ITER und DEMO

Seminar ”Plasmaphysik und Fusionsforschung”

Christoph Wersal – 26.07.2011

Gliederung

1) Fusionskraftwerke

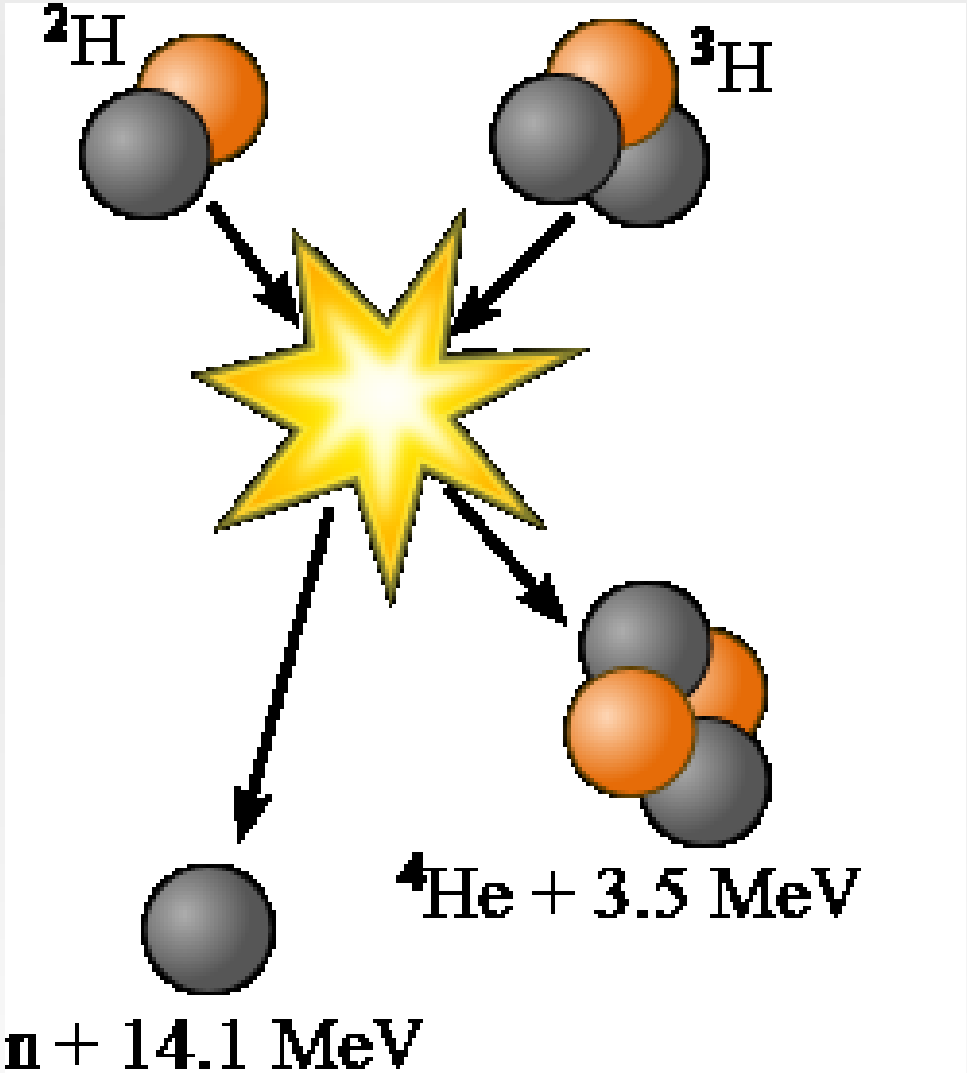
2) ITER

3) DEMO

4) Sicherheits- und Umweltaspekte

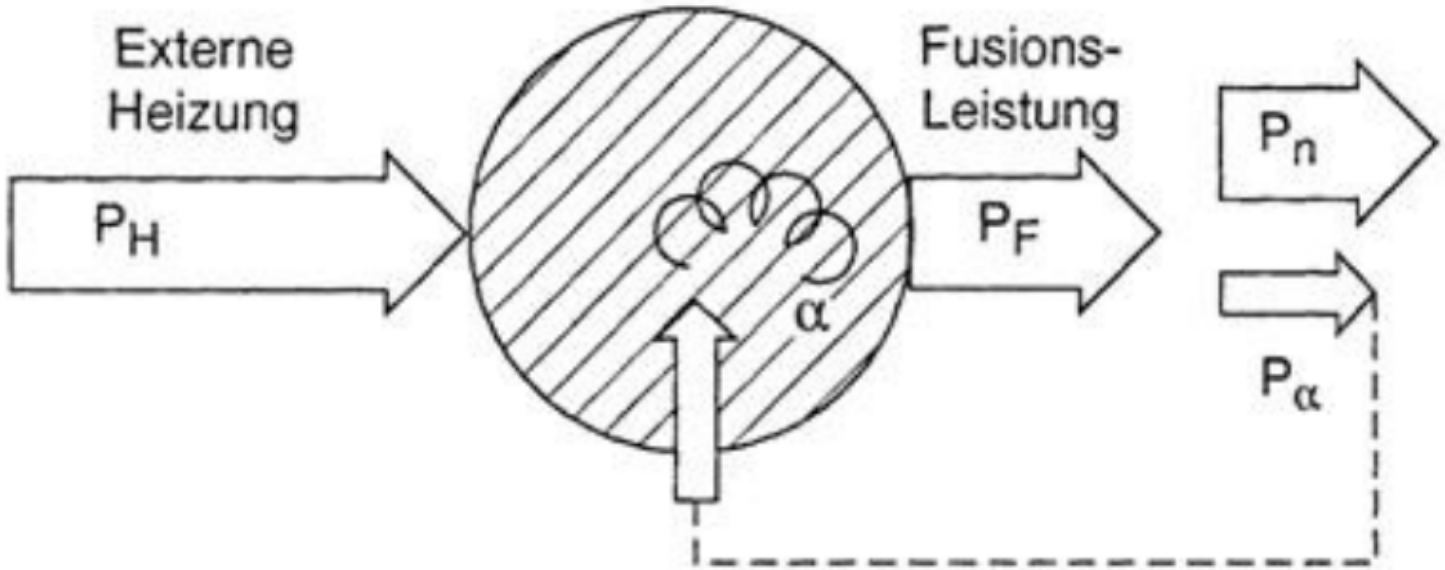
Fusionskraftwerke

D-T Fusion



[6]

Leistungsverstärkung Q



$$Q = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{Externe Heizleistung}} = \frac{P_F}{P_H} = \frac{5P_\alpha}{P_H}$$

[5]

JET Q= 0,65 ITER Q= 10 DEMO Q= 30

Lawson-Kriterium

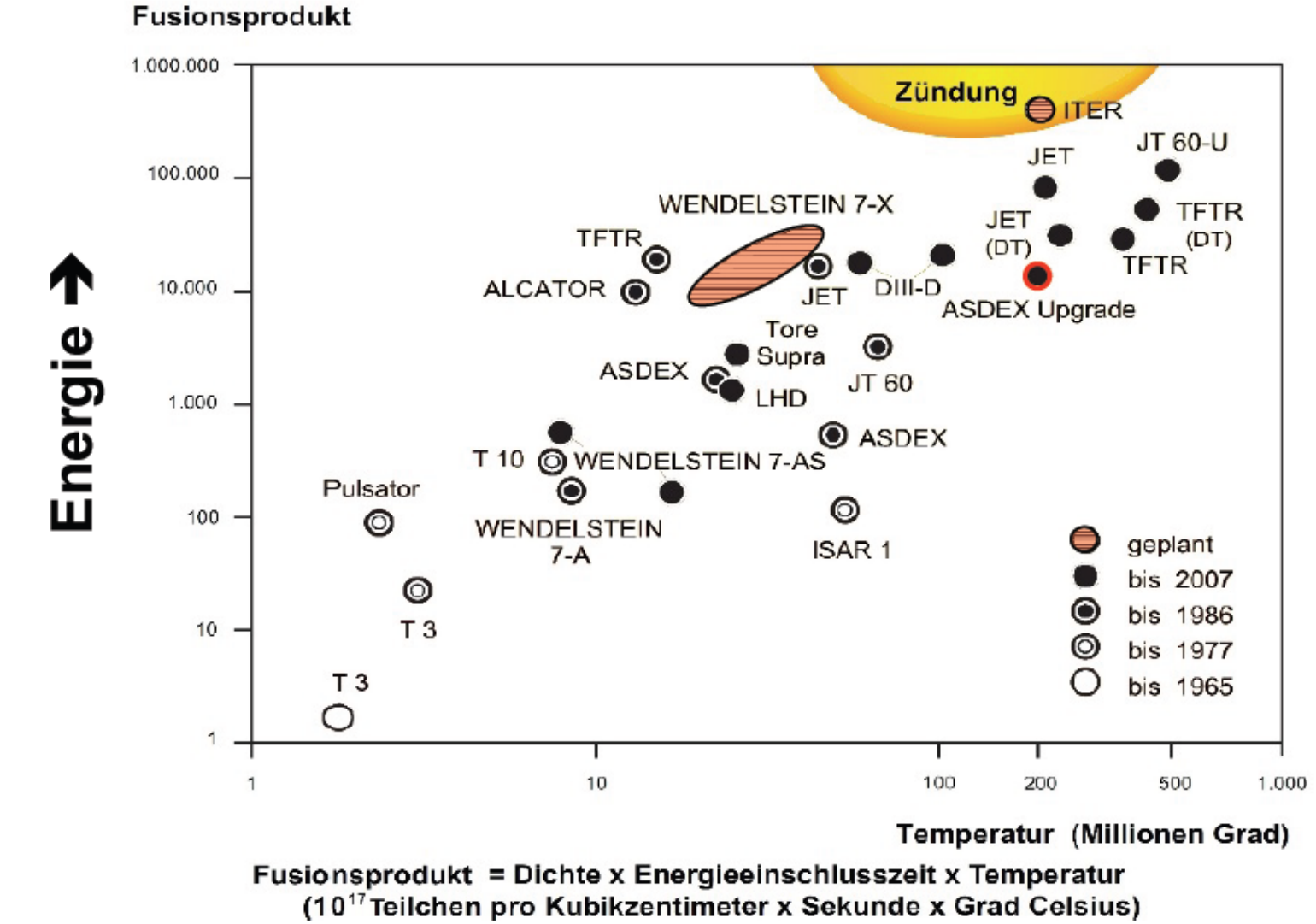
$$P_{f,\alpha} = n_1 n_2 < v\sigma > \epsilon V \geq \frac{3 n_e k_B T V}{\tau_E} = P_v$$

