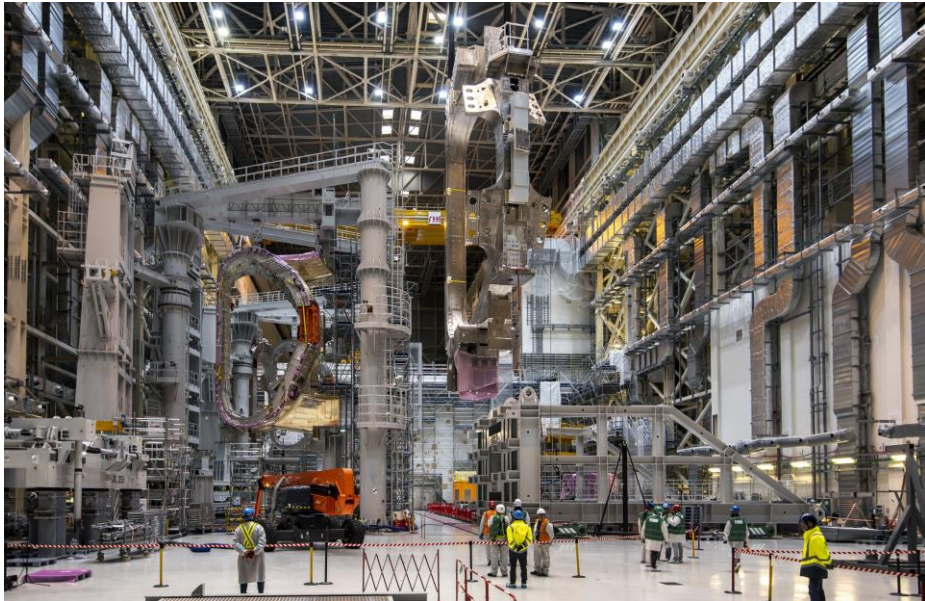
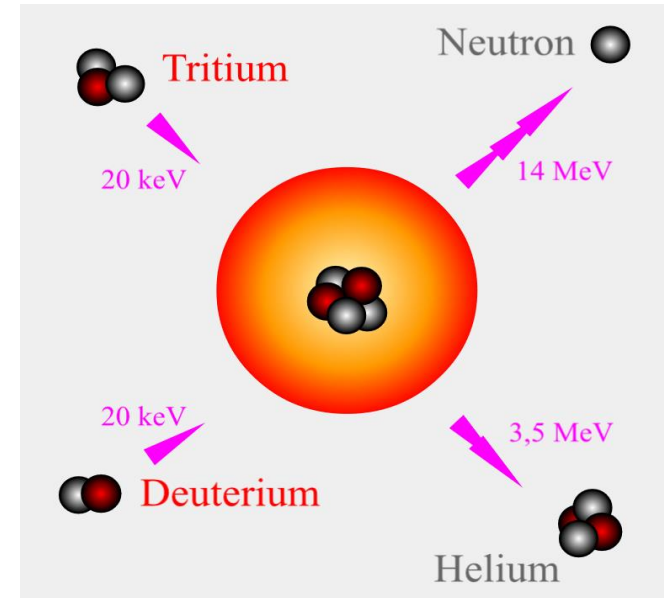


Ask the Expert: Kontrollierte Kernfusion - Physikalische Grundlagen und Entwicklungen auf dem Weg zur Energiequelle

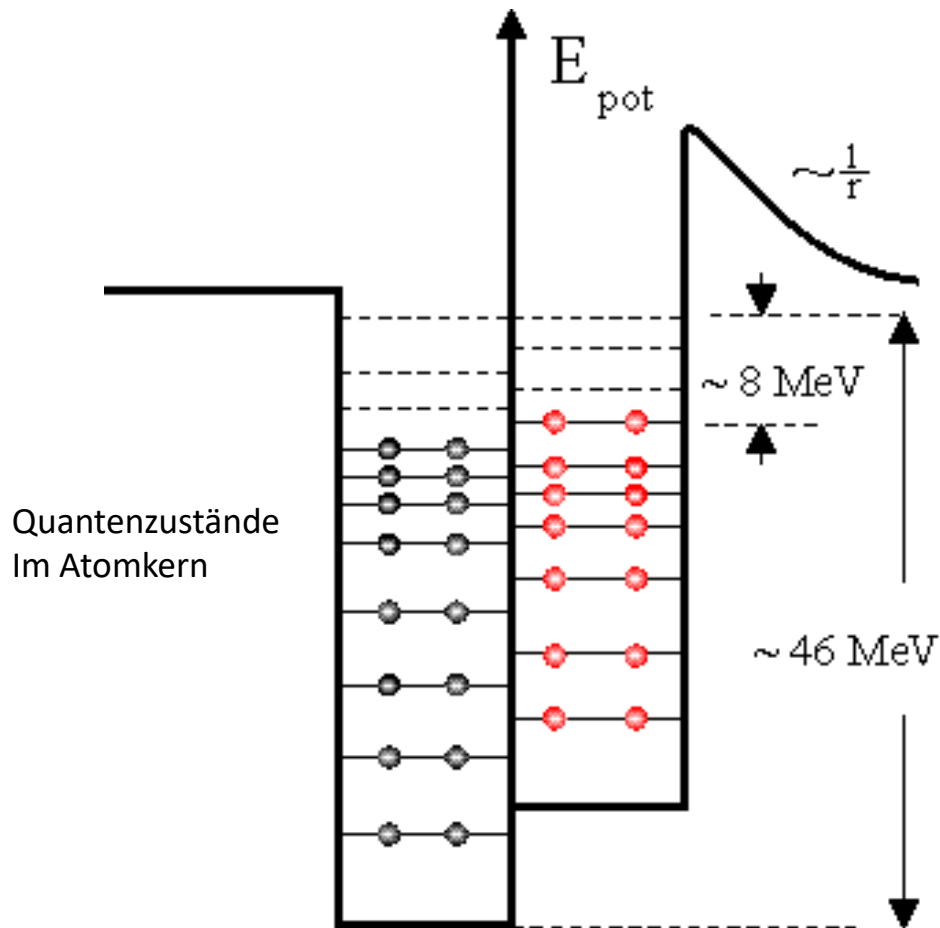


Arnd Junghans
a.junghans@hzdr.de



- Fusionsreaktionen: Kernenergie, thermonukleare Reaktionsrate im Plasma, Resonanzen
- Energiebilanz eines Fusionsreaktors: Lawson Kriterium, Zündung
- Aufbau des ITER Fusionsreaktors : Magnetischer Plasmaeinschluss, Plasma-Heizung
- Technologische Herausforderungen, Roadmap zum Fusionsreaktor

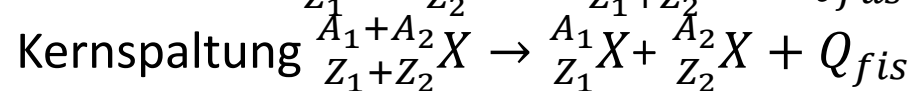
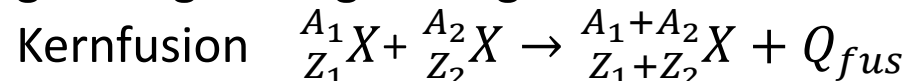
Wo kommt nun die Kernenergie her ?



