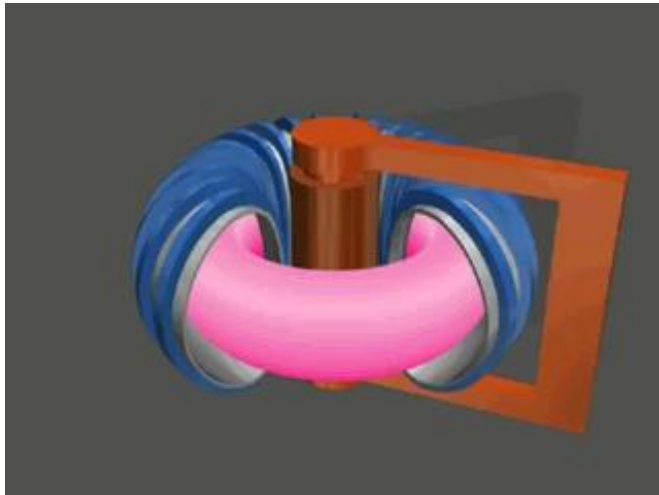
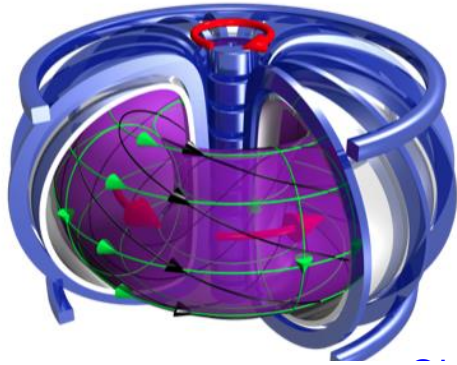


Trägheitseinschluss

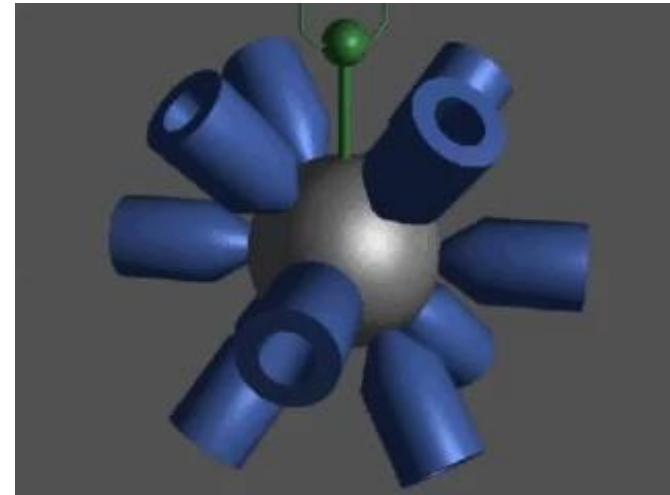
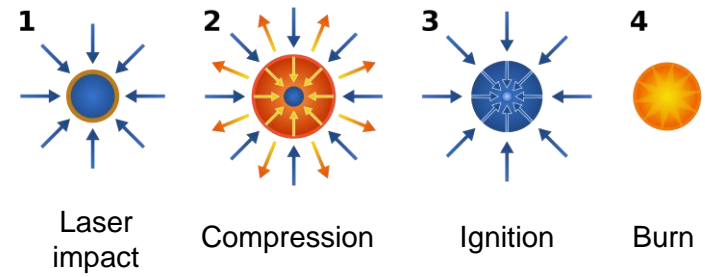


Verschiedene Wege zur kontrollierten Fusion

Magnetischer Einschluss

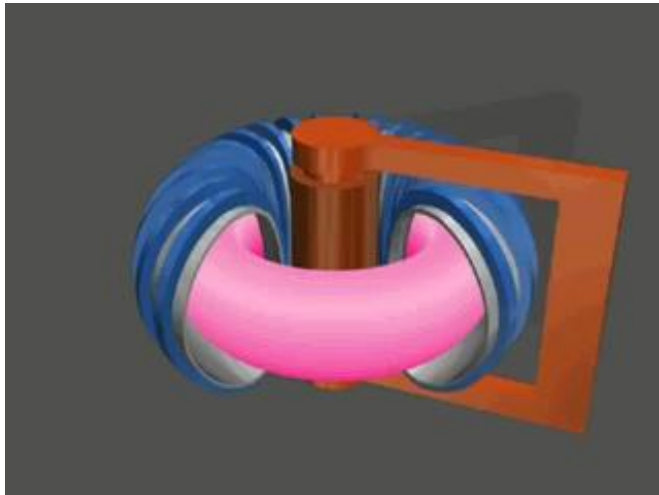
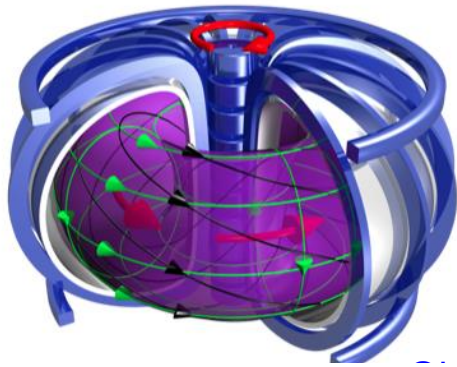


Trägheitseinschluss

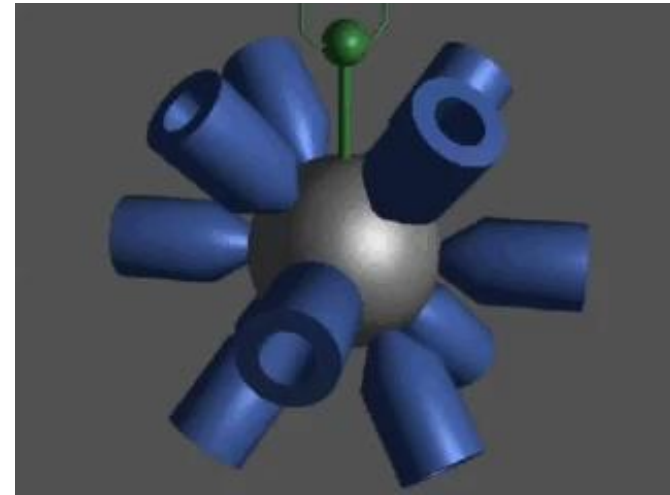
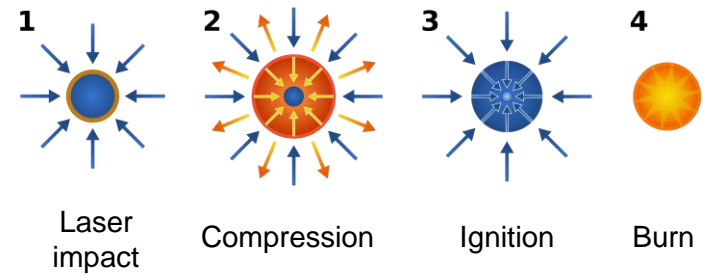


Verschiedene Wege zur kontrollierten Fusion

Magnetischer Einschluss



Trägheitseinschluss



Verschiedene Wege zur kontrollierten Fusion

Magnetischer Einschluss

science ORF.at

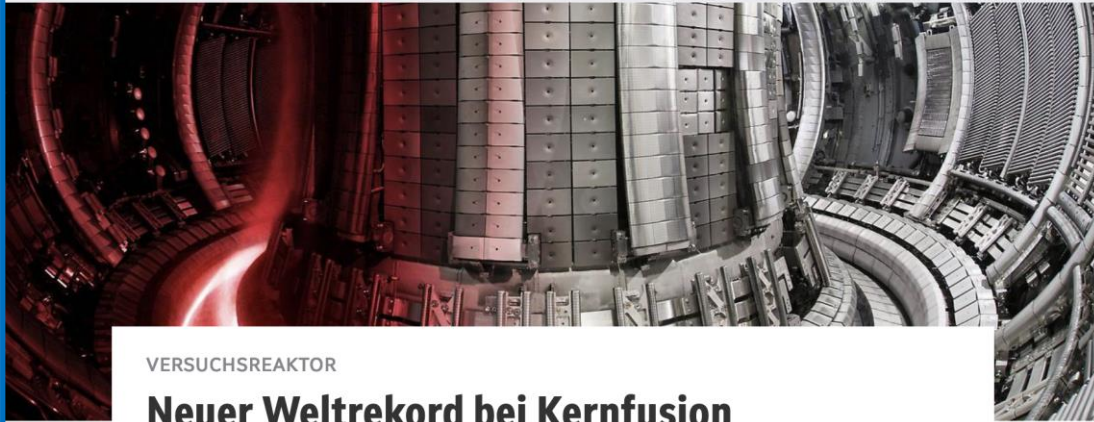
Suchen 

Aktuell

Forscher/innen schreiben

Radio & TV

Kontakt



VERSUCHSREAKTOR

Neuer Weltrekord bei Kernfusion

Bei den letzten Experimenten am Versuchsreaktor Joint European Torus (JET) bei Oxford ist ein neuer Rekord erzielt worden. Aus 0,2 Milligramm Brennstoff wurden 69 Megajoule (MJ) Energie gewonnen – die größte Energiemenge, die je in einem Fusionsexperiment erzeugt wurde. Eine positive Bilanz entstand dennoch nicht: Es wurde rund dreimal so viel Energie hineingesteckt, als herausgekommen ist.

8. Februar 2024, 14.00 Uhr

Teilen 

08. Feb. 2024

Trägheitseinschluss

science ORF.at

Suchen 

Aktuell

Forscher/innen schreiben

Radio & TV

Kontakt



ENERGIE

Durchbruch bei der Kernfusion?

Fachleuten eines US-Labors ist offenbar ein wichtiger Fortschritt in der Kernfusionsforschung gelungen – und damit in Richtung grüner Energie. Sie hätten mit einem Fusionsreaktor erstmals mehr Energie erzeugt als während des Prozesses verbraucht wurde, wie mehrere Medien berichteten.

12. Dezember 2022, 12.50 Uhr

Teilen 

12. Dez. 2022

Trägheitsfusion: Ein Durchbruch ?



science  ORF.at 

[Aktuell](#) [Forscher/innen schreiben](#) [Radio & TV](#) [Kontakt](#)



ENERGIE

Durchbruch bei der Kernfusion?

Fachleuten eines US-Labors ist offenbar ein wichtiger Fortschritt in der Kernfusionsforschung gelungen - und damit in Richtung grüner Energie. Sie hätten mit einem Fusionsreaktor erstmals mehr Energie erzeugt als während des Prozesses verbraucht wurde, wie mehrere Medien berichteten.