$$n_e \tau_E \geq \frac{12 k T}{< v\sigma > \epsilon}$$

→ Fusionsprodukt D-T Fusion

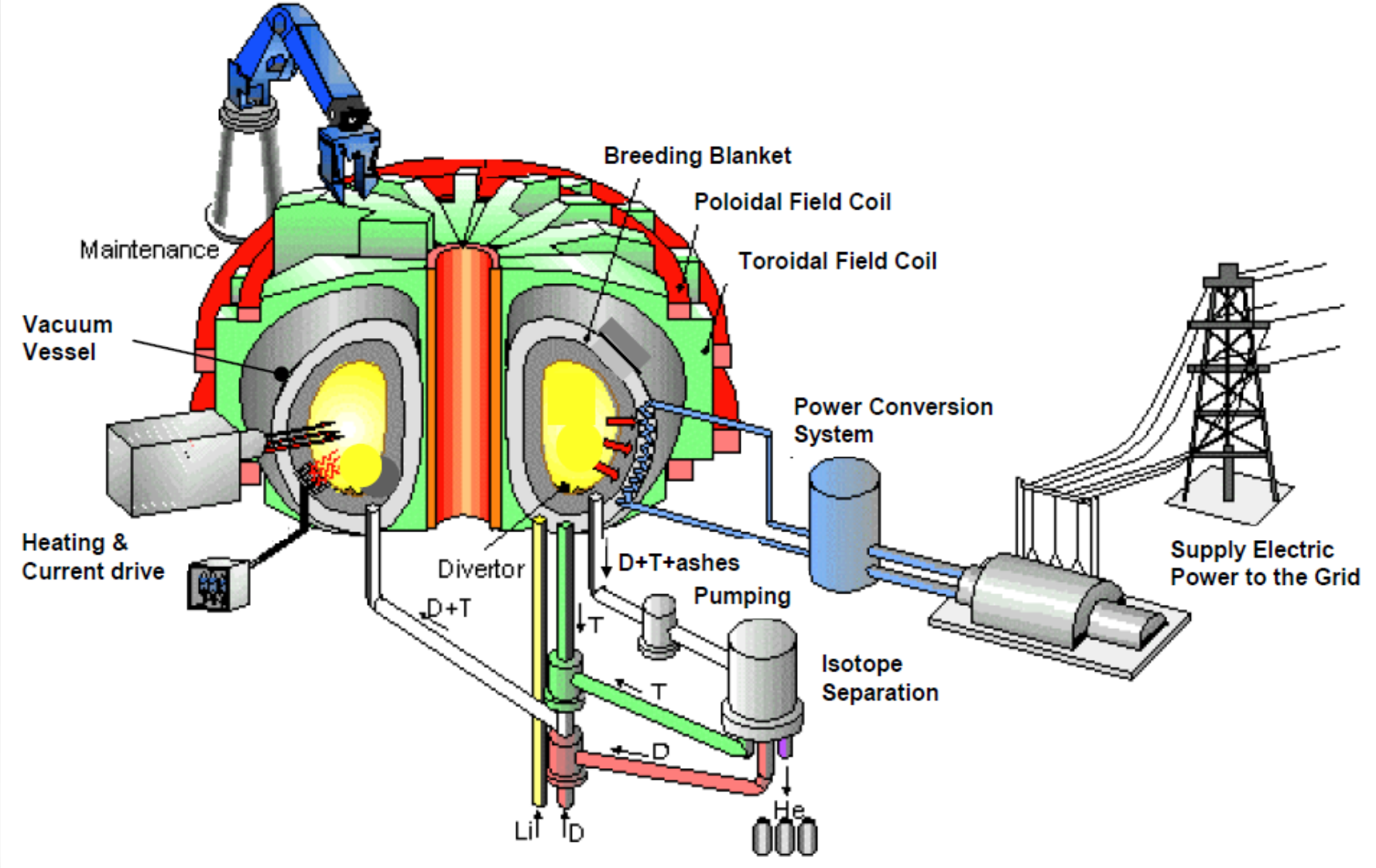
$$n_e \tau_E T \geq 3 \cdot 10^{21} \frac{keV\,s}{m^3}$$

Fusionsprodukt



[8]

Aufbau eines Fusionskraftwerkes



[3]

ITER

Ziele von ITER

- α-Teilchen Heizung > Externe Heizung
- Beobachtung von Instabilitäten durch die α-Heizung
- Erforschung langer Pulse in Richtung kontinuierlichem Betrieb
- Erreichung des nötigen Tritium Brütungsverhältnis von ca. 1,1

Die Geschichte von ITER

- 1958 – Genfer IAEA Konferenz
- 1980s – Entdeckung der H-Mode am ASDEX
- 1985 – Beginn des ITER Projekts
- 2005 – Auswahl von Cardarache als Standort
- Januar 2007 – Beginn der Bauarbeiten in Cardarache
- Oktober 2007 – Offizielle Gründung der ITER Organization

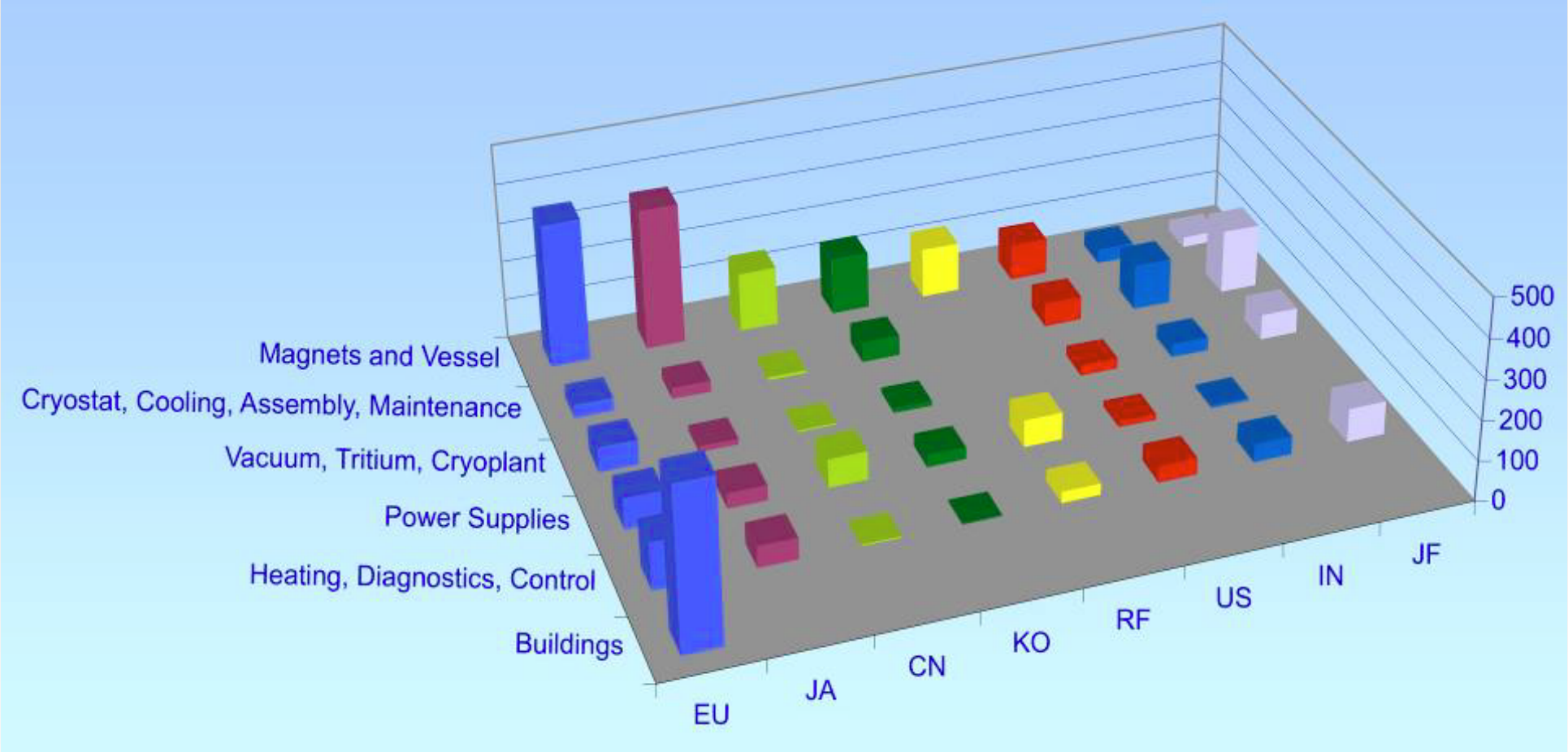
Baustelle ITER

The ITER platform in Cadarache, where construction began in 2010 on buildings and facilities. Photo: Altivue. [4]