<https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernmodelle/grundwissen/potentialtopfmodell-fermi-gas-modell>

Neutronen und Protonen sind in jedem Atomkern durch die Kernkraft gebunden
 Kernkraft ist viel stärker als die elektrische Abstoßung der Protonen (Coulombkraft)
 Die Bindungsenergie des Atomkerns ist die Summe der Bindungsenergien aller Neutronen und Protonen durch die Starke Wechselwirkung (Kernkraft)

Kernreaktionen wie Kernfusion oder Kernspaltung setzen gewaltige Energiemengen frei.



$$Q_{fus} = [m(A_1, Z_1) + m(A_2, Z_2)]c^2 - m(A_1 + A_2, Z_1 + Z_2)c^2$$

$$Q_{fis} = m(A_1 + A_2, Z_1 + Z_2)c^2 - [m(A_1, Z_1) + m(A_2, Z_2)]c^2$$

1 MeV = $1.602 \cdot 10^{-13}$ Joule

Protonenmasse = $938 \text{ MeV}/c^2$

Energiefreisetzung in Kernfusion und Kernspaltung

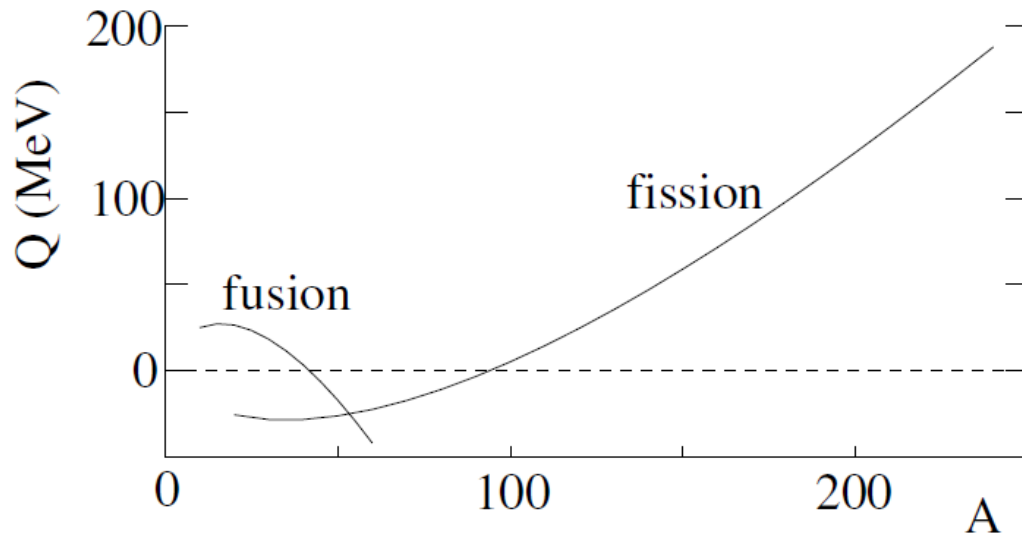
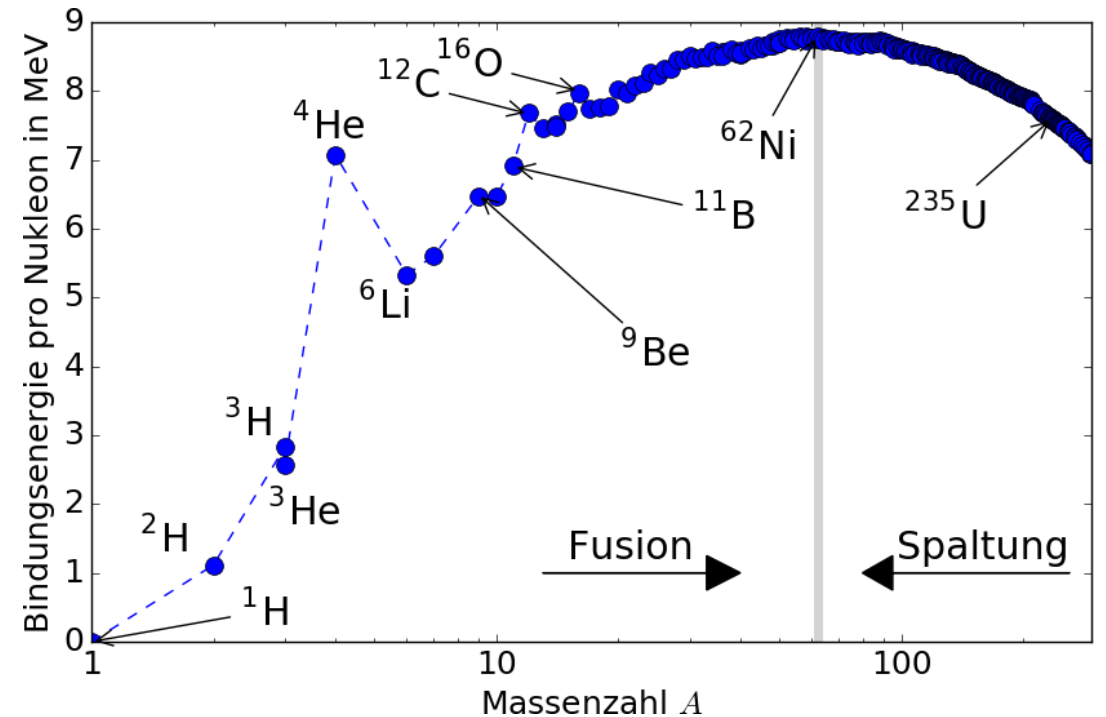


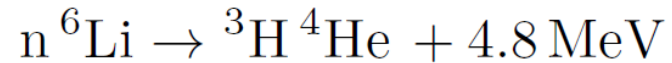
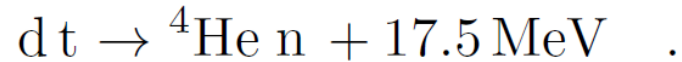
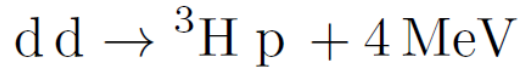
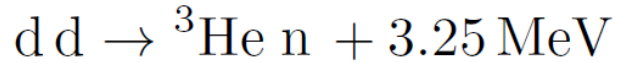
Fig. 6.1. The energy release in fission and self-fusion as predicted by the Bethe-Weizsäcker formula (2.13) for β -stable nuclei. Only nuclei with $40 < A < 95$ are stable against both fission and self-fusion. In this figure, $Q_{\text{fis}}(A, Z)$ is calculated for symmetric fission, $A_1 = A_2 = A/2$ and $Z_1 = Z_2 = Z/2$. $Q_{\text{fus}}(A, Z)$ is calculated for the production of a single nucleus of $A' = 2A$ and $Z' = 2Z$.