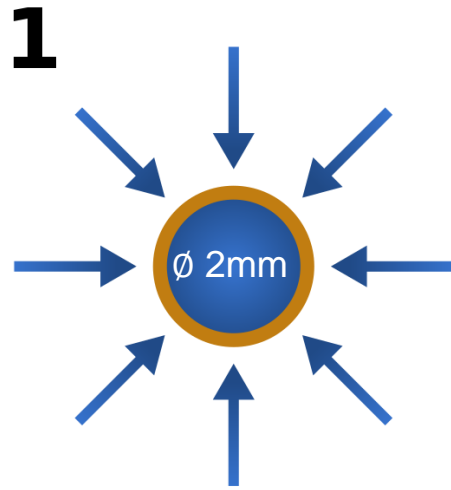
NIF - LLNL

12. Dezember 2022, 12.50 Uhr

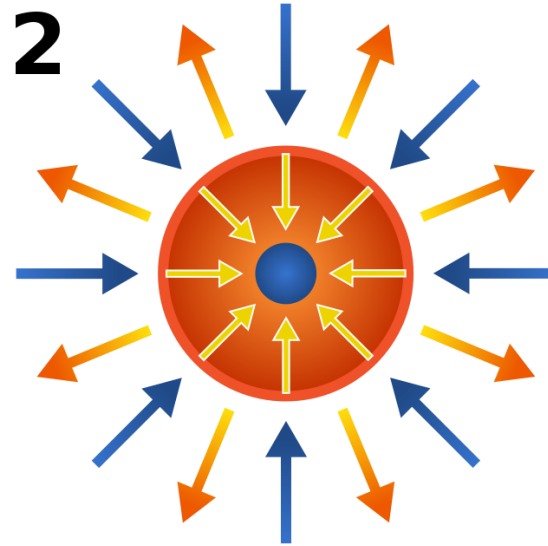
Teilen



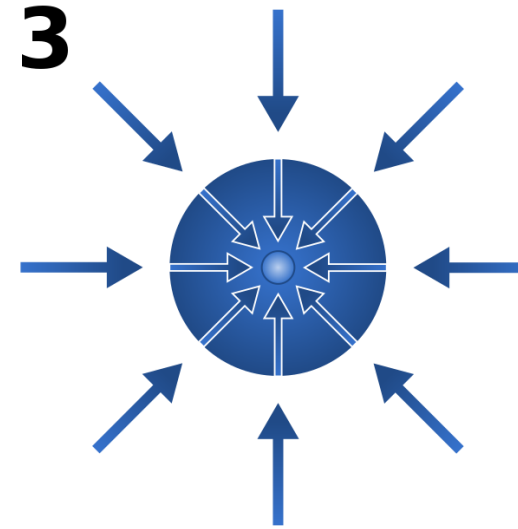
Trägheitsfusion: Durchbruch



Schnelles Aufheizen durch Laserenergie



Durch Materialabtrag wird das Pellet verdichtet



Fusionsbedingungen im Zentrum

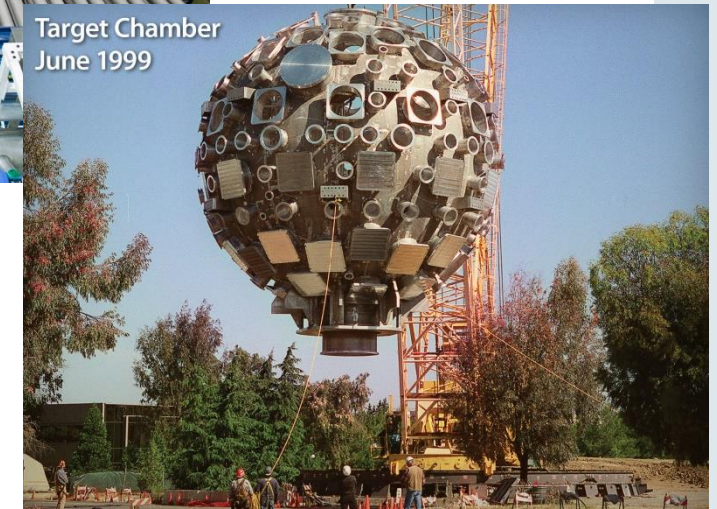
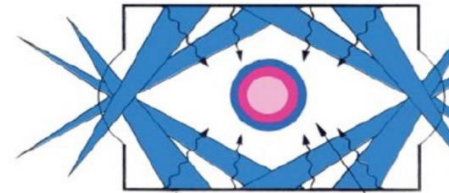
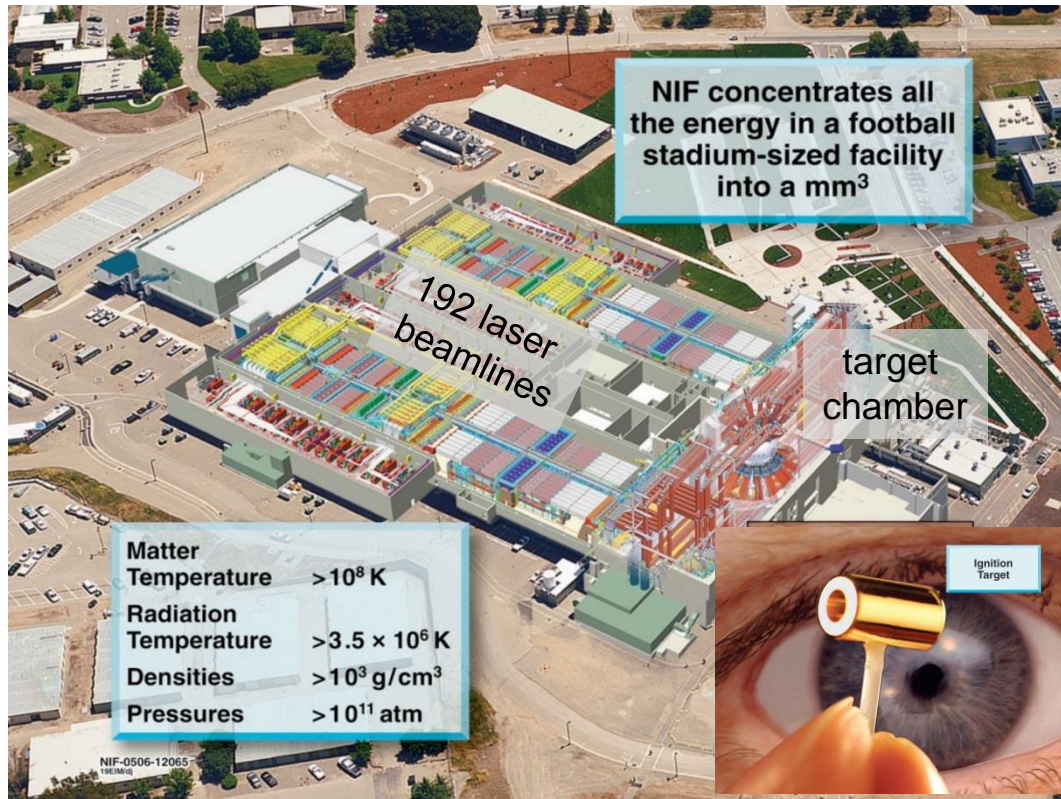


Verbrennung des Pellets durch Selbstheizung

Der gesamte Prozess findet innerhalb weniger Nanosekunden statt

Bei der Trägheitsfusion treten Zündung & Abbrand schneller auf als die Ausdehnung des Plasmas
Prinzip der Wasserstoffbombe mit steuerbarer Explosionsenergie (~ 1 mm Pellets)

National Ignition Facility at LLNL (Lawrence Livermore National Lab)



NIF ... Weltweit größte Laseranlage (National Ignition Facility in Livermore (USA)
Konzept für die Zündung, abgestimmt auf militärische Anwendung (Stockpile Stewardship).
Hohlraum-Target für symmetrische Bestrahlung notwendig, aber nicht (kosten-)effizient

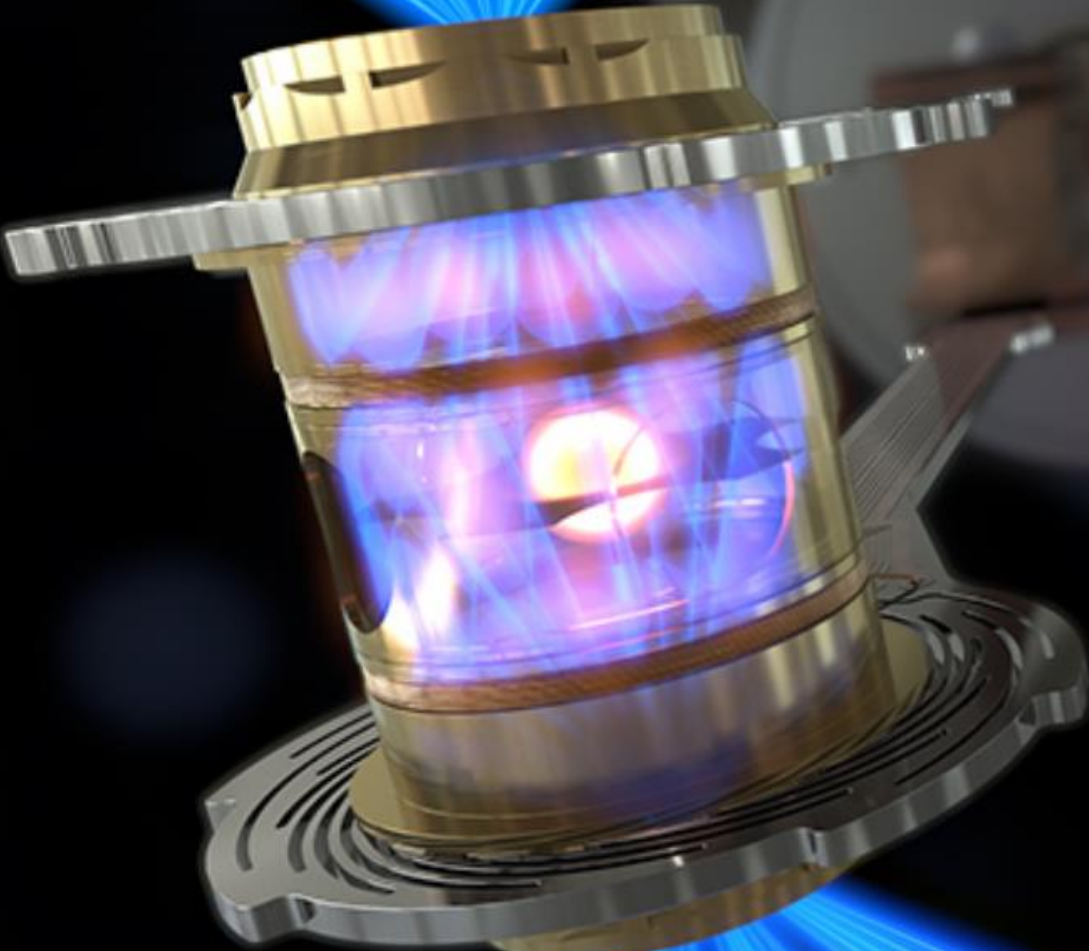
300 MJ ... elektrische Energie (Kondensatoren)

4 MJ ... Infrarot-Laser

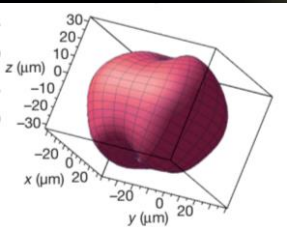
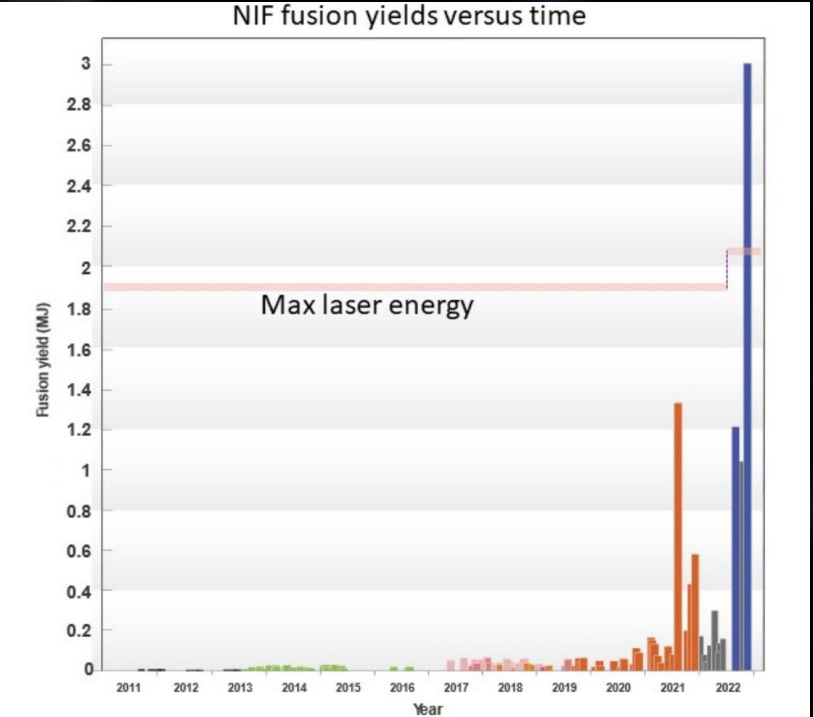
2 MJ ... UV-Laser (351 nm, 1 ps)

3 MJ ... Energie aus der Fusion (1/2 kg TNT)

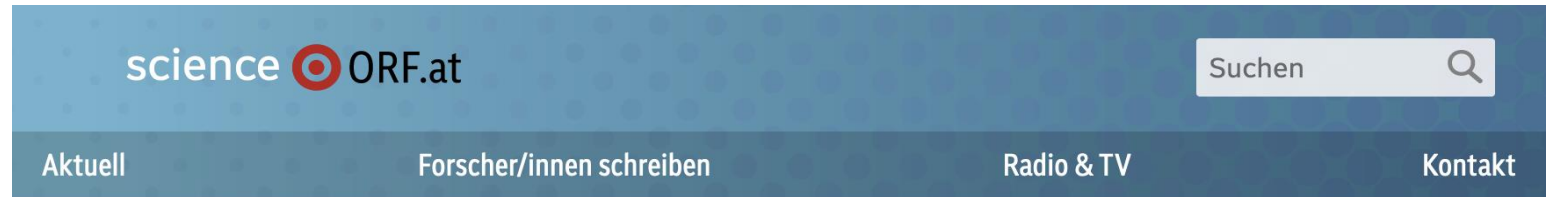
Q = 1.5



Fusion yield in Megajoule (MJ)