ITERs Fertigstellung

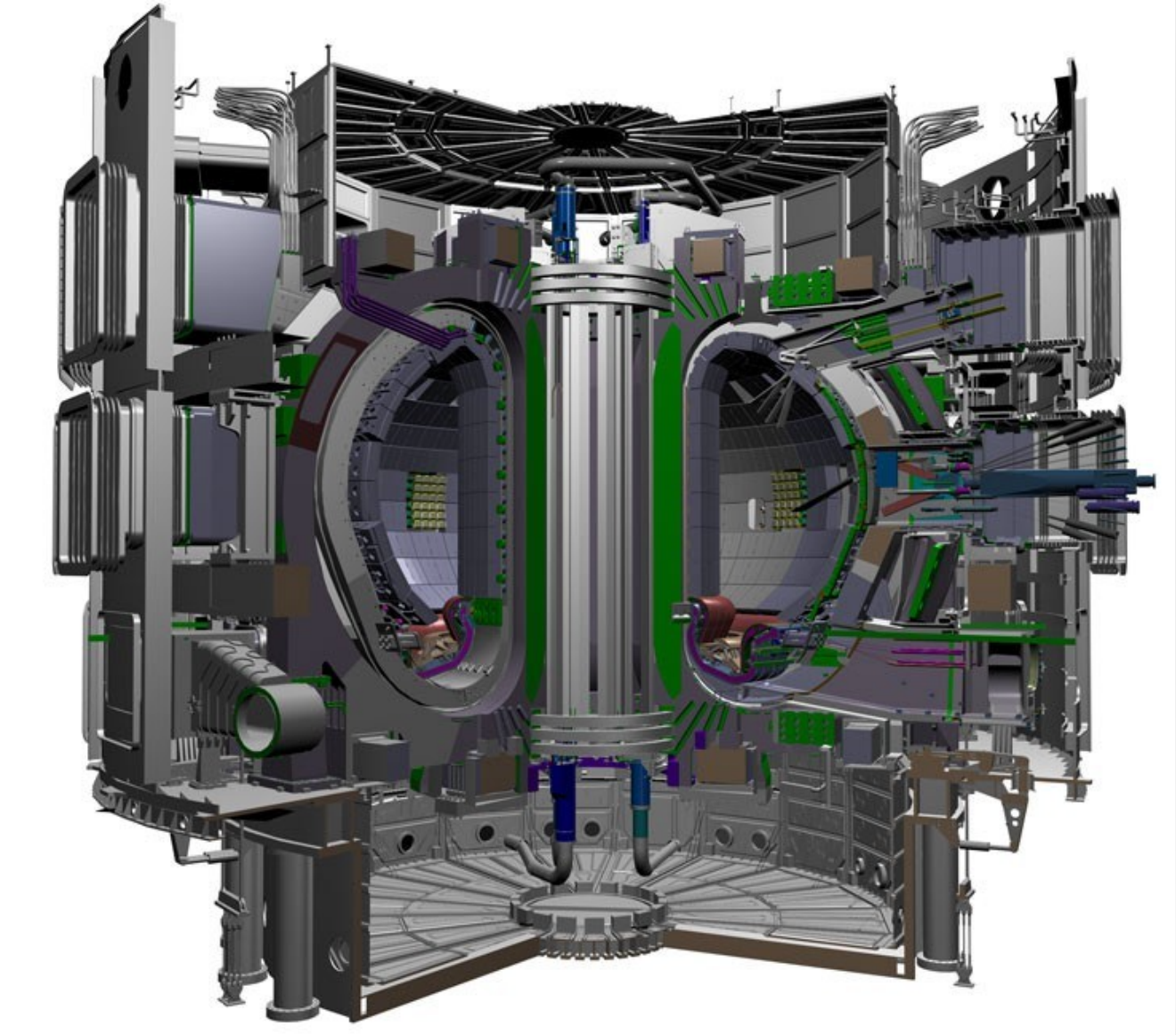
[4]

ITER Finanzierung



[8]

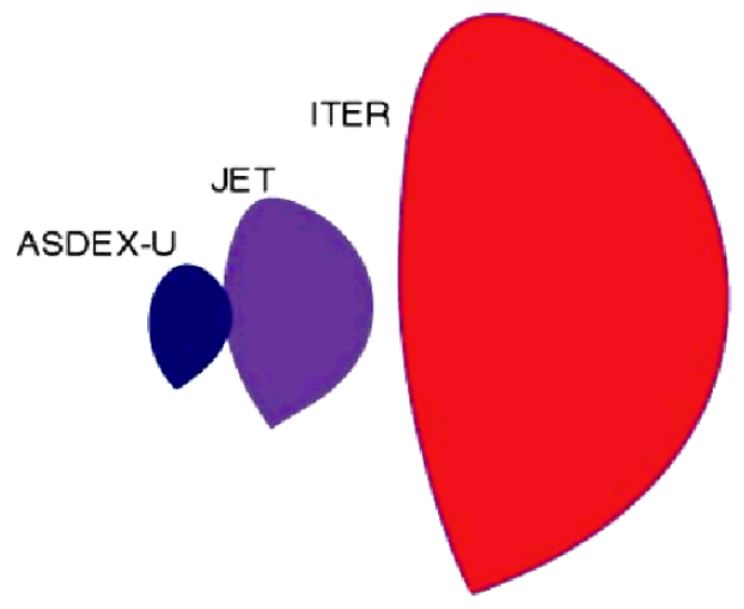
ITER - Aufbau



[4]

AUG – JET - ITER

	AUG	JET	ITER
Pulslänge	10 s	21-40 s	400 s
Magnetfeld	3,1 T	3,45 T	5,3 T
Plasmastrom	1,6 MA	4,8 MA	15 MA
Heizleistung	27 MW	25-30 MW	73 MW
Gewicht	800 t	2 800 t	23 000 t
Plasmavolumen	14 m³	100 m³	840 m³
Großer Radius	1,65 m	3 m	6,2 m
Kleiner Radius	0,5-0,8 m	1,25 – 2,1 m	2 – 3,7 m



[1]

Sicherheitsfaktor/Elongation

- Elongation ist die Elliptizität des Plasmas b/a
- AUG: κ=1.6 JET: κ=1.65
- Elongation κ von 1.85 bei ITER erlaubt einen höheren Plasmastrom ohne das q-Limit zu verletzen