- Q-Wert ist positiv für Fusion leichter Kerne und Spaltung schwerer Kerne (exotherme Reaktionen)
- Die Energiefreisetzung ist millionenfach höher als bei chemischen Reaktionen → Kernenergie, Kernwaffen



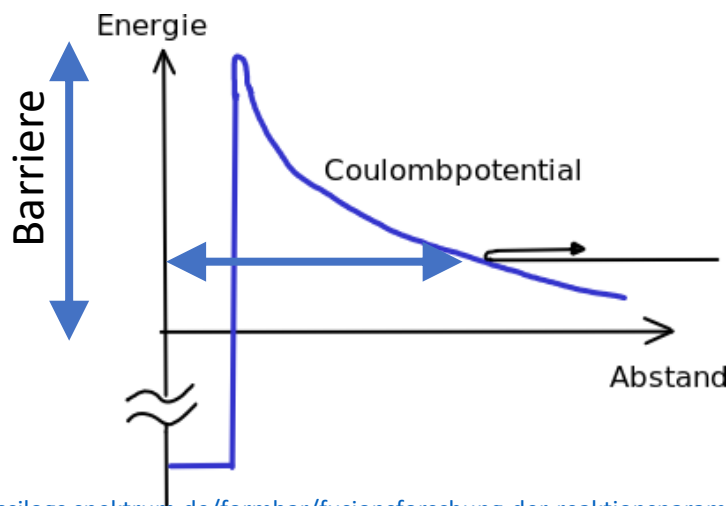
- Fusion von Wasserstoff ist die Stellare Energiequelle
- ^4He ist besonders stark gebunden.
- In der Sonne beginnt die Kernfusion mit:
 $p + p \rightarrow 2H + e^+ + \nu_e + 0.42 \text{ MeV}$ dabei wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt !
- Extrem geringer Reaktionswirkungsquerschnitt: 10^{-47} cm^2

Fusionsreaktionen zur Energiegewinnung



- Fusion von Deuterium und Tritium

- Fusion von Lithium oder Bor (ohne Neutronen)



Coulomb-Abstoßung geladener Teilchen

$$V(b) = E \rightarrow b = \frac{Z_1 Z_2 \alpha \hbar c}{E} = 143 \text{ fm } Z_1 Z_2 \frac{10 \text{ keV}}{E}$$

Wie kann eine Fusion stattfinden, wenn die Energie kleiner ist als die Coulomb-Barriere ?

Quantenmechanischer Tunneleffekt

Tunnelwahrscheinlichkeit P (Transmissionskoeffizient)

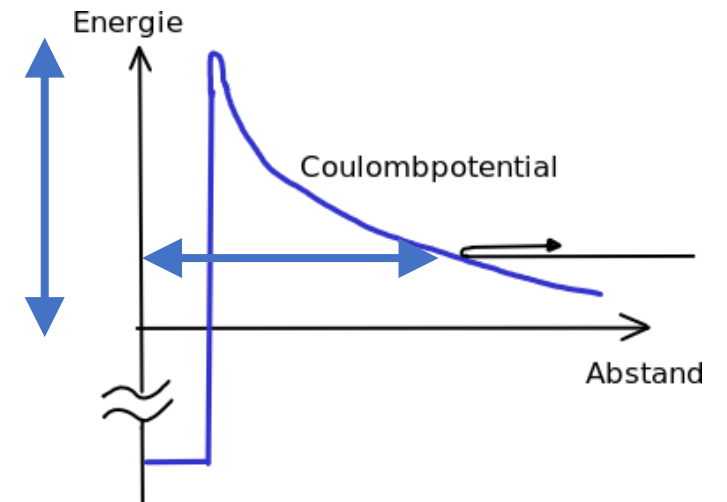
$$P \sim \exp \left[-2 \int_a^b \sqrt{\frac{2m(V(r) - E)}{\hbar^2}} dr \right]$$

$$P \sim \exp \left(\frac{-2\pi Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar v} \right) = \exp \left(\sqrt{-E_B/E} \right)$$

$$E_B = 2\pi^2 Z_1^2 Z_2^2 \alpha^2 \mu c^2 = 1052 \text{ keV} \times Z_1^2 Z_2^2 \frac{\mu c^2}{1 \text{ GeV}}$$

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp \left(-\sqrt{E_B/E} \right)$$

Astrophysikalischer S-Faktor $S(E)$ beschreibt die nukleare Reaktionswahrscheinlichkeit (ohne Tunneleffekt)



- Der Druck und die Temperatur in Sternen (Gravitation) ist nicht ausreichend um die Coulomb-Barriere zu überwinden. z.B. im Zentrum der Sonne: $T=14 \cdot 10^6 \text{ K}$, $E \approx 1 \text{ keV}$
- Minimaler Abstand der Atomkerne im Plasma bei Kollisionen ist grösser als die Reichweite der anziehenden Kernkraft
- Kernfusion ist gemäß der klassischen Physik aufgrund zu geringer Energie nicht möglich.
- Durch den Tunneleffekt finden **in Sternen thermonukleare Reaktionen** statt.

George Gamow: *Zur Quantentheorie des Atomkernes*. In: *Zeitschrift für Physik*. 51, 1928, S. 204.