Problem: Unzureichende Symmetrie der Pelletkompression



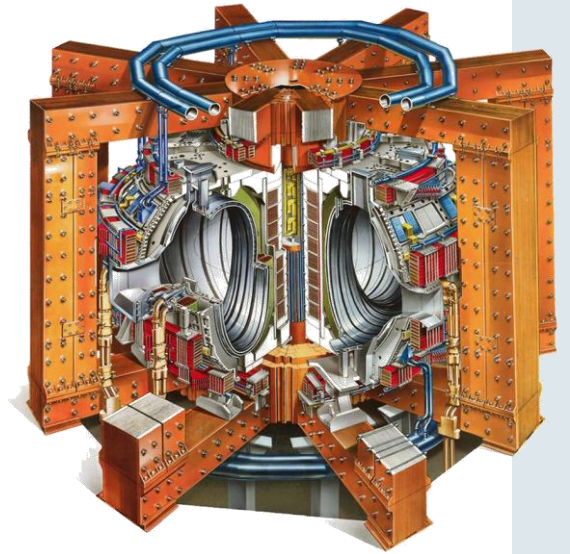
VERSUCHSREAKTOR

Neuer Weltrekord bei Kernfusion

Bei den letzten Experimenten am Versuchsreaktor Joint European Torus (JET) bei Oxford ist ein neuer Rekord erzielt worden. Aus 0,2 Milligramm Brennstoff wurden 69 Megajoule (MJ) Energie gewonnen – die größte Energiemenge, die je in einem Fusionsexperiment erzeugt wurde. Eine positive Bilanz entstand dennoch nicht: Es wurde rund dreimal so viel Energie hineingesteckt, als herausgekommen ist.

8. Februar 2024, 14.00 Uhr

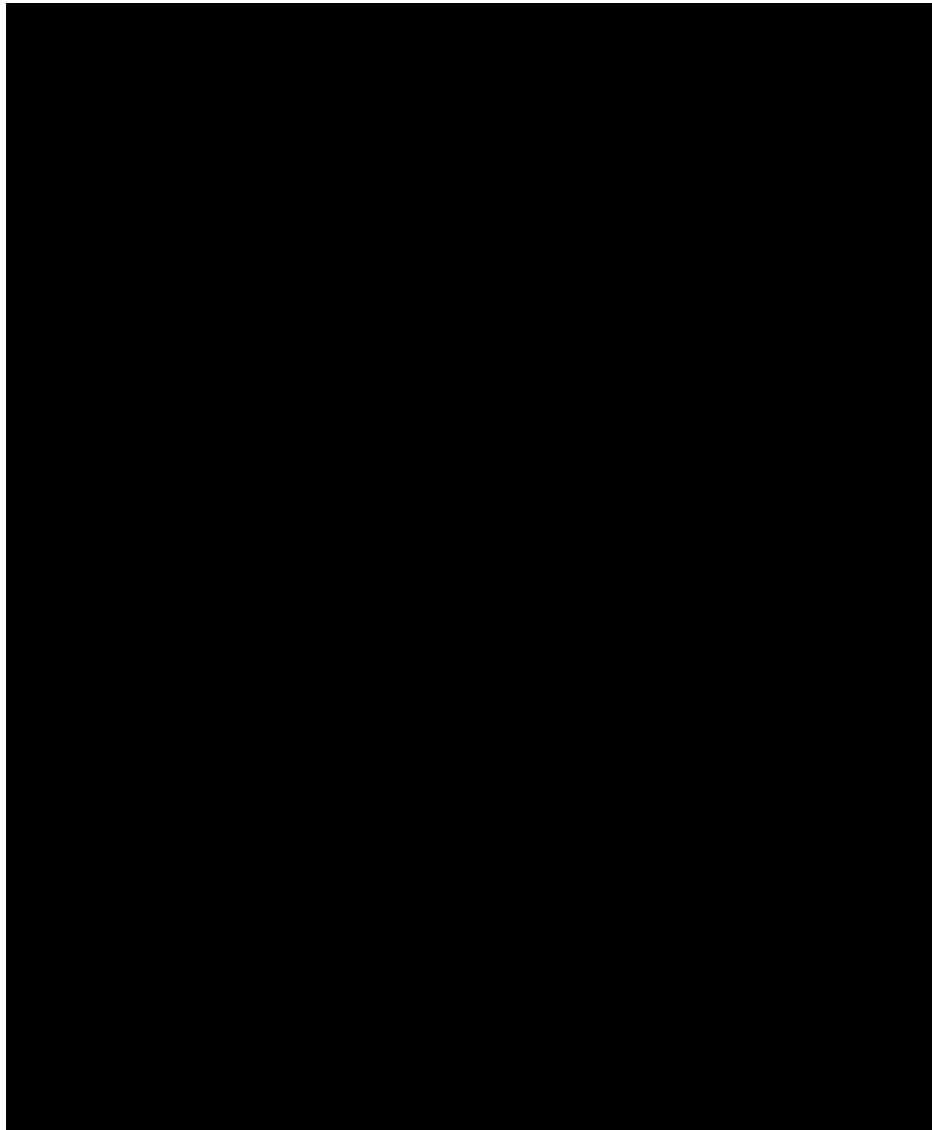
Teilen



JET

Joint European Torus
Culham, UK

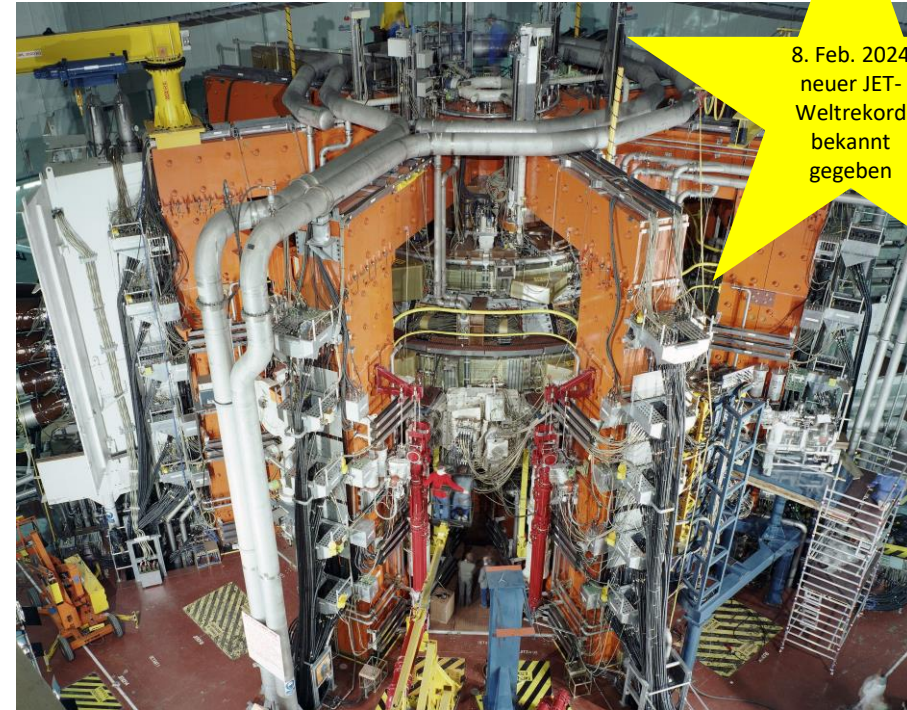
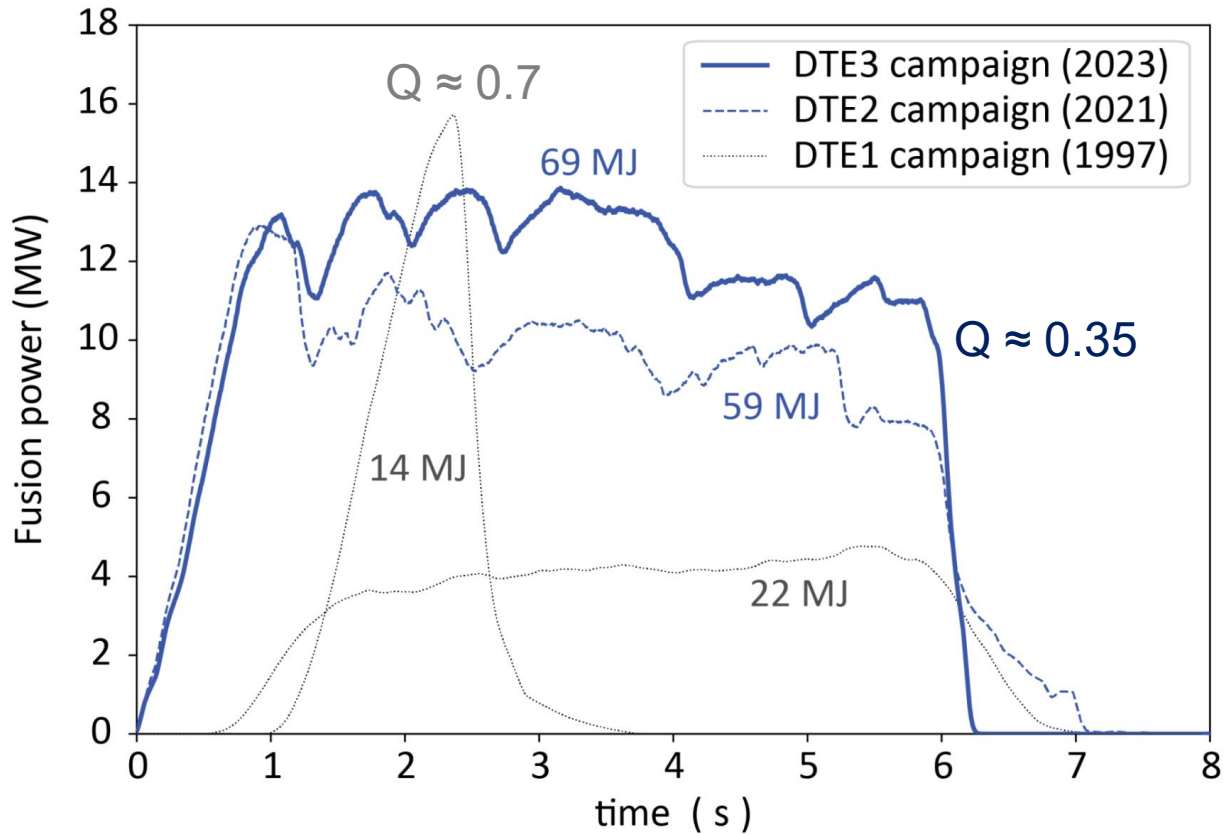
UKAEA



- 03. Dez. 2023
- Insgesamt erzeugte Fusionsenergie:
69 MJ (Megajoule)
- Temperatur des Plasmas:
150 Millionen °Celsius.
- 0.1 mg Tritium und
0.1 mg Deuterium
- **$Q \approx 0.35$**