$$q \propto 5a^2 \frac{B}{RI_P} \frac{1+\kappa^2}{2}$$

Hoher Plasmastrom von 15 MA

- Greenwald Limit

$$n_e \leq \frac{I_P}{a^2}$$

- Troyon Limit

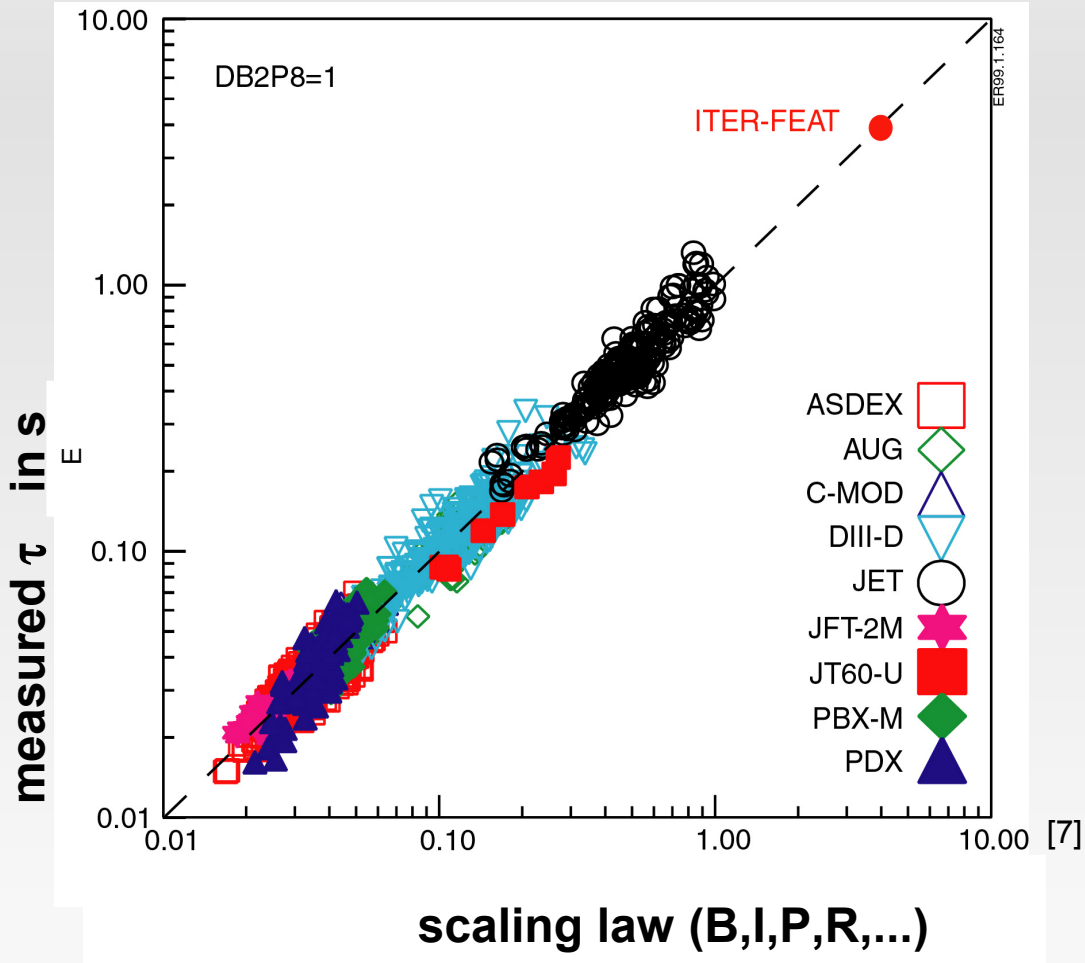
$$\beta \leq \frac{\beta_N I_P}{aB}$$

- Einschlusszeit

$$\tau_E \propto I_P^{0.93}$$

Skalierungsgesetz

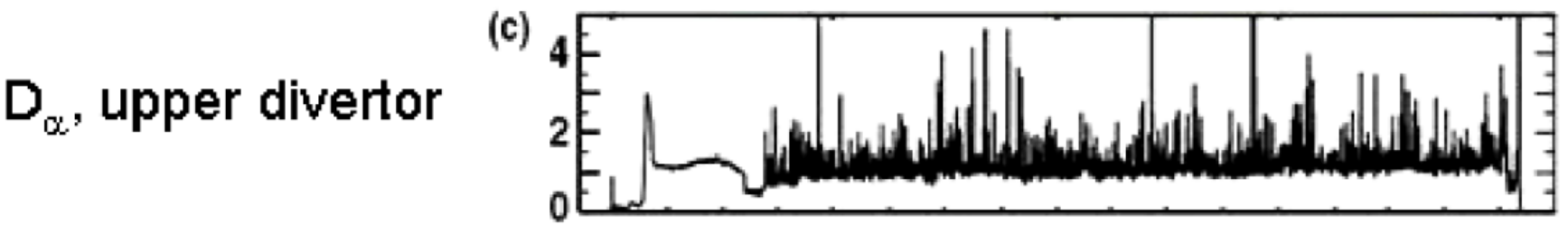
$$\tau_E = 0.0562 H I_P^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} \epsilon^{0.58} \kappa_x^{0.78}$$



[7]

ELMY H-MODE (1)

- Hauptsächlicher Betriebsbereich von ITER
- Wird erreicht ab einem bestimmen Temperatur- und Dichtelimit
  → Heizung muss stark genug sein
- Das Profil besitzt Transportbarrieren – Pedestals – in Temperatur und Dichte am Plasmarand
  → Höhere Paramter im Kern
- Edge Localised Modes sind Entspannungsprozesse der steilen Plasmaränder die periodisch Energie und Partikel ausstoßen



[1]

ELMY H-MODE (2)

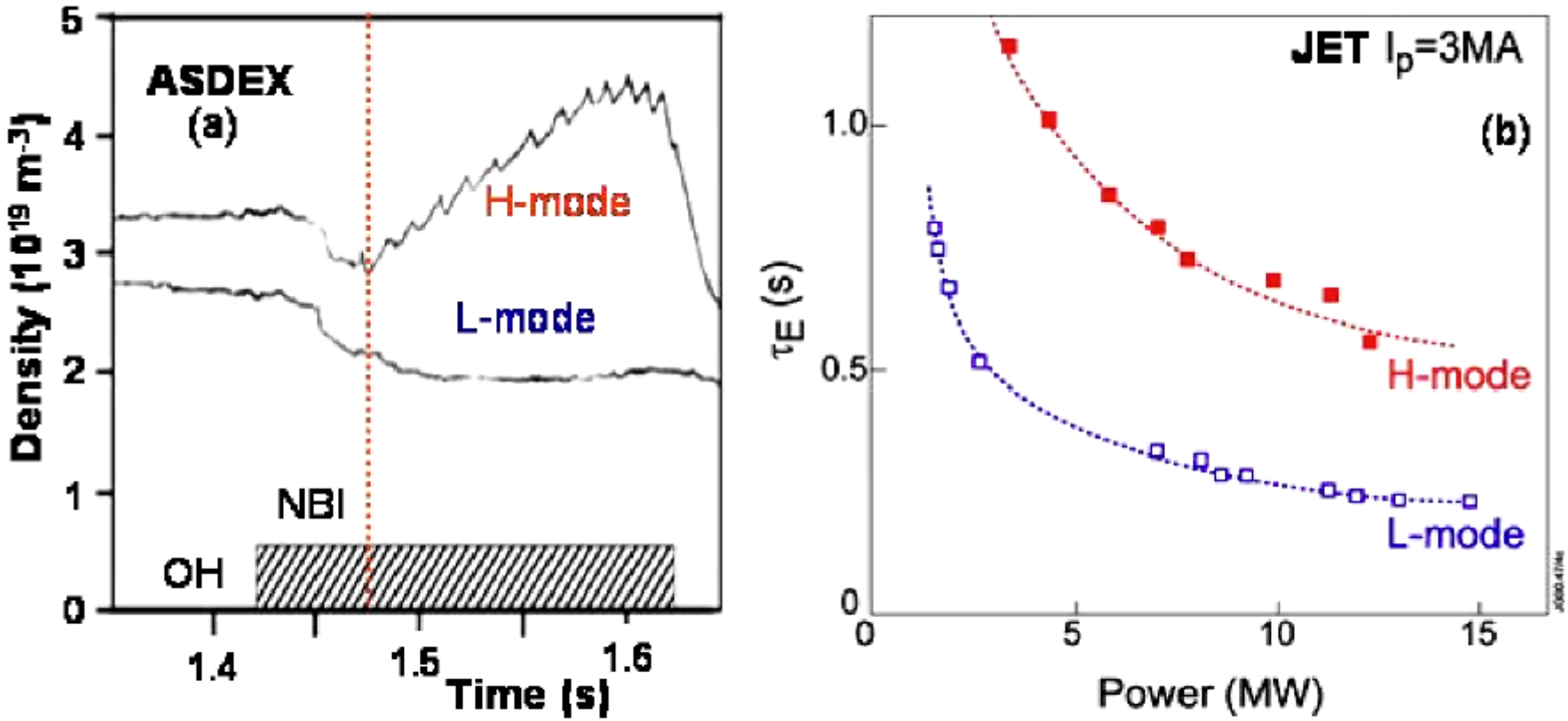


FIGURE 17. Left: (a) line density starting in the ohmic phase into neutral injection for an L-mode and an H-mode discharge in ASDEX (old) [37];
(b) τ_E power scaling in L- and H-modes of JET [2].

[1]

ELMY H-MODE (3)

Schwellwert P_{LH} wird verringert bei

- einer Separatrix statt einem Limiter
- Deuterium statt Wasserstoff im Plasma
- sauberen, frisch boronisierten, Plasmen
- Gaseinlass von der Hochfeldseite

Verhinderung von ELMs

- Da ein ELM bis zu 10% der Energie im Plasma ausstoßen kann gefährdet das den Divertor, der über 20 MW/m² abbekommt.
- Daher müssen große ELMs verhindert werden:
  - Triggern von vielen kleinen ELMs durch zB kleine Pellets
  - ”Ergodisieren” des Plasmarandes durch Störspulen

Tritiumbrütung

$$^{6}\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{H} + 4{,}8\ \mathrm{MeV}$$

$$^{7}\mathrm{Li} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{H} + \mathrm{n}' - 2{,}5\ \mathrm{MeV}$$

- Natürlich 92,5% Li-7
- Li-7
  - hohe Energieschwelle → nur schnelle Neutronen
  - Neutron bleibt bestehen
- Vorteile von Li-6
  - Nutzung langsamer Neutronen
  - Zusätzlicher Energiegewinn