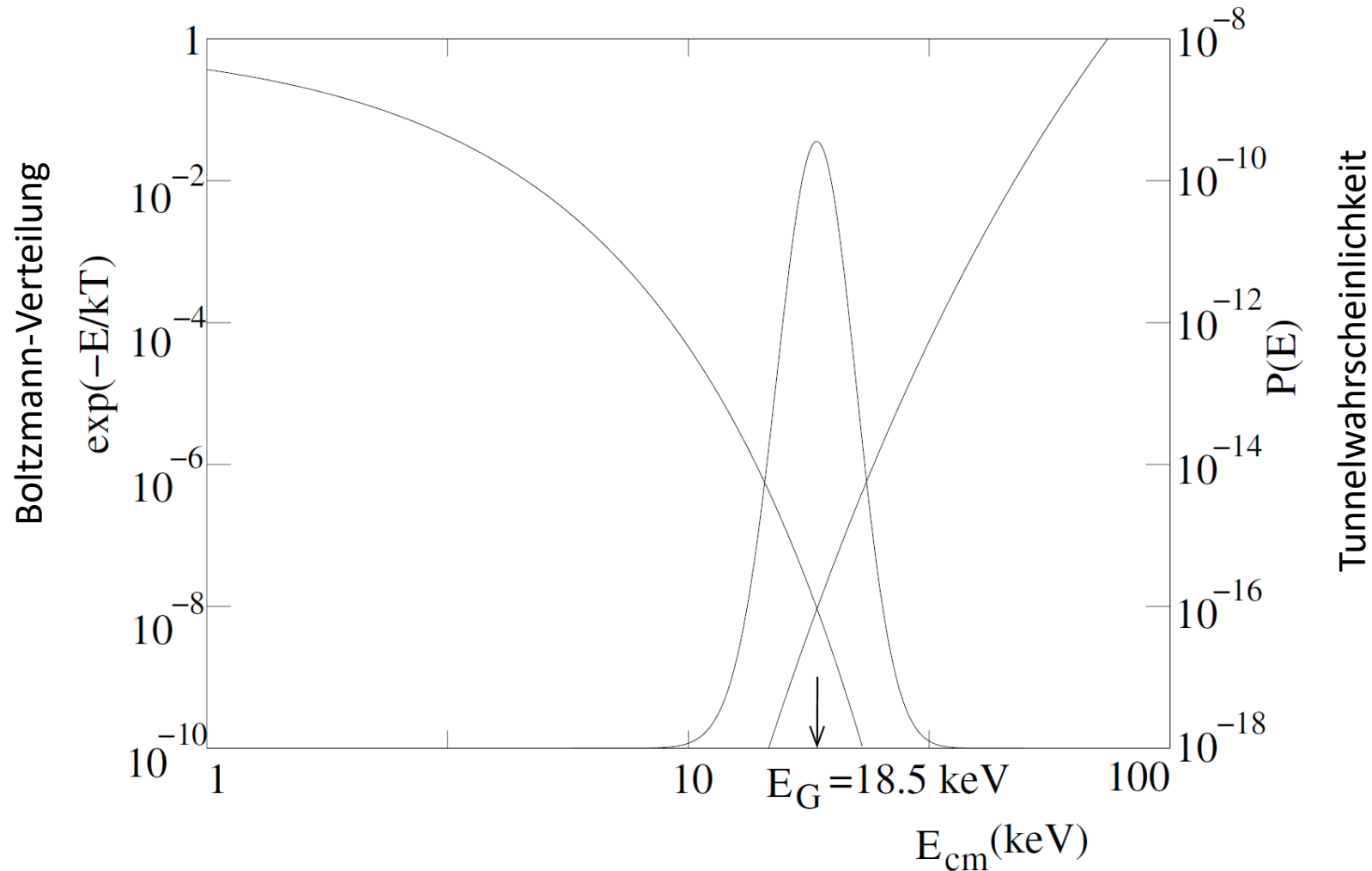
Thermonukleare Reaktionsraten

- Fusionsreaktor D-T Fusion Deuterium ${}^2\text{H}$ + Tritium ${}^3\text{H}$
- Reaktionsrate λ von Deuterium mit Tritium (Anzahldichte n_2)
Relativgeschwindigkeit zum Tritium v und $\sigma(v)$ Fusionwirkungsquerschnitt
$$\lambda = n_2 \sigma(v) v$$
- Reaktionsrate pro Volumeneinheit $R = n_1 n_2 \sigma(v) v$
- Ionen im Plasma haben thermische Energieverteilung
(Maxwell-Boltzmann Verteilung $\sim e^{-E/kT}$)
- Gemittelte Fusionsrate
$$R = n_1 n_2 \langle \sigma(v) v \rangle$$

$$\langle \sigma v \rangle = \sqrt{\frac{8}{\pi \mu (kT)^3}} \int e^{-\sqrt{E_B/E}} e^{-E/kT} S(E) dE$$

Tunnelwahrscheinlichkeit Maxwell-Boltzmann-Verteilung S-Faktor
(nukleare Reaktionswahrscheinlichkeit)

Die gemittelte Reaktionsrate $\langle \sigma(v)v \rangle$



$$E_G = E_B^{1/3} (kT/2)^{2/3}$$

Boltzmann-Konstante

$$k = 86.17 \frac{\text{eV}}{\text{MK}}$$

Die thermonukleare Reaktionen finden nur in einem schmalen Energiebereich statt.

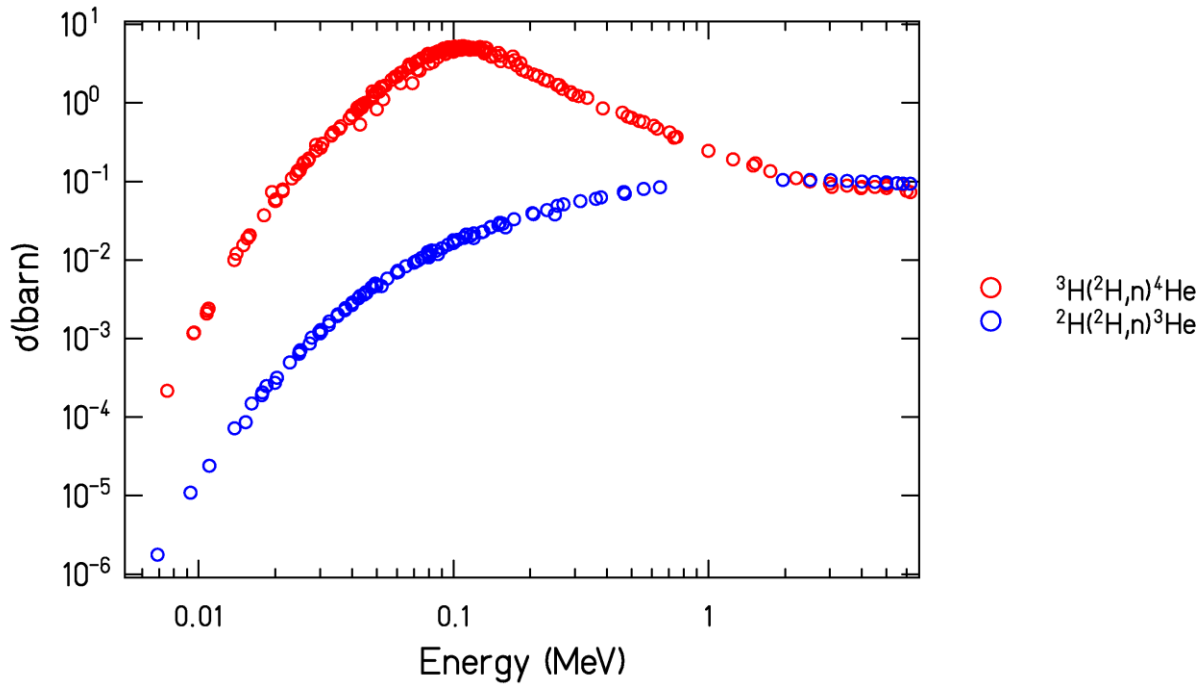
➔ Gamow-Fenster

Vergleich von Fusionsreaktionen

Table 7.1. Some fusion reactions. The first three are used in terrestrial fusion reactors. The last three make up the “PPI” cycle responsible for most of the energy generation in the Sun. Note the tiny $S(E)$ for the weak-reaction $pp \rightarrow de^+ \nu_e$. It can only be calculated using weak-interaction theory.