Ein neuer Energierekord



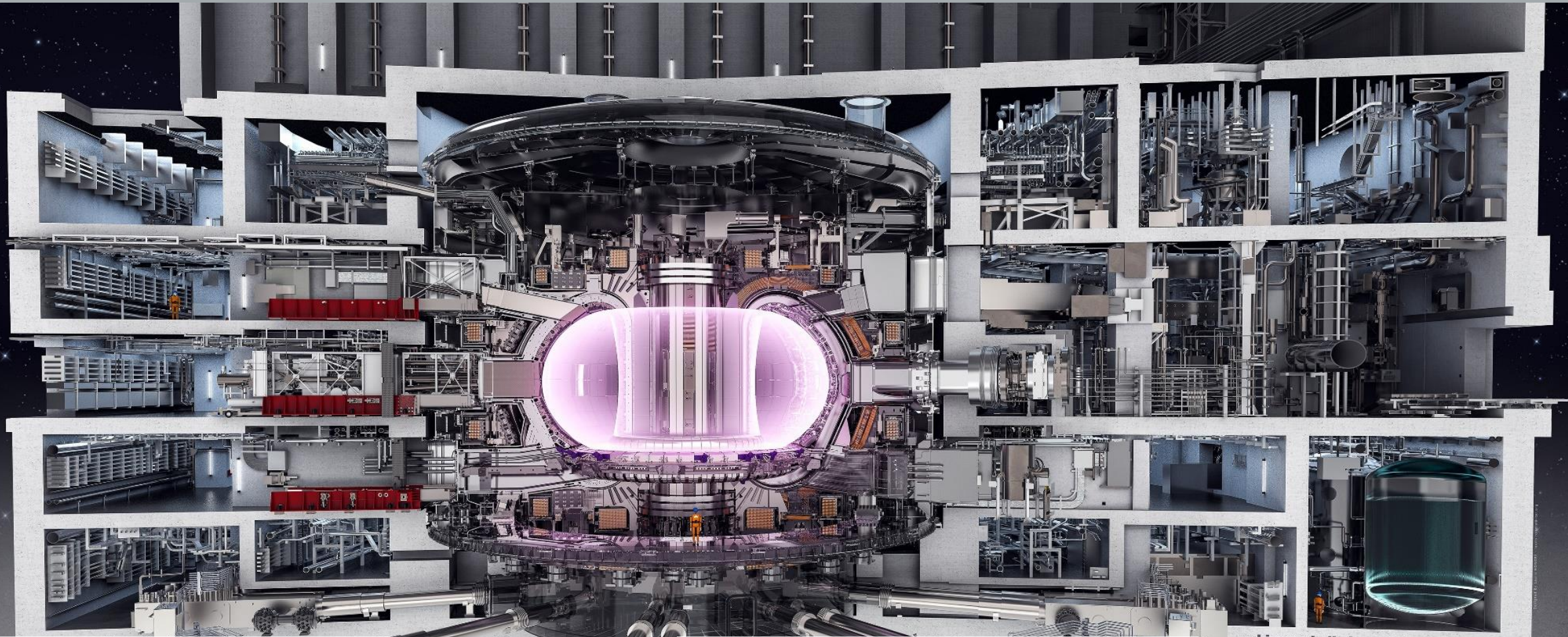
8. Feb. 2024
neuer JET-
Weltrekord
bekannt
gegeben

JET ... Joint European Torus
Culham, UK



EUROfusion

Das ITER-Projekt



china eu india japan korea russia usa

Heizleistung: 50 MW
Fusionsleistung: 500 MW
Plasma-Volumen: 840 m³
Plasma-Strom: 15 MA

Typische Plasmadichte: 10²⁰ m⁻³
Typische Plasmatemperatur: 20 keV
Q ≥ 10
Erstes Plasma: 2027/28