→ Anreicherung zu 50% Li-6

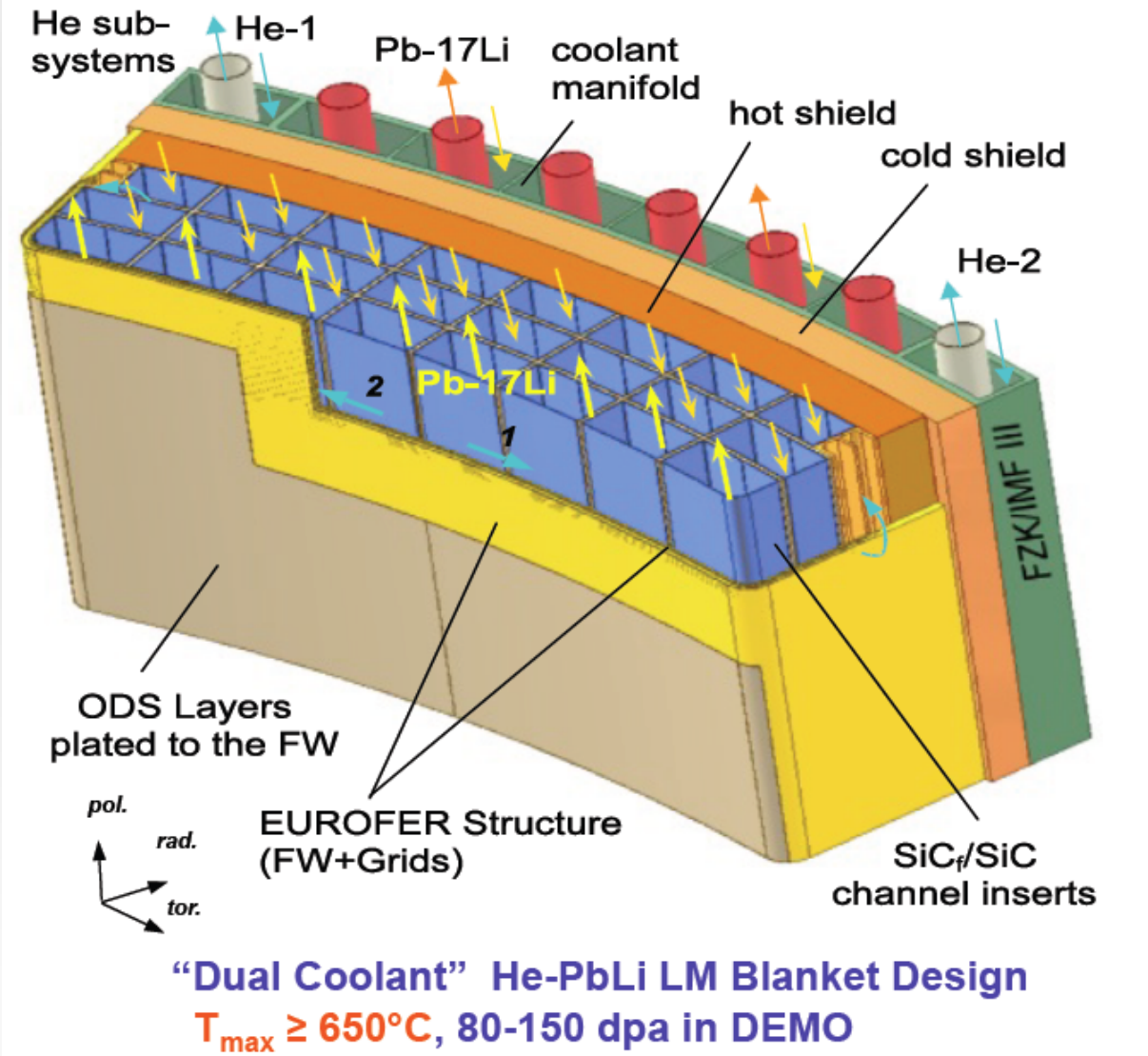
Neutronenvermehrung

- Jede Li-6 Reaktion verbraucht ein Neutron

  → Neutronen müssen vermehrt werden um Verluste auszugleichen (ca 30-50%)

  → (n,2n)-Kernreaktionen an Beryllium oder Blei
  - Be-9 + n → 2(He-4) + 2n -1.6 MeV
  - Pb + n → … + 2n

Brutblanket



[8]

DEMO

Was ist DEMO?

- Letzter bisher geplanter Zwischenschritt von ITER zu einem kommerziellen Reaktor
- Demonstration von Elektrizitätserzeugung durch Fusion
- Große Strommengen von 1,5 - 3 GW
- Kontinuierlicher Betrieb oder sehr lange Pulse

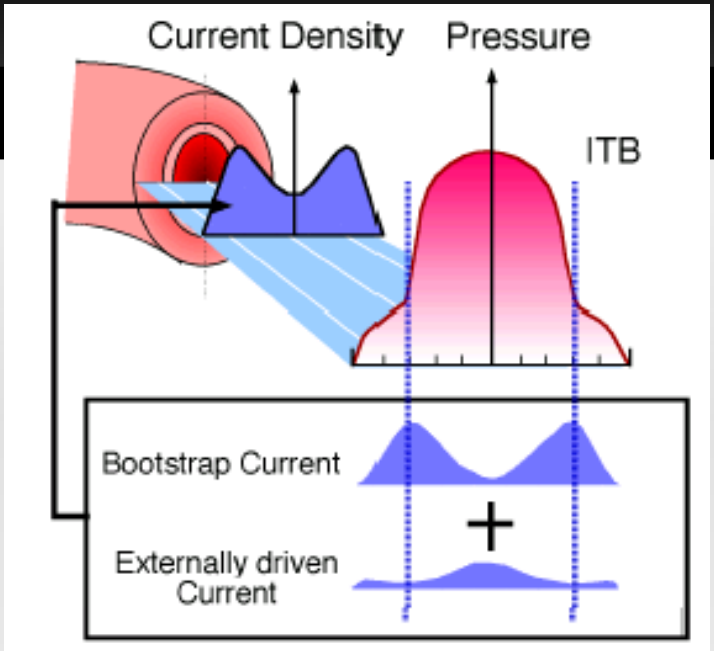
Art des Reaktors

- Tokamak
- Advanced Tokamak
- Stellarator
- Inertial Fusion Device

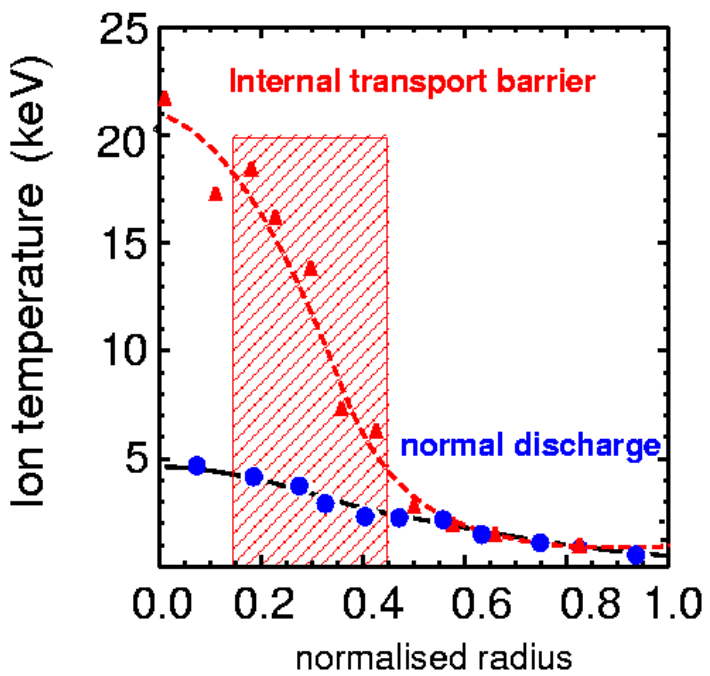
Advanced Tokamak

- Stationärer Betrieb
  - Bootstrap Strom
  - Stromtrieb mit Wellen
- Verbesserter Divertor
  - bis zu 20 MW/m²
- Transportbarrieren
  - H-Mode
  - verscherte Rotation