reaction	Q (MeV)	$S(10 \text{ keV})$ (keV b)	E_B (keV)	kT =1 keV $E_G(1 \text{ keV})$ (keV)	kT =20 keV $E_G(20 \text{ keV})$ (keV)		
$dd \rightarrow n \text{ } ^3\text{He}$	3.25	58.3	987.	5.1	37.5	}	Fusionsreaktoren
$dd \rightarrow p \text{ } ^3\text{H}$	4.	57.3	987.	5.1	37.5		
$dt \rightarrow n \text{ } ^4\text{He}$	17.5	14000.	1185	6.8	50.1		
$pp \rightarrow de^+ \nu_e$	1.442	3.8×10^{-22}	526	5.1	37.5	}	Solare Reaktionen Hier nur PP I Kette
$pd \rightarrow \text{}^3\text{He} \gamma$	5.493	2.5×10^{-4}	701	5.6	41.2		
$2 \text{}^3\text{He} \rightarrow pp \text{}^4\text{He}$	12.859	5×10^3	25200.	18.5	136		

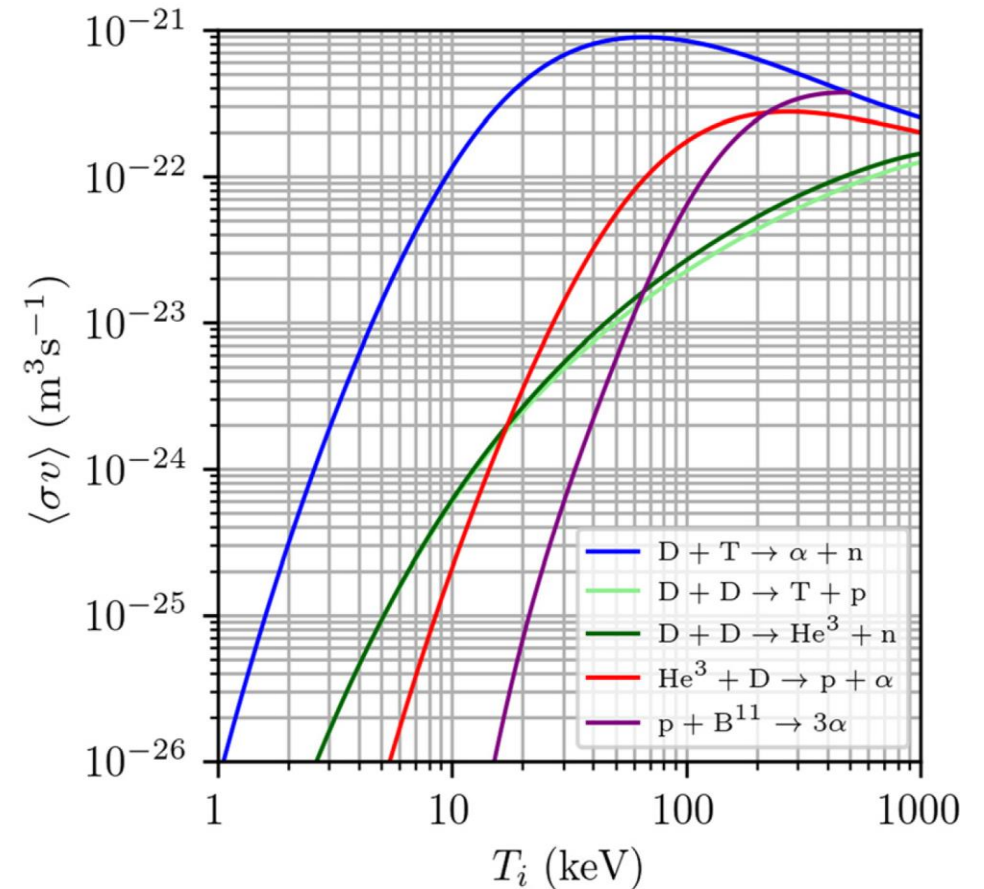
Fusionswirkungsquerschnitt und Fusionsraten



Gemessene Wirkungsquerschnitte aus der Kerndatenbank EXFOR:

D-T Wirkungsquerschnitt ist ca. 250 mal grösser als D-D bei $E = 100$ keV

${}^3\text{H}(d,n){}^4\text{He}$ Resonanzüberhöhung in ${}^5\text{He}$ bei $E_d = 107$ keV (64 keV E_{cm})

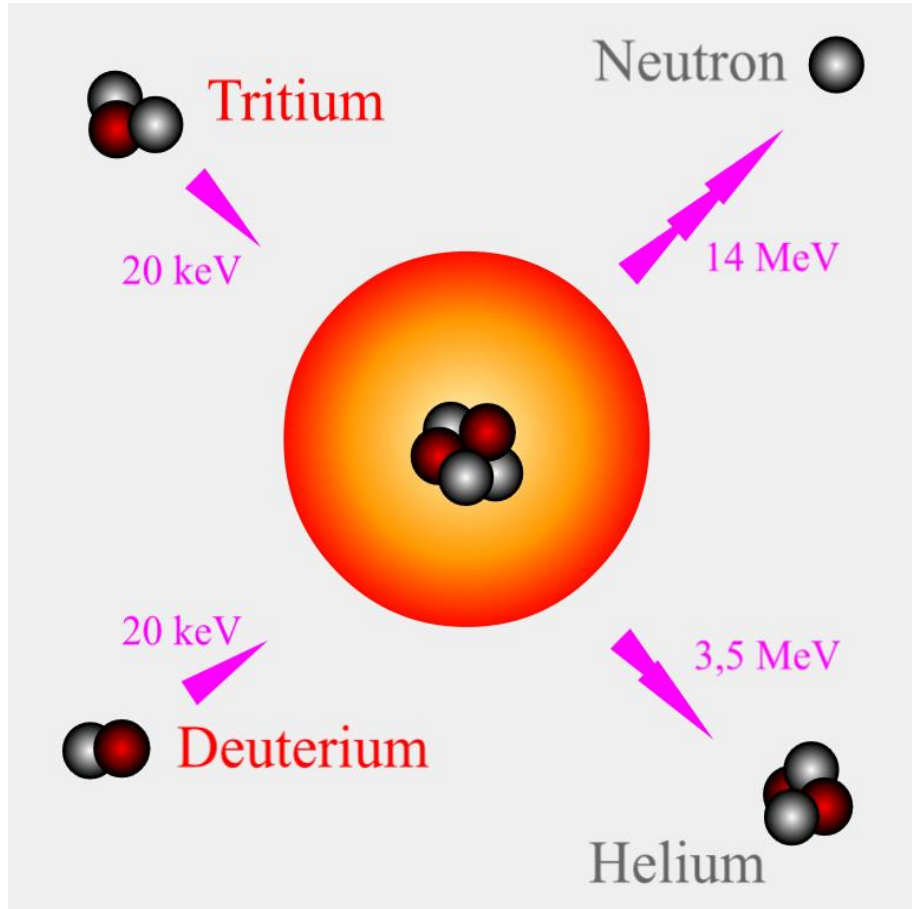


D-T Fusion hat die höchste Reaktionsrate bei den niedrigsten Plasmatemperaturen.