china eu india japan korea russia usa



ITER-Baustelle 2010



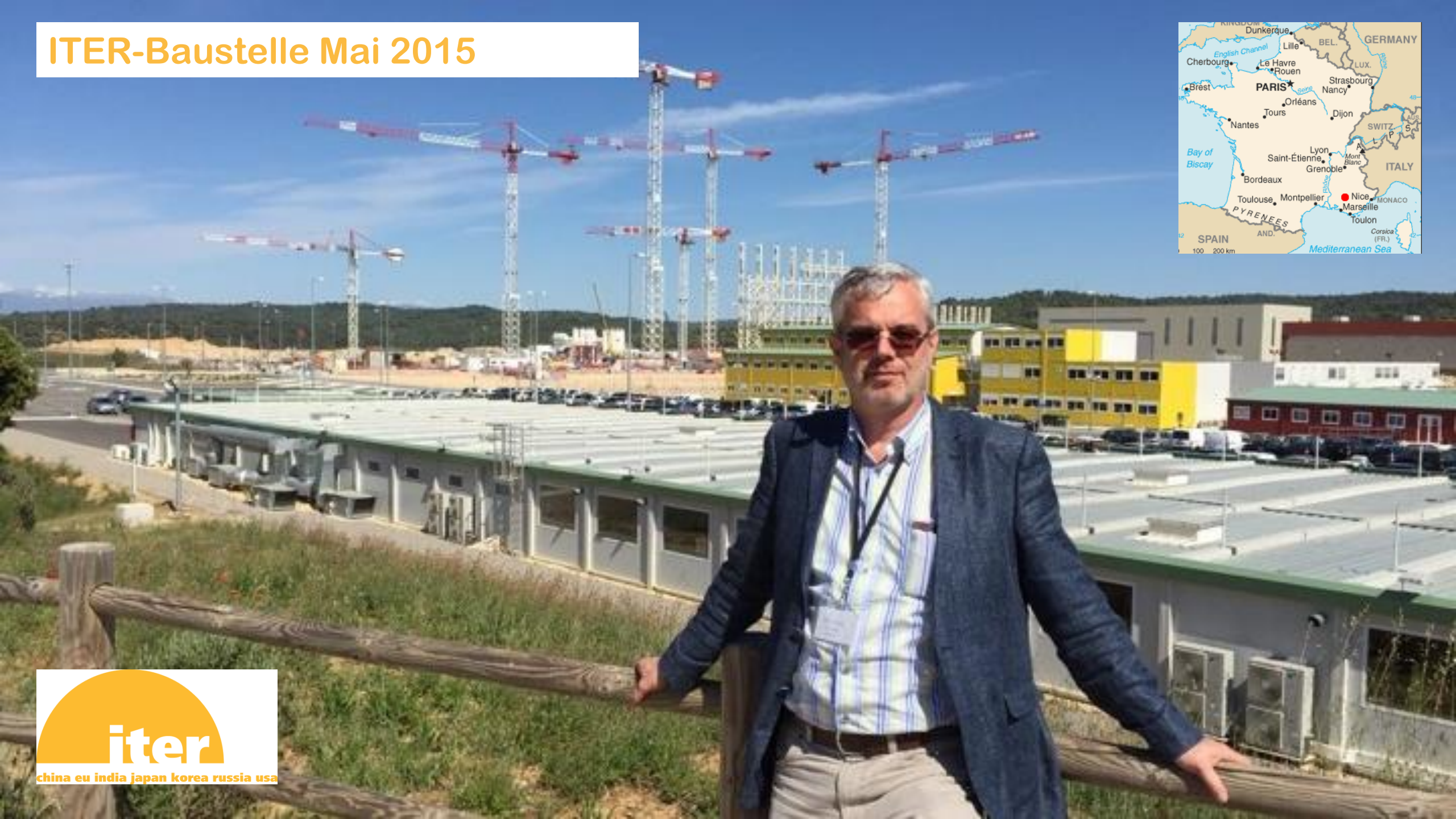
china eu india japan korea russia usa



40 Hektar Baufläche + 30 Hektar während des Baus



ITER-Baustelle Mai 2015



ITER-Baustelle 2017



ITER-Baustelle
Frühjahr 2023



80% fertiggestellt



20 Milliarden €

ITER-Site Visit July 2023

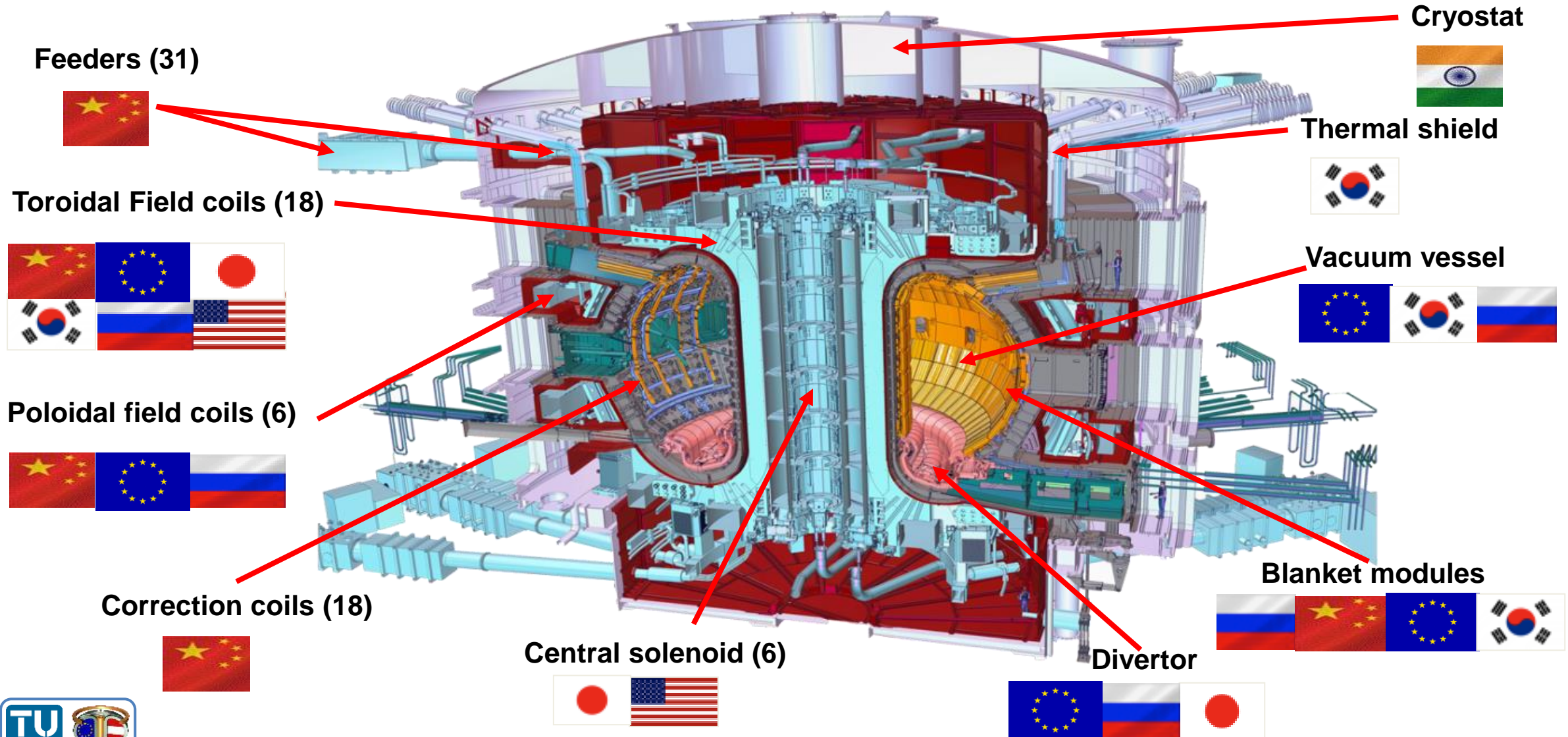


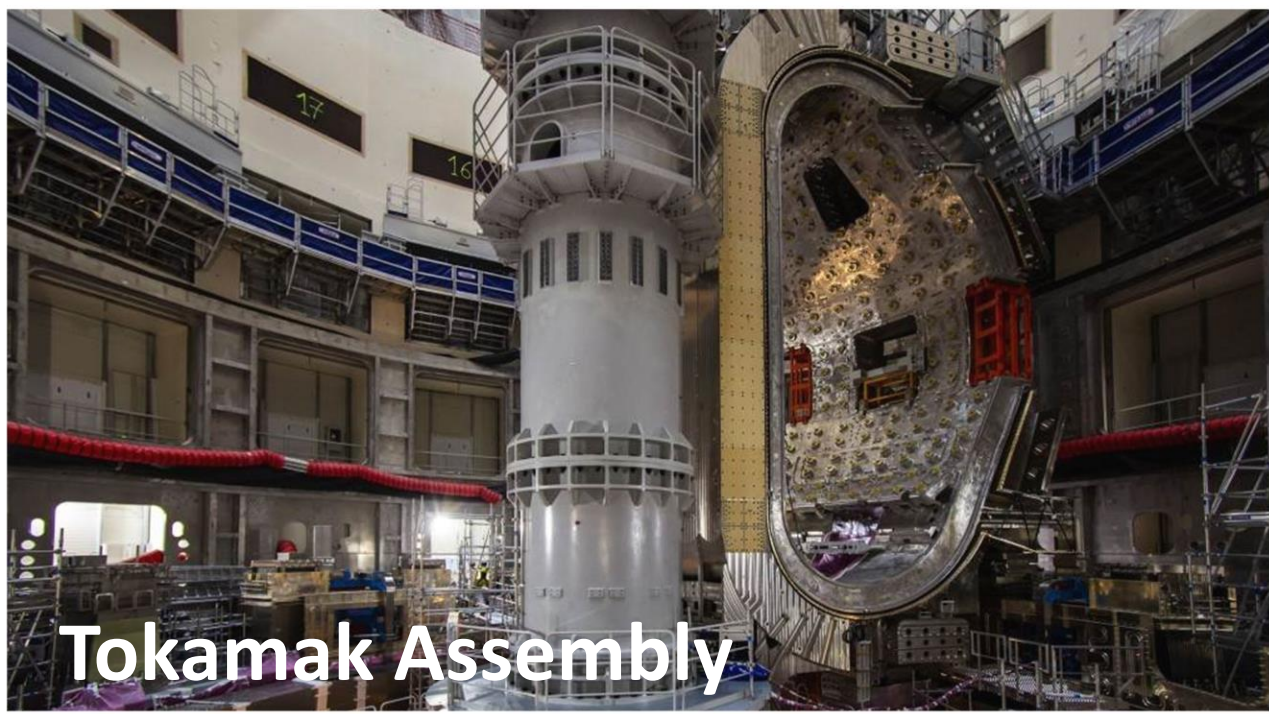
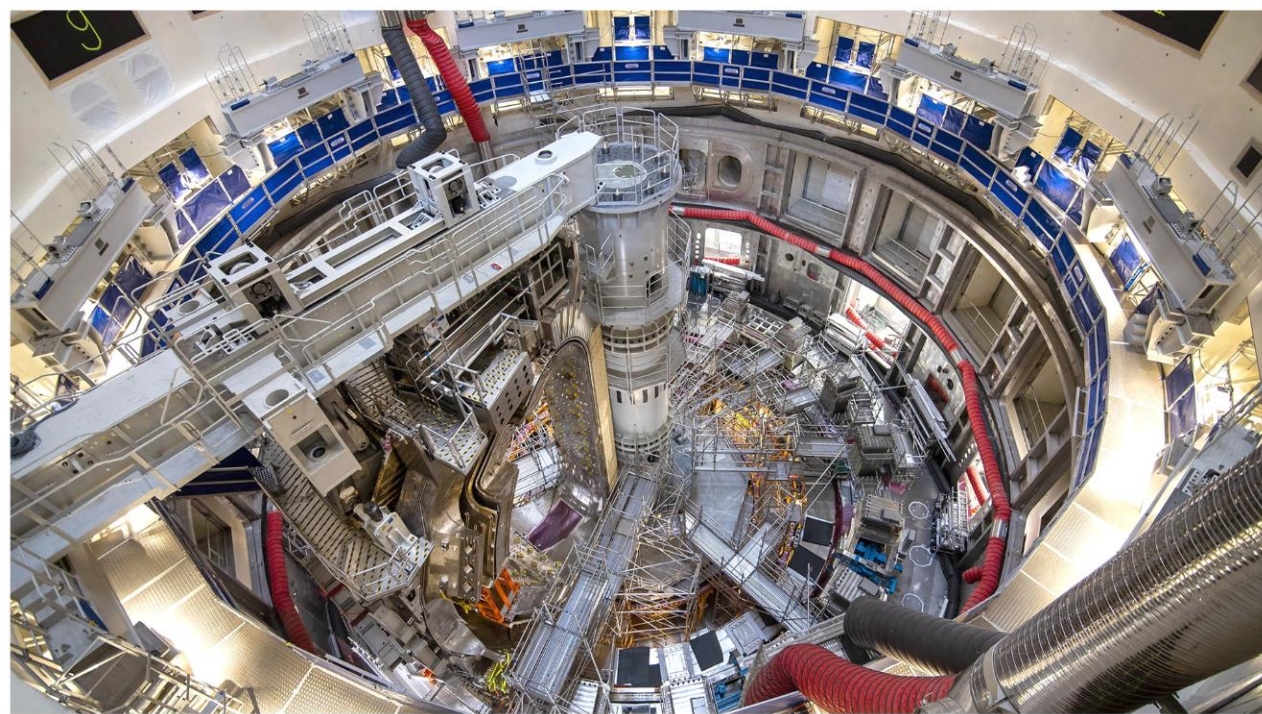
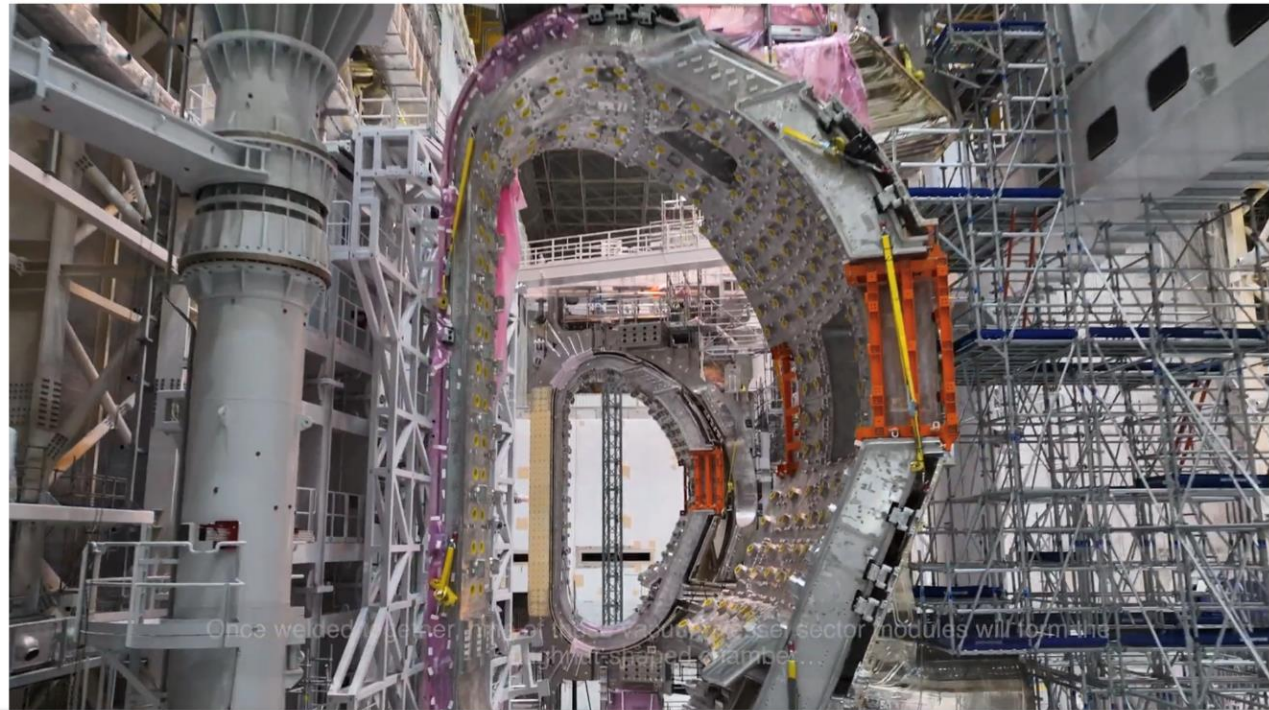
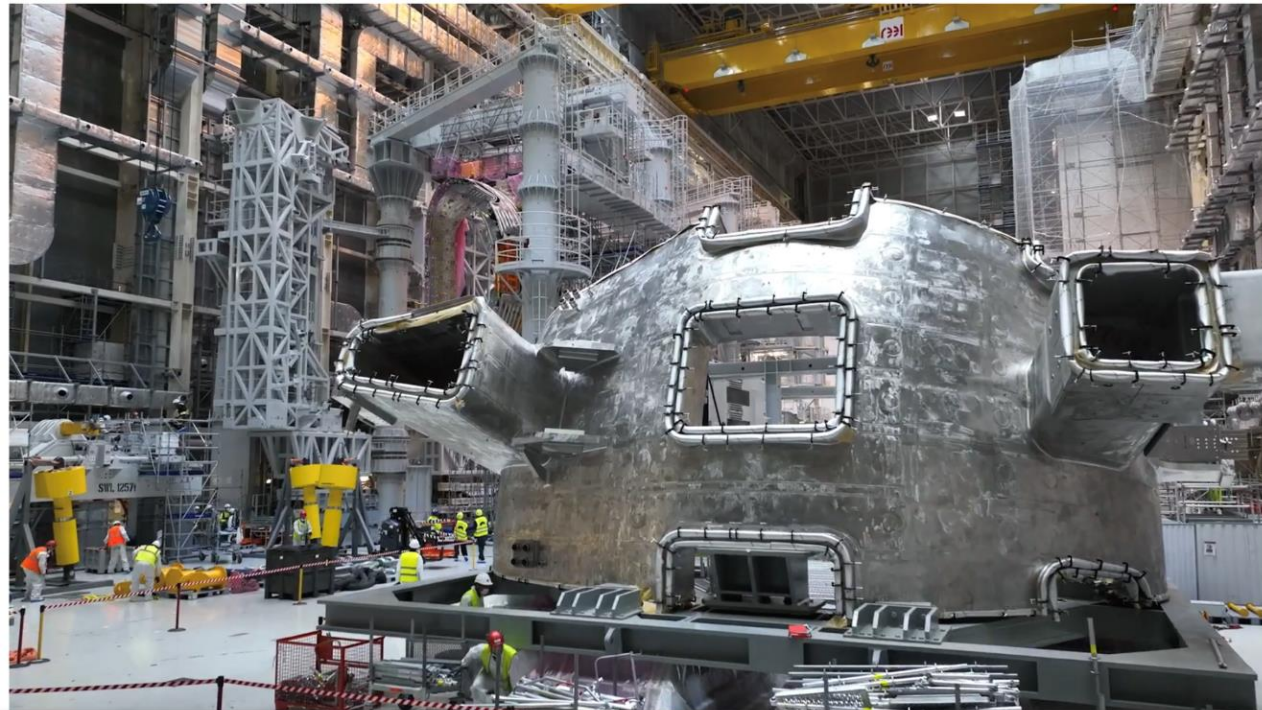
YouTube Video



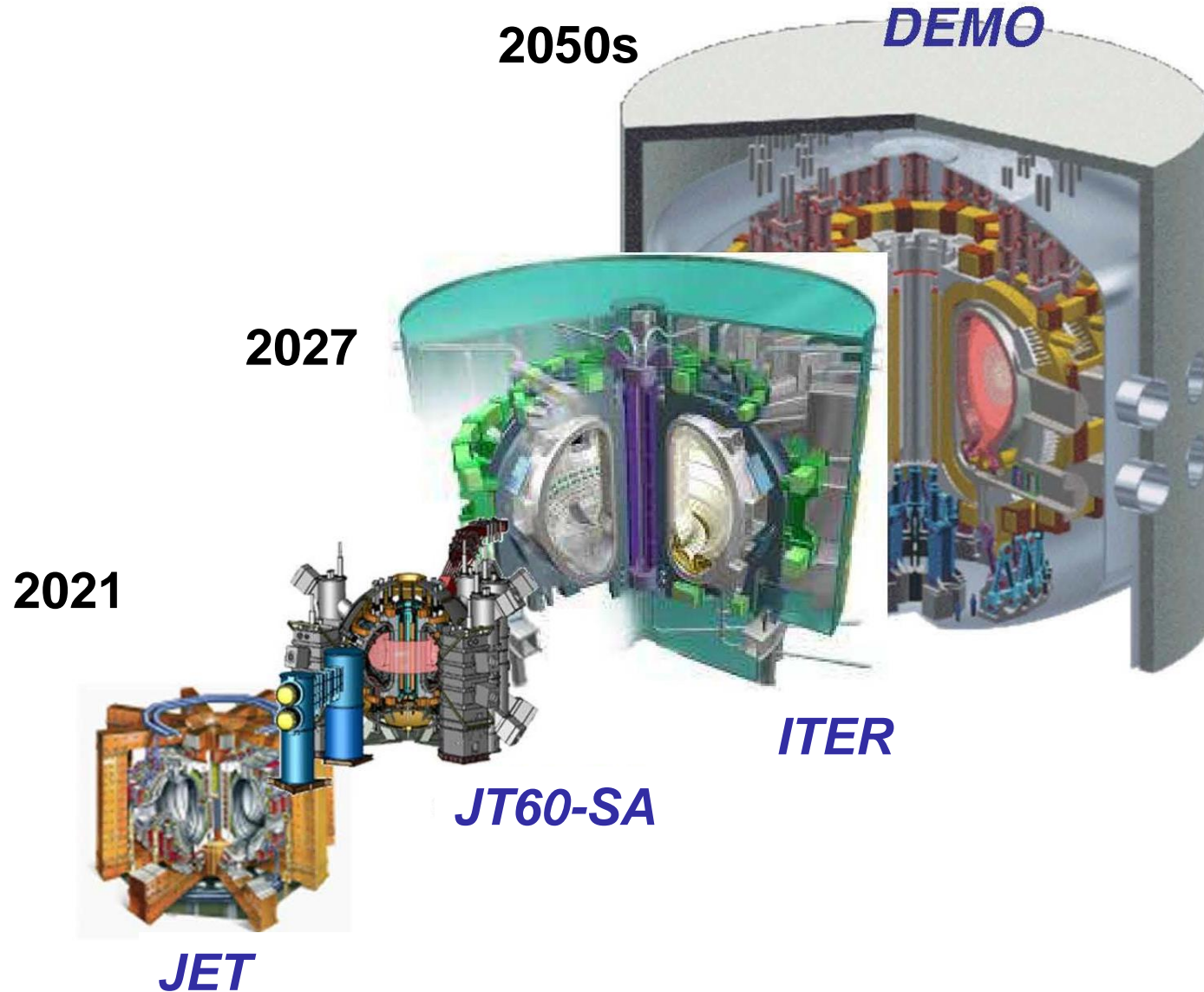
Wer stellt was her?