$$j_{BS} \sim \nabla p$$

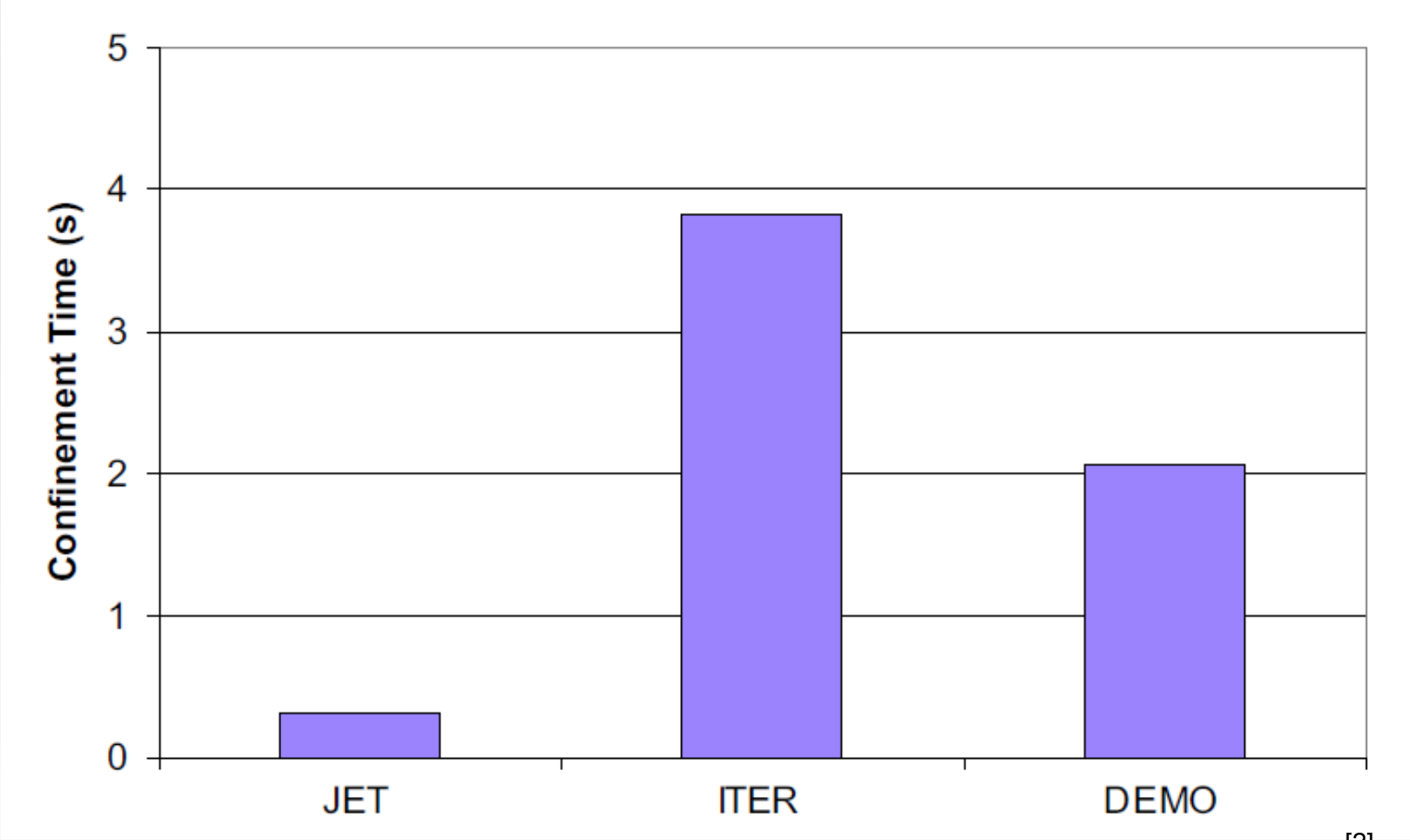


[7]



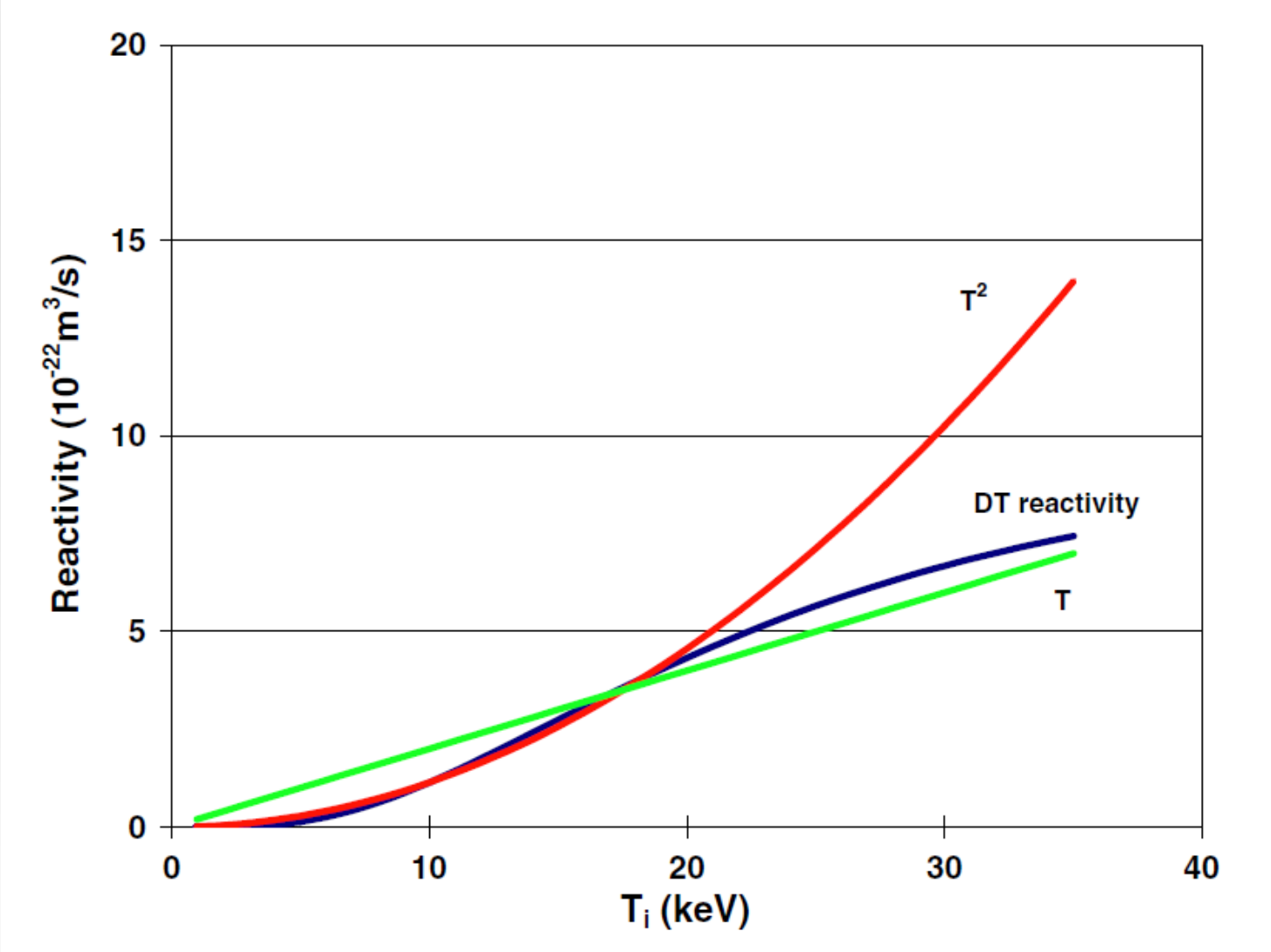
[7]

Confinement Time



[2]

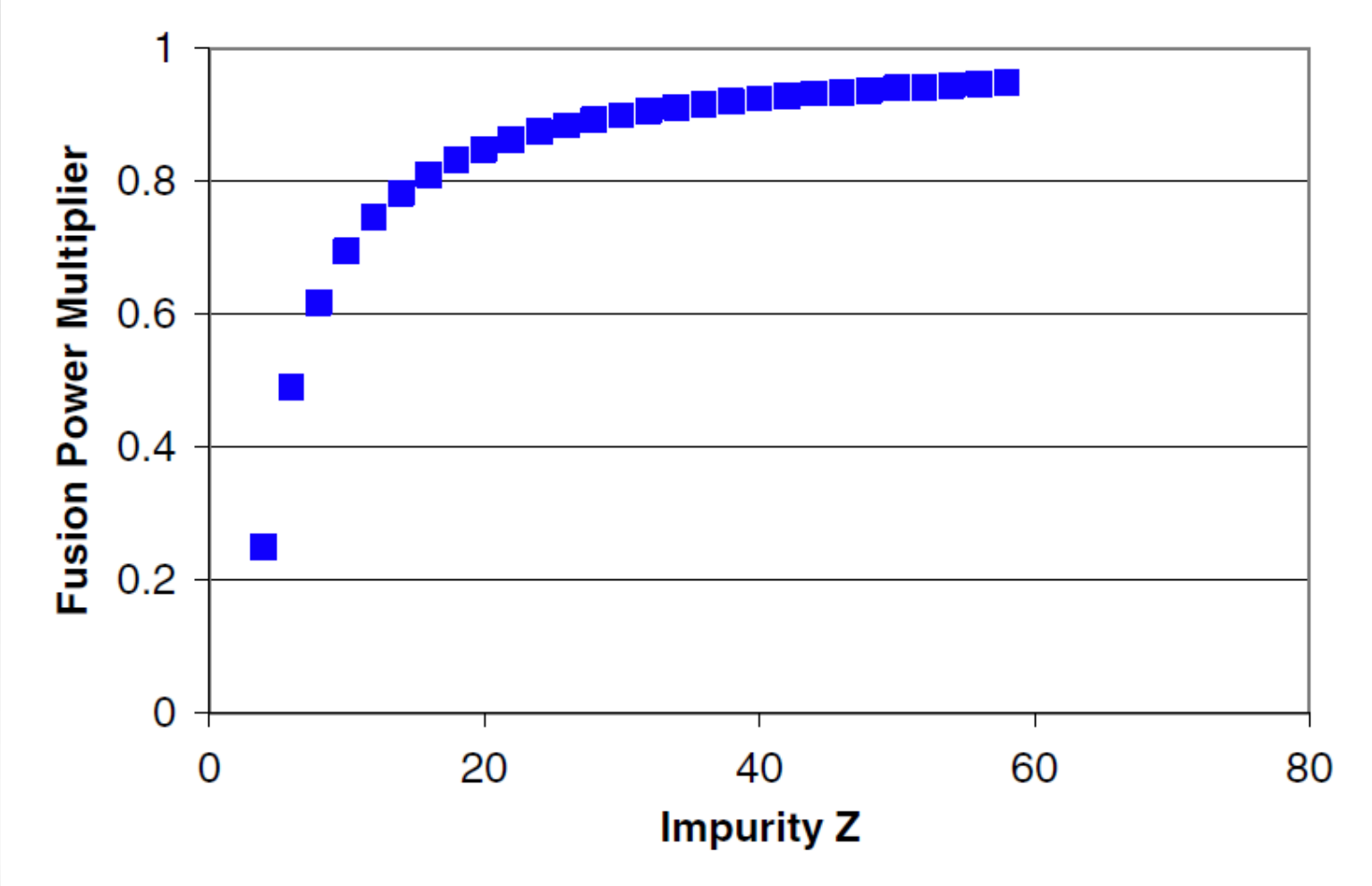
T-Abhängigkeit



[2]