➔ Fusionsreaktor mit DT Fusion

Temperaturen mit $kT = 10\text{-}20$ keV oder höher

Energiefreisetzung bei der D-T Fusion



- Erzeugung eines heißen Plasmas (thermische Energie ca. 10-20 keV)
- Zündung der Kernfusion
- Freisetzung von Neutronen und Heliumkernen mit hoher Energie
- Energie der Heliumkerne heizt das Plasma
- Neutronen (ca. 14 MeV) werden freigesetzt
- Die Energie der Neutronen muss zur Stromerzeugung verwendet werden.

Energiebilanz (Lawson Kriterium)

Lawson Kriterium:

Energie aus der Fusion entspricht den Verlusten bzw. der extern zugeführten Heizenergie.

Plasmaeinschlusszeit im Fusionsreaktor τ

Plasmaenergiedichte bei Temperatur T und Teilchendichte ($n_1 = n_2 = \frac{n}{2}$): $3nkT$

Elektrische Energiefreisetzung mit Wirkungsgrad η :

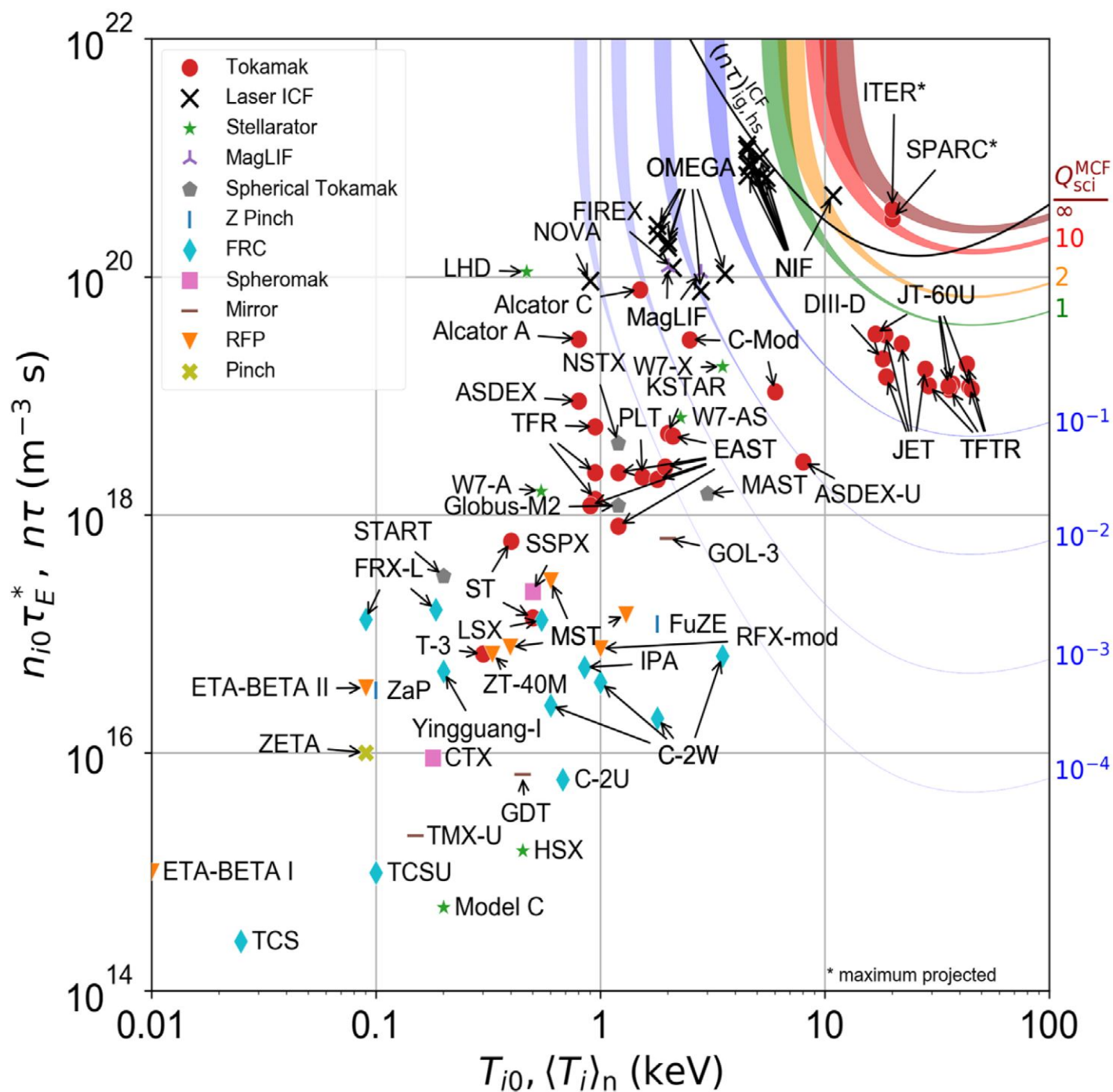
$$\frac{n^2}{4\eta} \langle \sigma v \rangle Q \tau$$

Plasma-Zündung: $3nkT < \frac{n^2}{4\eta} \langle \sigma v \rangle Q \tau$

Lawson Kriterium: $n\tau > \left(\frac{1}{\eta}\right) 12kT/Q\langle\sigma v\rangle$

Beispiel: DT Fusion $\langle\sigma v\rangle(d(t,n)^4\text{He}) = 10^{-22} \text{ m}^3\text{s}^{-1} \left(\frac{kT}{10 \text{ keV}}\right)^2$

$$n\tau \frac{kT}{10 \text{ keV}} > \eta^{-1} 1.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$$



Fortschritte der Fusionsforschung
Gemessen am Lawson Kriterium

Angestrebte Parameter für ITER:

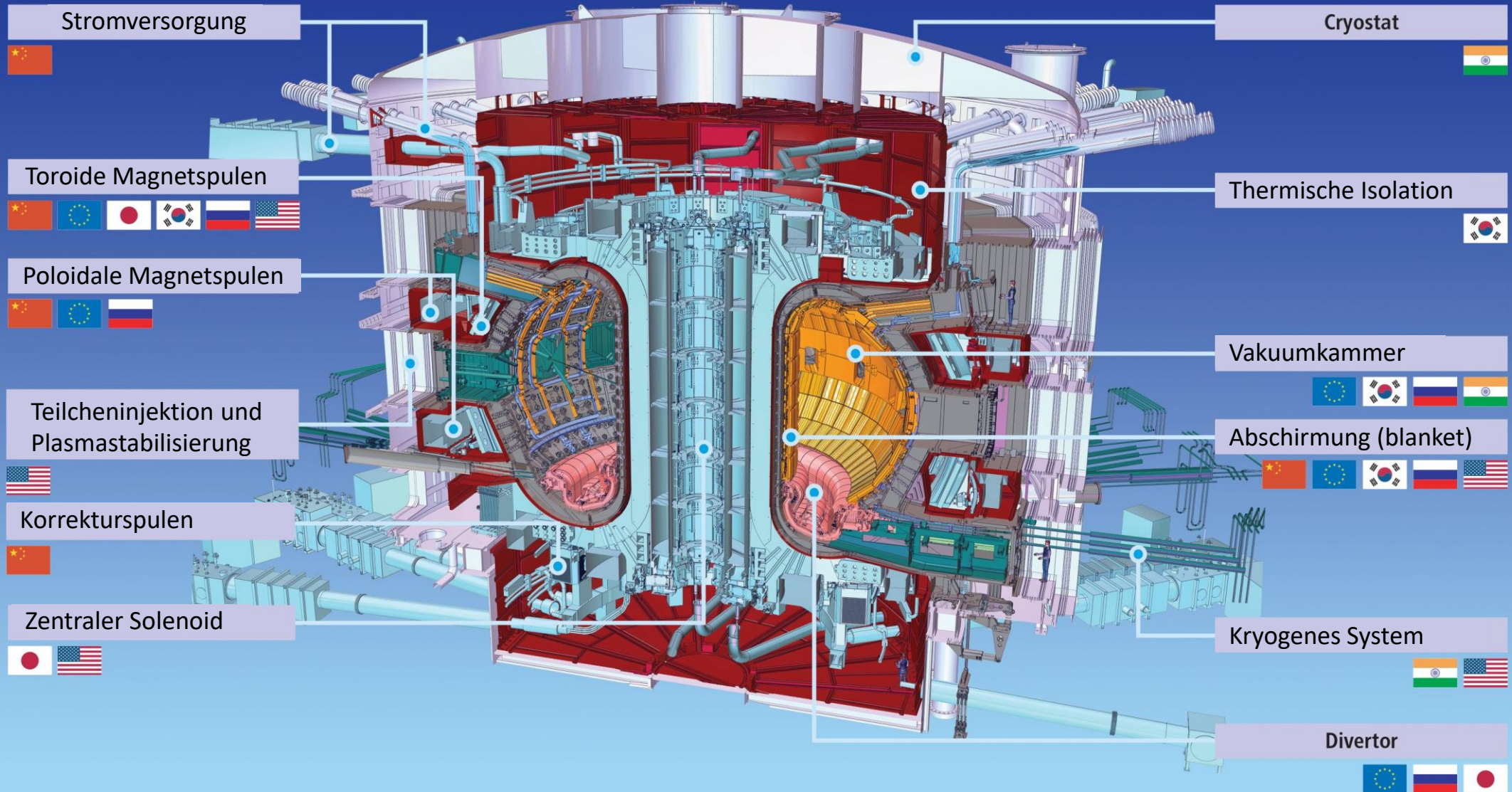
$$T_{i,0} = 20 \text{ keV}, n_{i0} = 1 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}, \tau_E^* = 3.7 \text{ s}$$

Plasmavolumen:	840 m ³
Torus: Radius	6 m
Plasmaenergie:	500 MJ
Supraleitende Magnete (T=4 K):	51 GJ
Blanket (Abschirmung)	736 MW
Divertor	20 MW/m ²

Elemente eines Fusionsreaktors

- Eingeschlossenes Plasma (^2H und ^3H positive Ionen und Elektronen) durch geeignete, starke Magnetfelder als Tokamak oder Stellarator.
(Alternative: Inertialfusion mit Höchstleistungs-Laserpulsen)
- Energie-Injektor (Heizung) um das Plasma zu erzeugen und auf hohe Temperatur zu bringen, bis Kernfusion einsetzt.
(Stromfluss, Neutrale Atomstrahlen, Mikrowellen)
- Anlage zur Stromerzeugung aus der Energie der freigesetzten Neutronen (modulare Abschirmplatten („blanket“) absorbieren die Neutronen + Wärmetauscher)

ITER TOKAMAK ELEMENTE

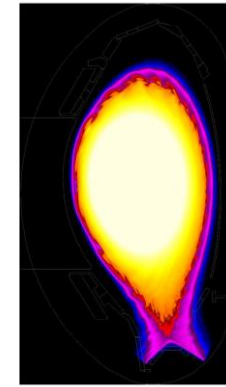


Hauptziele des ITER Fusionsreaktors

- DT Plasma mit Heizung durch die Fusionsreaktionen (^4He Rückstoßkerne)
- Fusionsleistung 500 MW mit 50 MW externer Heizung für ca. 15 min
- Entwicklung von Fusionskraftwerkstechnologie
- Test zum Brüten von Tritium ($^6\text{Li}(n, ^4\text{He})^3\text{H}$) Modular Test Blanket

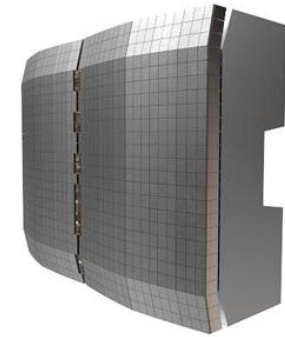
Technische Herausforderungen

- Stabilität des Plasmaeinschlusses im H-Mode.
Instabilitäten durch wiederholte „edge localised modes“ (ELM)
→ Plasmaverlust, z.B. thermische Belastung des Divertor
- Blanket-Werkstoffe die hohe Flüsse von 14 MeV Neutronen aushalten und Wärme ableiten für Kraftwerksbetrieb
- Tritiumproduktion: ${}^3\text{H}$, $T_{1/2}=12.32$ a muss im Blanket erzeugt werden.
Bisher aus Bestrahlung in Kernreaktoren (CANDU)
ITER benötigt 100 g – 1000 g Tritium pro Jahr
Weltproduktion von Tritium ist ca. 500 g pro Jahr
Weltinventar ca. 25-30 kg