Die ITER-Mitglieder teilen sich das gesamte geistige Eigentum





Der (konservative) Fahrplan zur Fusionsenergie



DEMO

V = 2000m³

Q = 40

P = 3GW

T = non-stop

ITER

V = 840m³

Q = 10

P = 500 MW

T = 400 s

JET

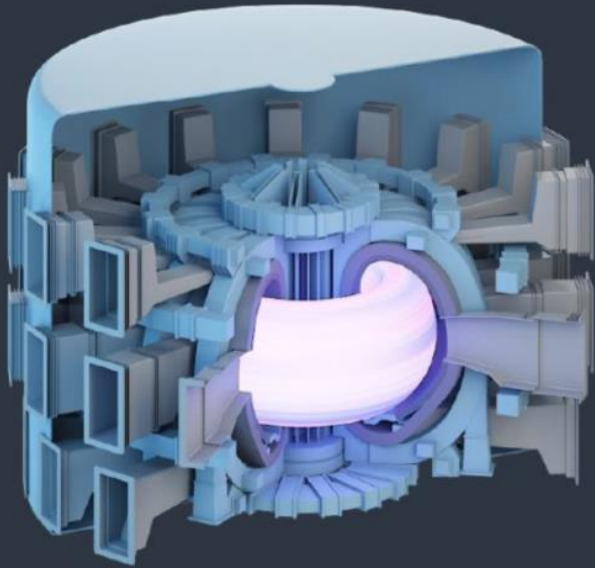
V = 90m³

Q = 0.7

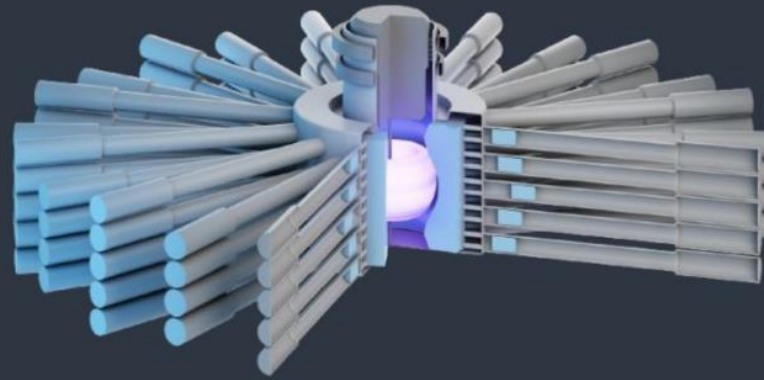
P = 16 MW

T = 30 s

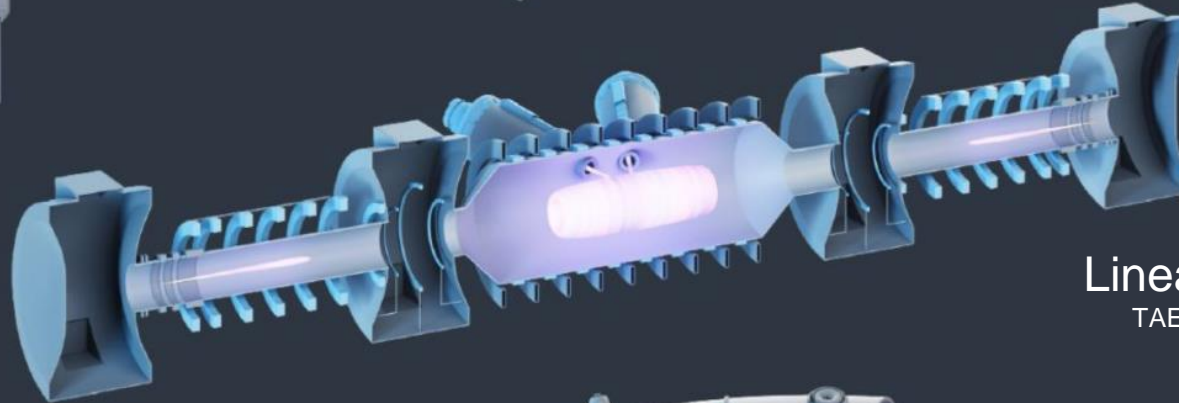
Tokamak
ITER, JET, JT60



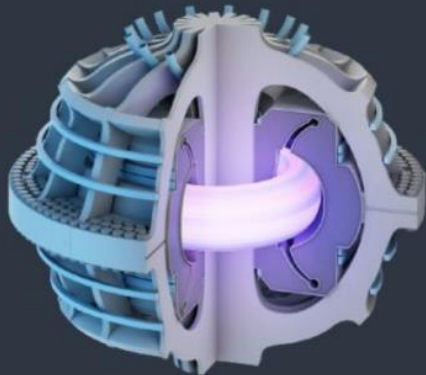
Magnetized Target Reactor
General Fusion



Linear Reactor
TAE Technologies



Mini-tokamak
Tokamak Energy, Commonwealth Fusion



Stellarator
W7X

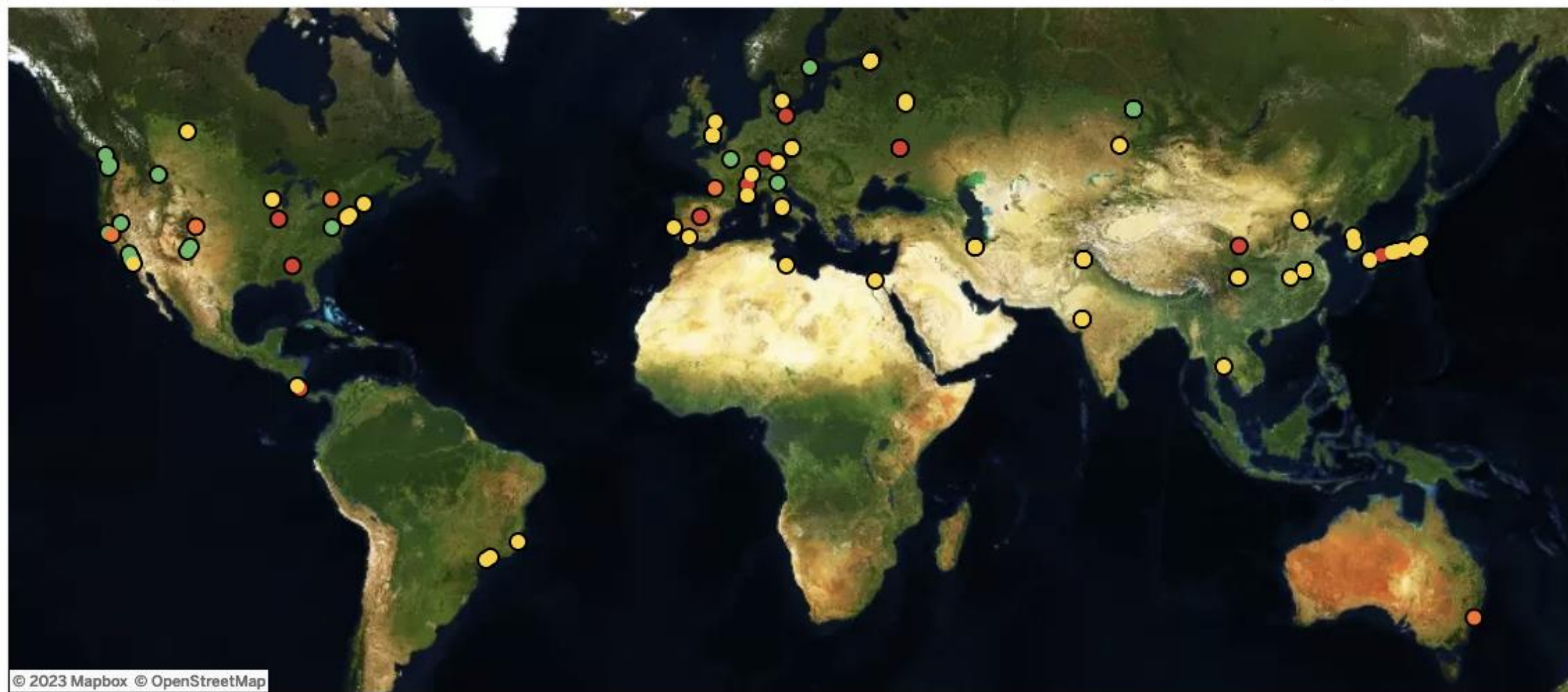


Fusion devices worldwide



Total	Tokamaks	Stellarators/Heliotro..	Laser/Inertial	Altern. Concepts	Exp	Demo
139	77	15	9	38	128	11

● Tokamaks
● Stellarators/Heliotrons
● Laser/Inertial
● Altern. Concepts



Country	Count
United States	33
Japan	25
Russia	13
China	11
United Kingdo..	8
France	5
Germany	4
Pakistan	4
Brazil	3
India	3
Iran	3
Italy	3
Republic of K..	3
Canada	2
Costa Rica	2
Czech Republic	2
Spain	2
Switzerland	2
Ukraine	2
Australia	1
Denmark	1
Egypt	1
European Uni..	1
Kazakhstan	1
Libya	1
Portugal	1
Sweden	1
Thailand	1

Operating	Under construction	Planned	Public	Private	Public-Private
96	13	30	109	29	1