Divertorbelastung reduzieren (1)

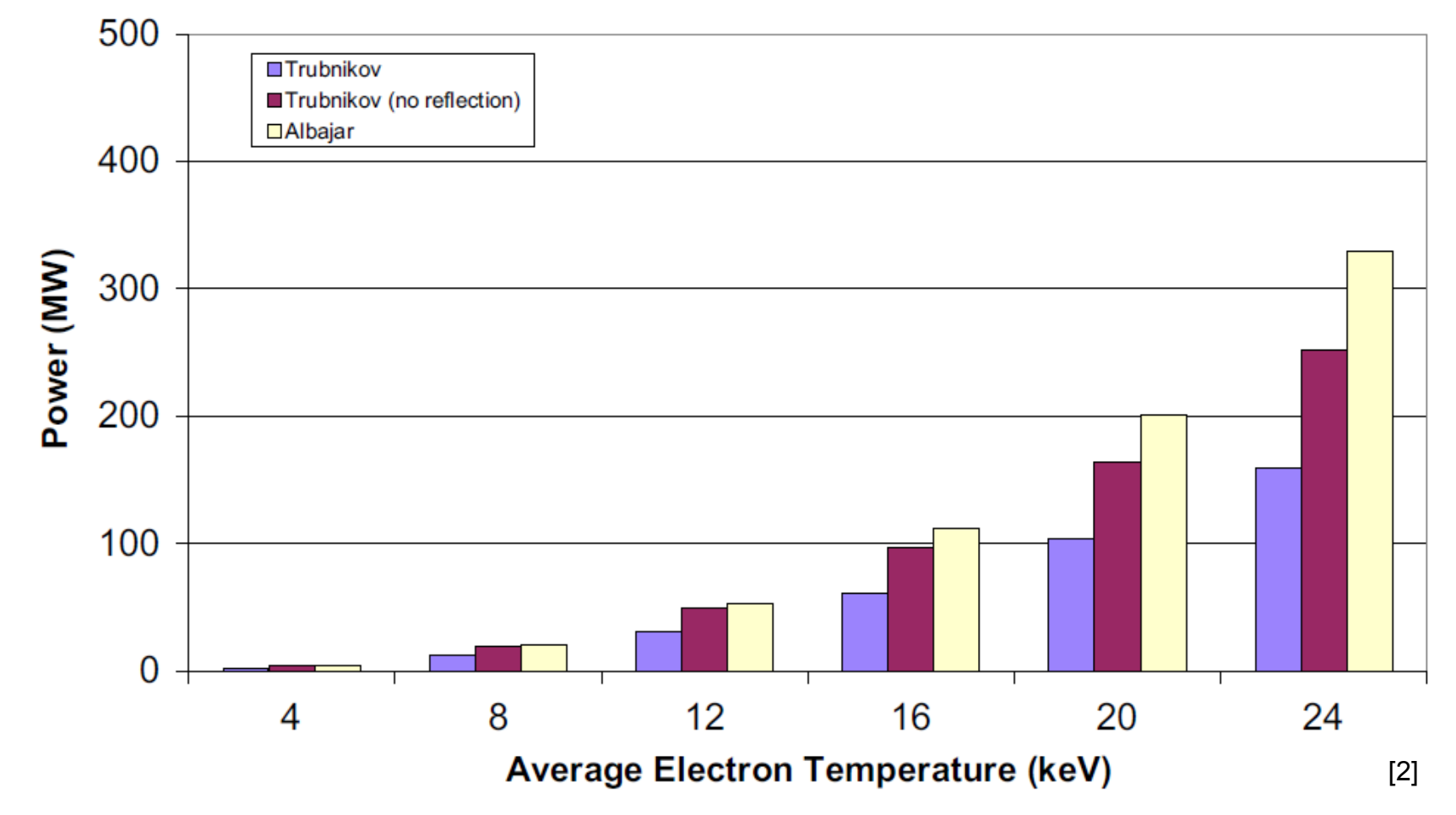
- durch Strahlungsverluste an Verunreinigungen



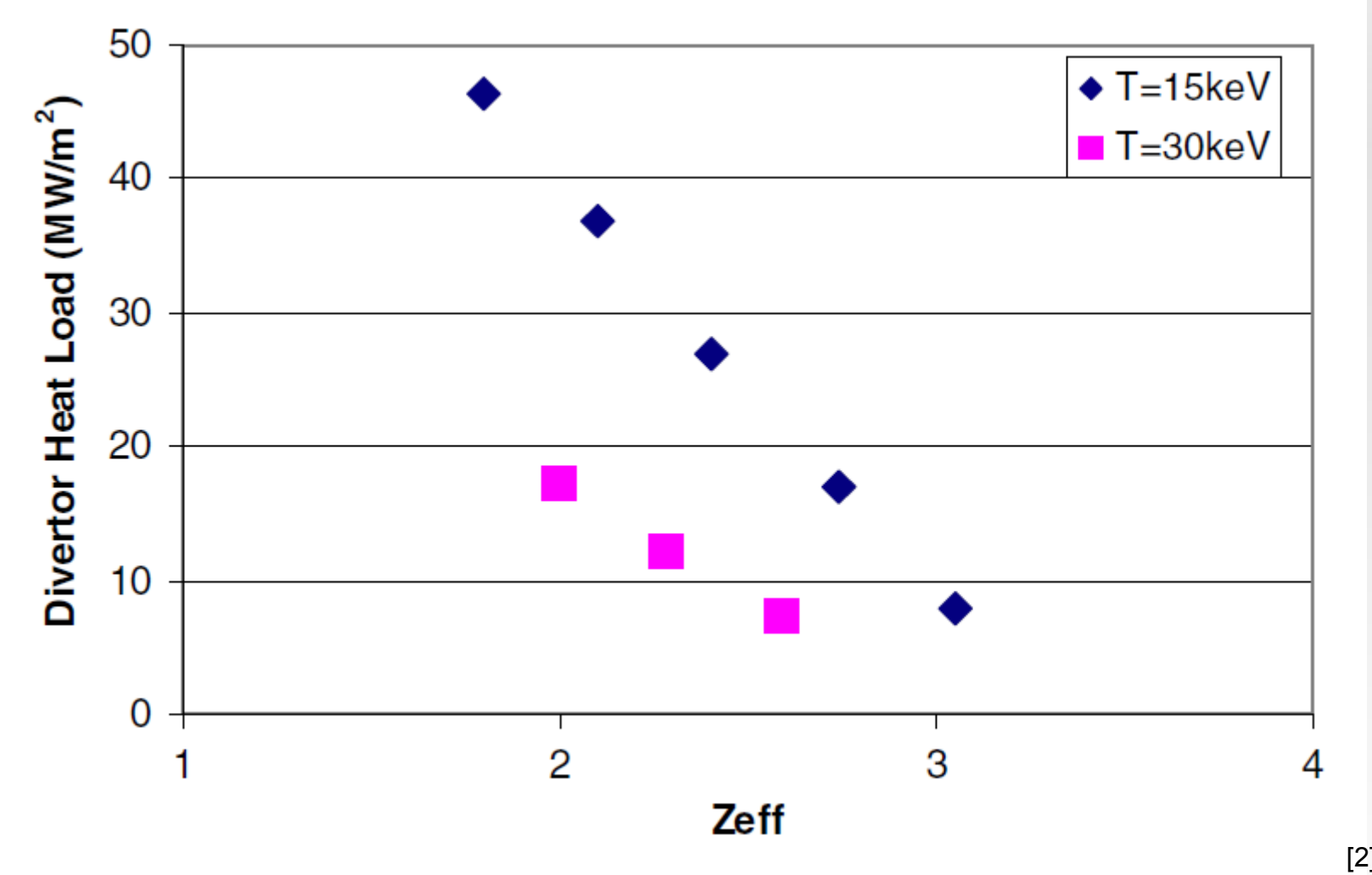
[2]

Divertorbelastung reduzieren (2)