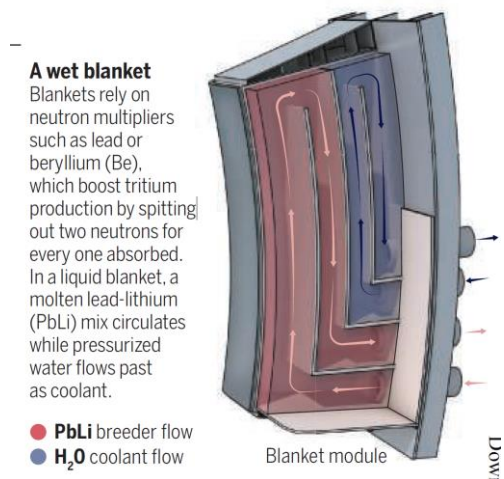


[IPP, PI 05/2022](#)

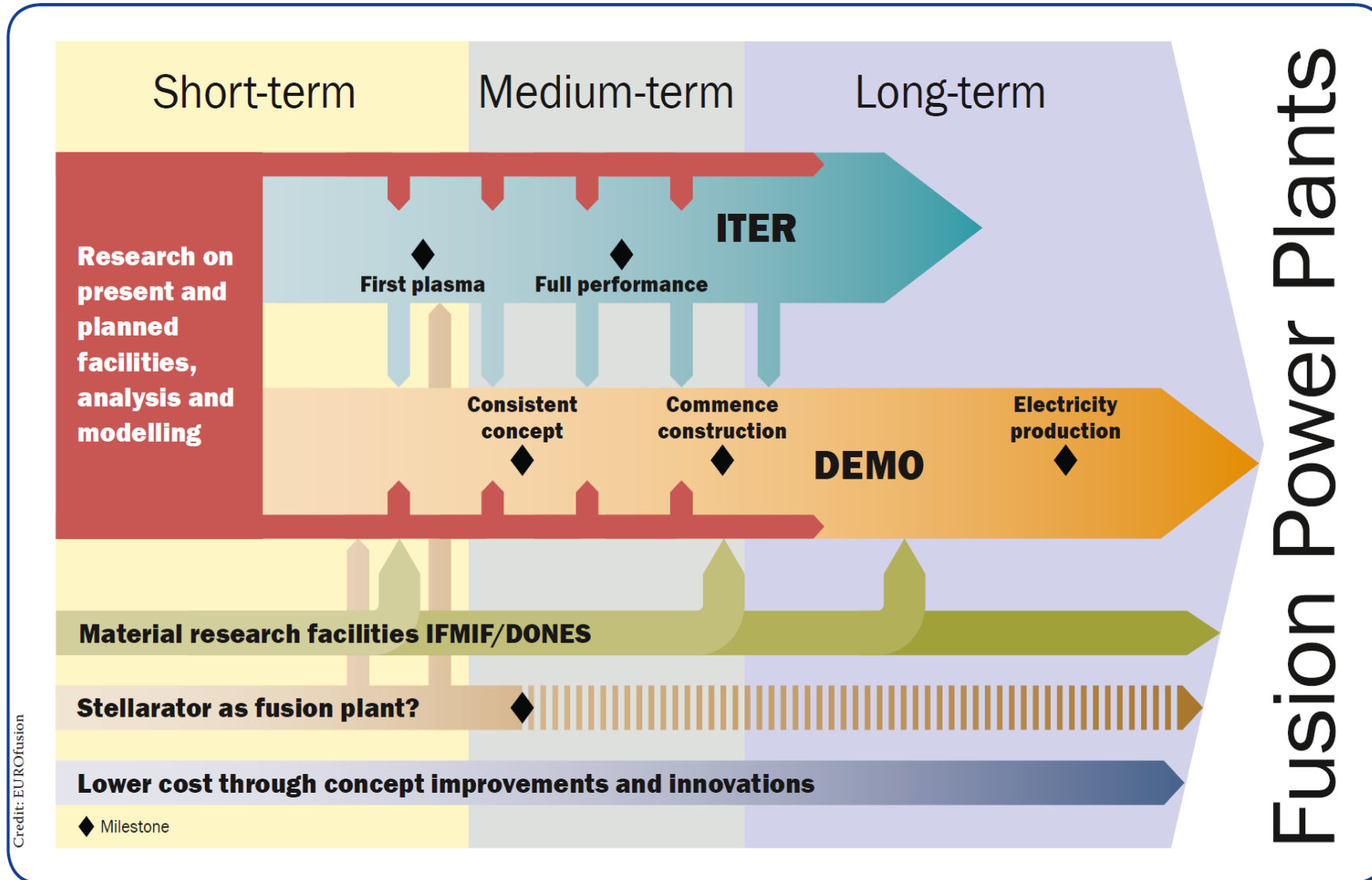
A. Cathey,
Nucl. Fusion 60 (2020)
124007



https://static.iter.org/all/keyshot/models/blanket/0_0.jpg



Forschungsplan der Kernfusion als Energiequelle



Entwicklung zum Fusionskraftwerk

Tore
Supra



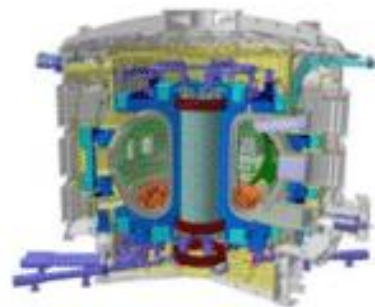
$D = 4.8 \text{ m}$
 $V = 25 \text{ m}^3$
 $Q \approx 0$
 $P \approx 0 \text{ MW}_{\text{th}}$

JET



$D = 5.92 \text{ m}$
 $V = 80 \text{ m}^3$
 $Q \approx 0.6$
 $P \approx 16 \text{ MW}_{\text{th}}$

ITER



$D = 12.4 \text{ m}$
 $V = 800 \text{ m}^3$
 $Q \approx 10$
 $P \approx 500 \text{ MW}_{\text{th}}$

DEMO



$D \approx 13\text{--}19 \text{ m}$
 $V \approx 1000\text{--}3500 \text{ m}^3$
 $Q \approx 25$
 $P \approx 2000\text{--}4000 \text{ MW}_{\text{th}}$

- Druckwasserreaktor $Q \approx 100$; PV (Deutschland) $Q \approx 5 - 10$

Referenzen

- J.L. Basdevant, J. Rich, M. Spiro,
[Fundamentals in Nuclear Physics, Springer, New York, 2005](#)
- ITER website www.iter.org (Sehr gute Vorträge (english) als Video)
- Max Planck Institut für Plasmaphysik
Exzellente kurze Einführungen zu den Grundlagen
([Energiequelle Fusion](#))