© 2023 Mapbox © OpenStreetMap

Private Unternehmen - Fusions Start-ups

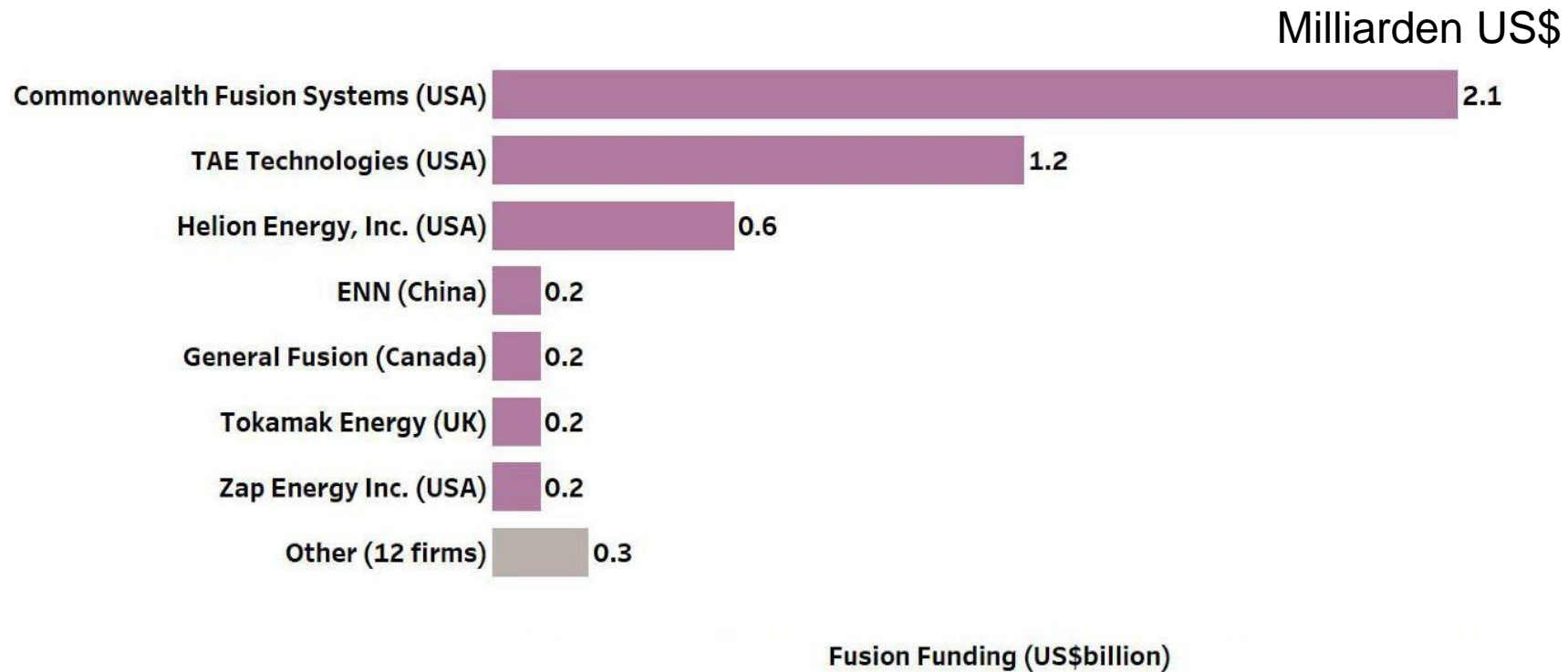
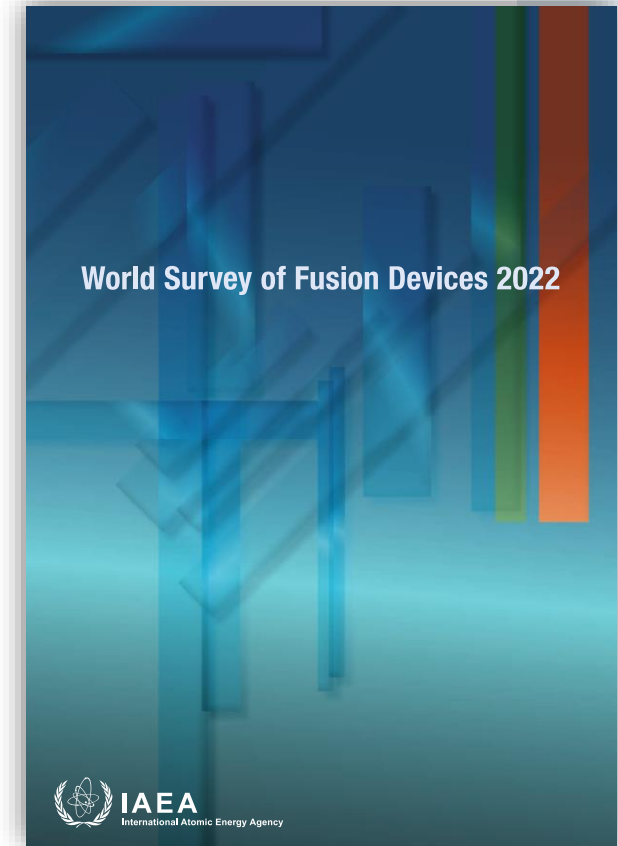


FIG.6. Private sector companies have disclosed around US\$5 billion in fusion funding (more than \$3 billion since June 2021). Readapted and updated from: *The chase for fusion energy*, Nature (2021); *The global fusion industry in 2022*, Fusion Industry Association (2022).





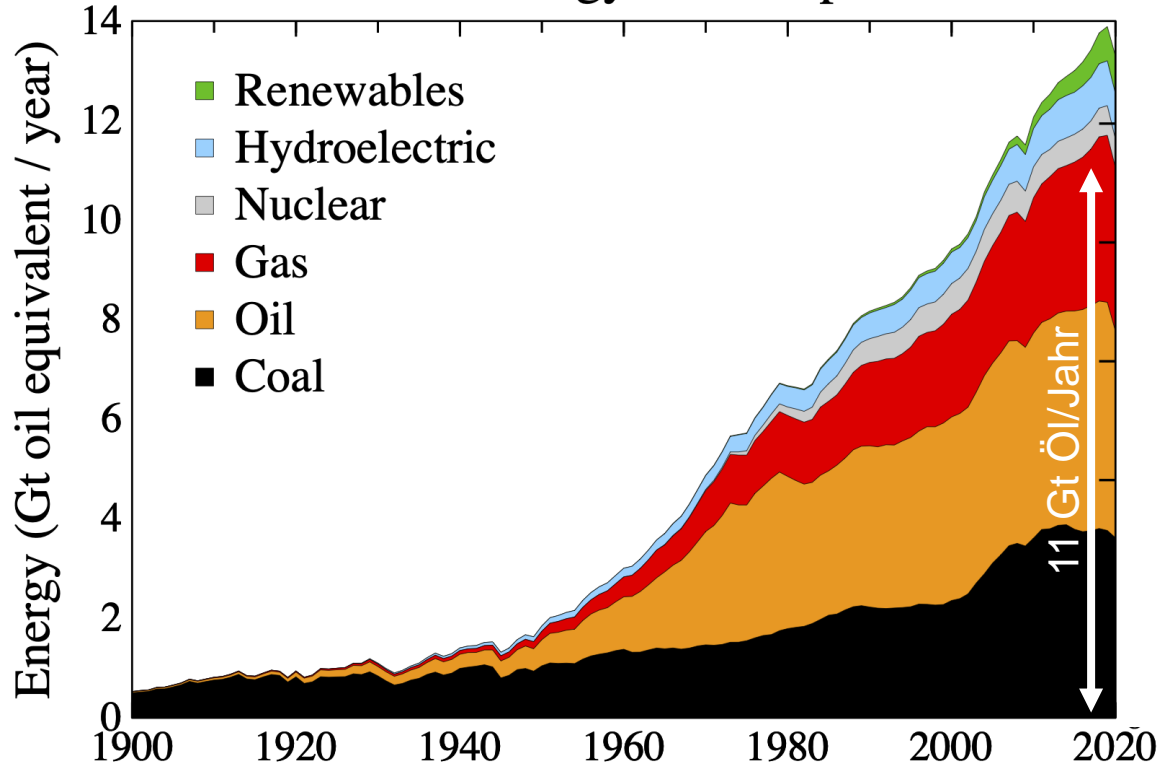
- ❖ War es bereits der große Durchbruch?
- ❖ Was ist besser: Die US-Trägkeitsfusion oder die EU-Magnetfusion?
- ❖ Warum ist Kernfusion um vieles besser als Kernspaltung?
- ❖ Welche Rolle spielt Österreich?
- ❖ Wann kommt die große Ära der Fusionskraftwerke?
- ❖ Brauchen wir dann Fusion überhaupt noch?



Was bedeutet Null-CO₂ bis 2050 für den weltweiten Energieverbrauch?

14 Gt oil = 160 000 TWh

Global Energy Consumption



**Finanziell: 10 Mrd. € pro Tag
das sind 4% des globalen BNP**

**Eine sehr grobe Schätzung:
11000 Tage bis 2054 und 11000 Mt Öl zu ersetzen**

**Das bedeutet, 1 Mio. t Öl pro Tag durch
kohlenstofffreie Energiequellen zu ersetzen!**

**Das entspricht einem großen Kernkraftwerk pro
Tag, ...**

**... oder der größte Offshore-Windpark der Welt pro
Tag, ...**

... Jeden Tag, für die nächsten 30 Jahre!



Druckwasserreaktor 1,3 GW_{el}



165 Windkraftanlagen á 8 MW = 1,3 GW

Weltweiter Energieverbrauch im Jahr 2100 ?

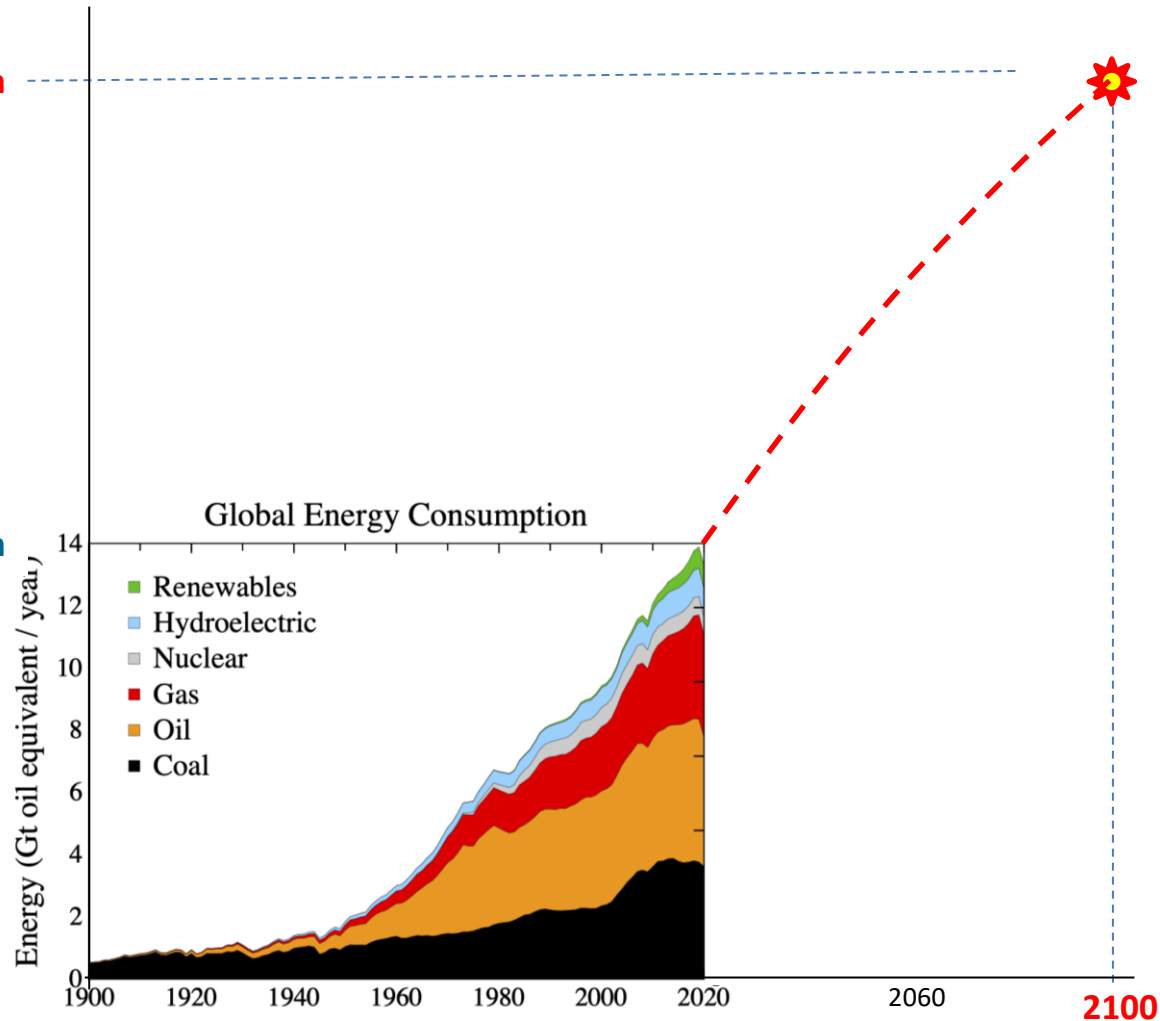
14 Gt oil = 160 000 TWh

Table 1.4 Power per capita by region (country) in 1990 and 2008

Region/Country	1990 power per capita (kW/person)	2008 power per capita (kW/person)
Europe	4.6	4.6
USA	10.2	9.9
China	1.0	2.1
Latin America	1.3	1.6
Africa	0.8	0.9
India	0.5	0.7
The world	2.2	2.4

385,000 TWh

160,000 TWh



4 kW/Person

11 Milliarden Menschen

1 Jahr = 8760 h

385 000 TWh/Jahr

2 bis 3 x so viel Energie wie heute !

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

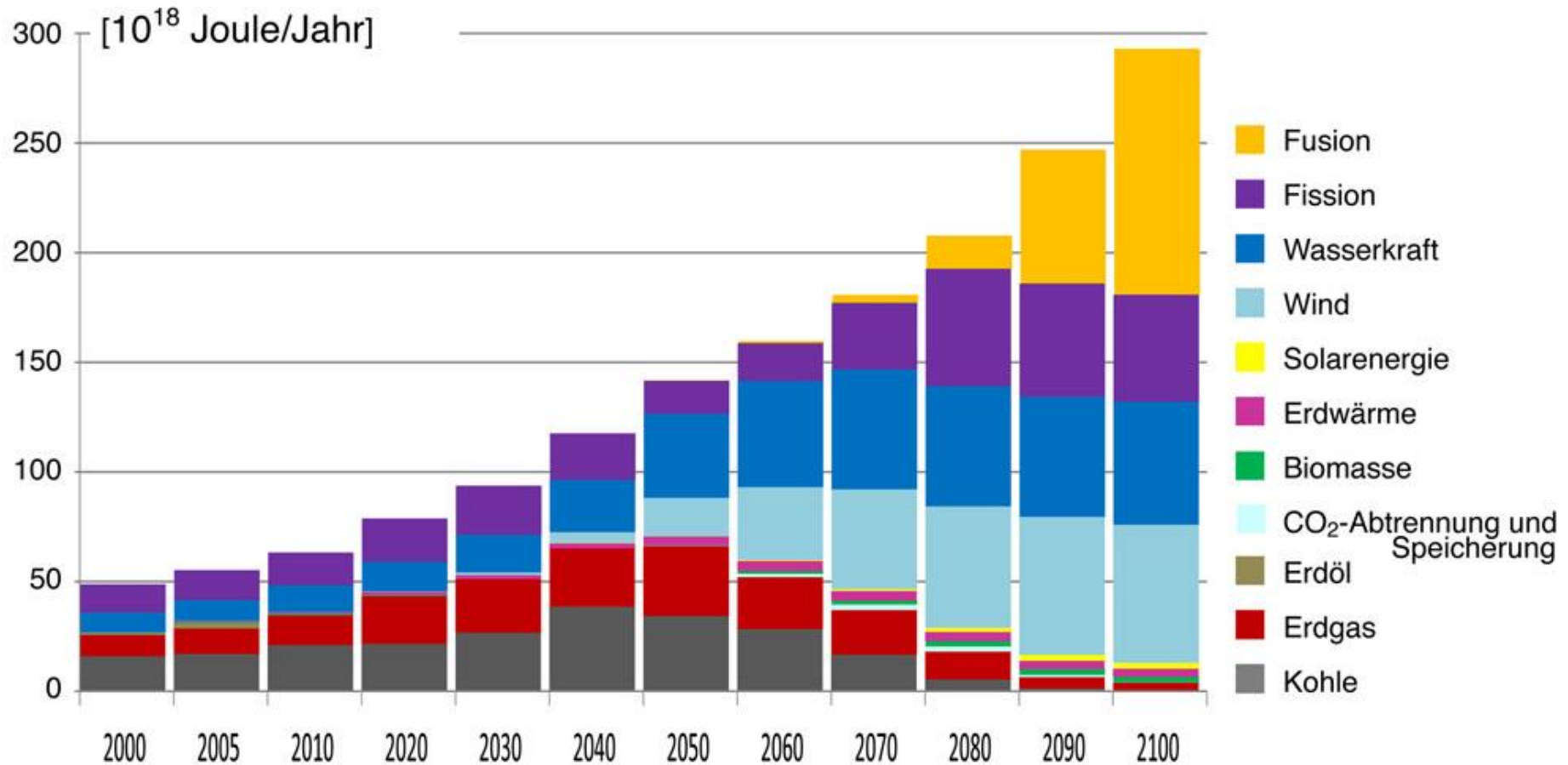


The possible future role of fusion energy



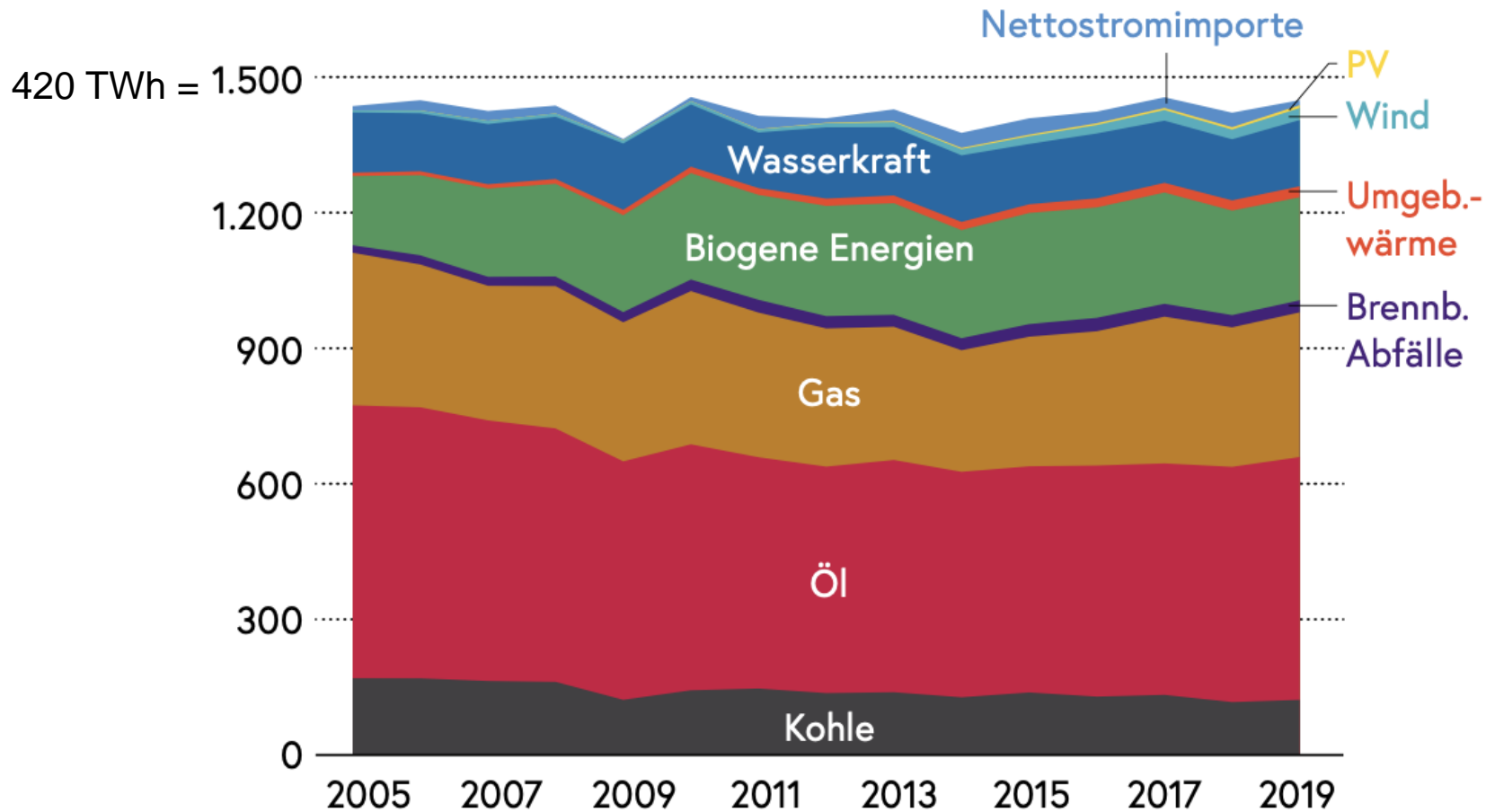
EFDA-TIMES
Model

Global: Jährliche Welt-Stromerzeugung
bei Beschränkung auf eine CO₂-Konzentration von 550 ppm



Energieverbrauch in Österreich

Bruttoinlandsverbrauch in Österreich
nach Energieträgern in Petajoule 2005–2019

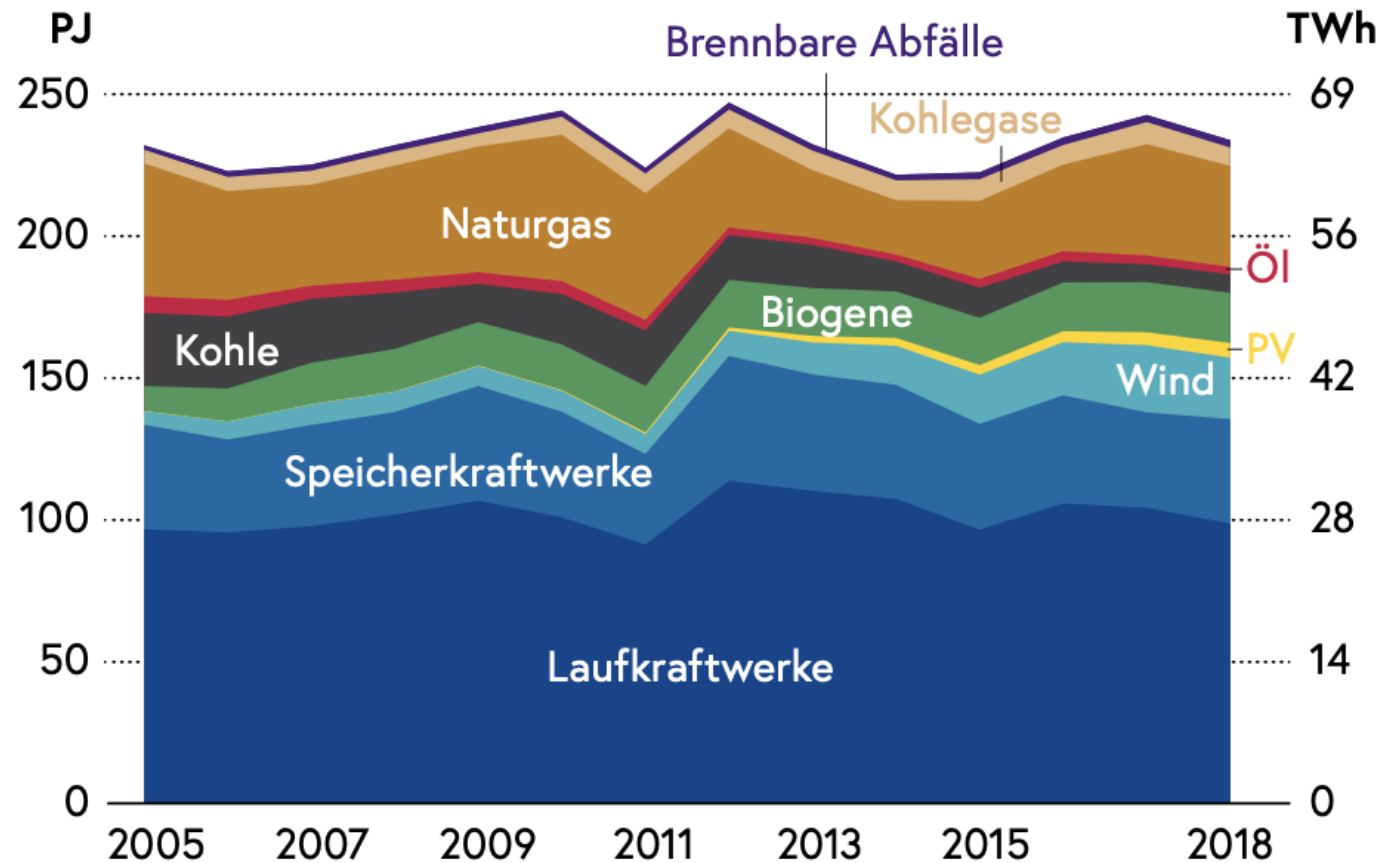


nur 21%
davon sind
elektrische
Energie!

Stromerzeugung in Österreich

Bruttostromerzeugung in Österreich

in PJ (linke Skala) und TWh (rechte Skala) 2005–2018*



75% davon
Anteil
erneuerbarer
Energie!