- durch Synchrotronstrahlung der Elektronen

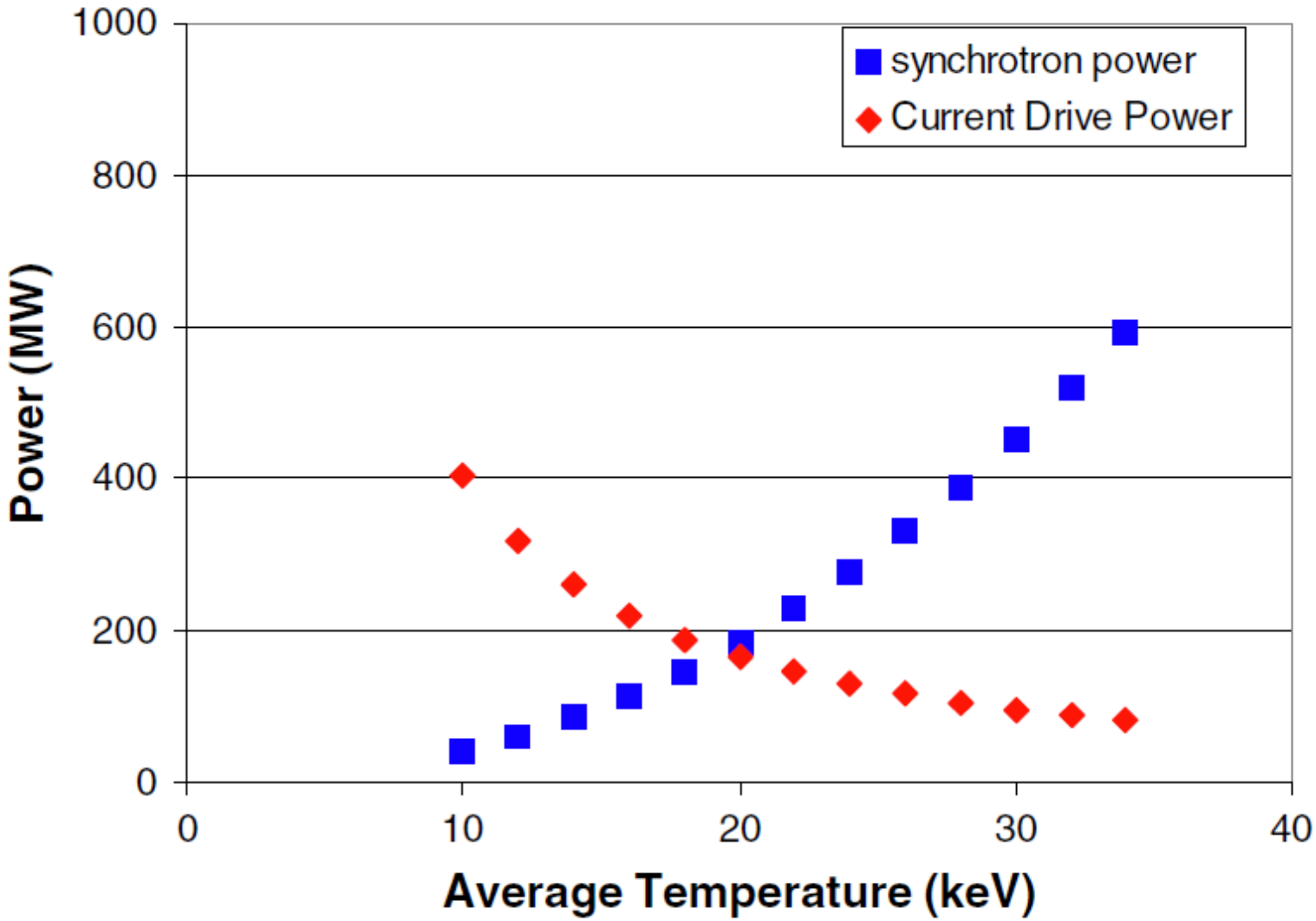


Divertorbelastung reduzieren (3)



[2]

Divertorbelastung reduzieren (4)



[2]

Interne Kosten

$$\mathrm{coe} \propto \left(\frac{1}{A}\right)^{0.6} \frac{1}{\eta_{th}^{0.5}} \frac{1}{P_e^{0.4}\ \beta_N^{0.4} N^{0.3}}$$

- coe: cost of electricity
- A: Verfügbarkeit
- η_{th}: thermodynamischer Wirkungsgrad
- P_e: elektrische Ausgangsleistung
- β_N: normalisierter Plasmadruck
- N: Greenwald normalisierte Plasmadichte

Externe Kosten

- 0.06 – 0.09 Eurocent/kWh
  - Entsorgung der Materialen
  - Unfälle während der Bauarbeiten

- Vergleich zu externen Kosten anderen Energiequellen [ExternE]
  - Windkraft – 0.05 Eurocent/kWh
  - Gaskraftwerk – 1-2 Eurocent/kWh
  - Ölkraftwerk – 5-8 Eurocent/kWh
  - Kohlekraftwerk – 3-6 Eurocent/kWh
  - Kernkraft – 0.2 Eurocent/kWh

Sicherheits- und Umweltaspekte

Sicherheit

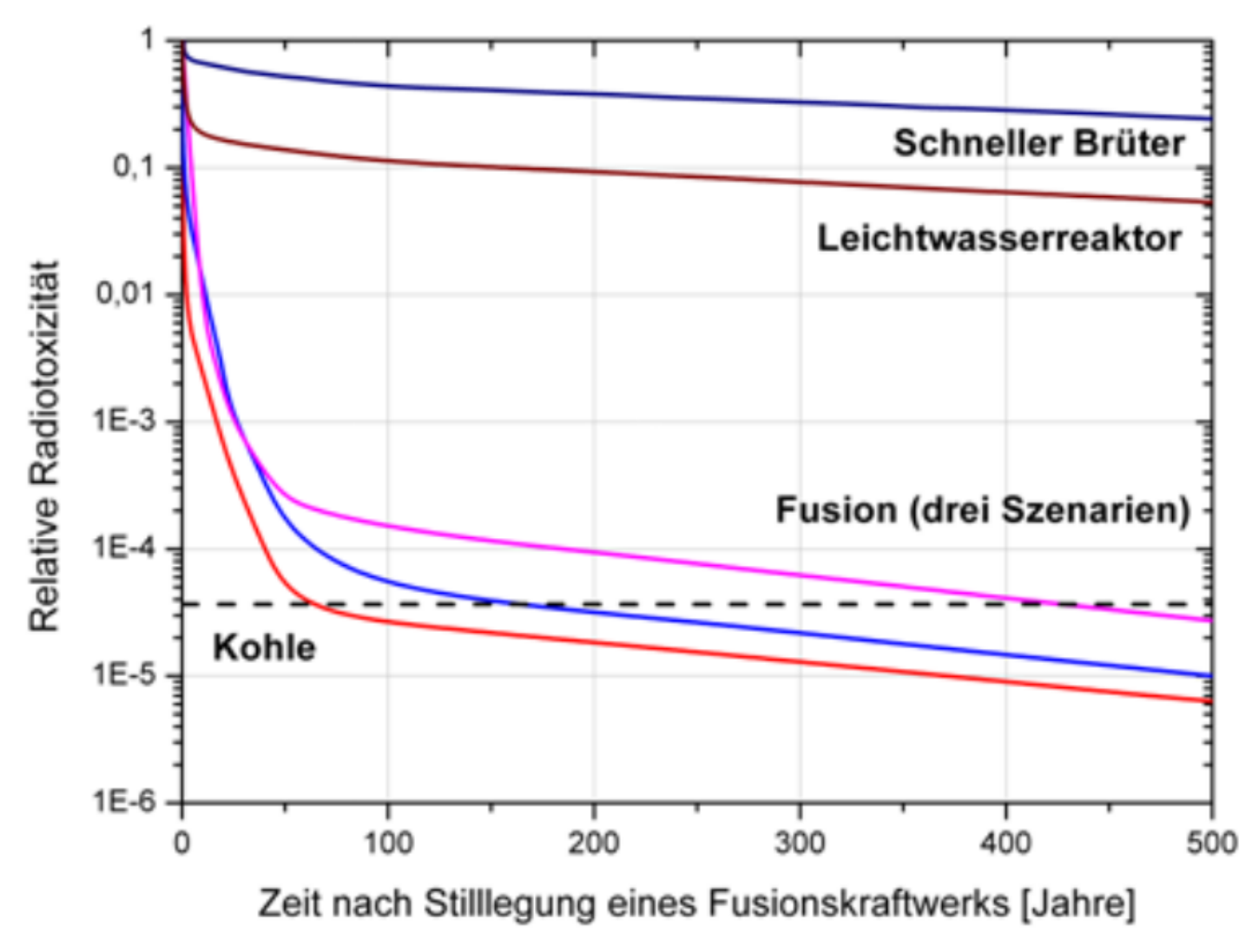
- Brennstoff im Plasma nur für einige Sekunden
- Gelagertes Tritium auf dem Gelände ca 1 kg
- Abklingwärme der angeregten Wandmaterialien zu klein um diese zum Schmelzen zu bringen
- Schlimmstes Unfallszenario
  - Totaler Verlust der Kühlsysteme
  - Kein externen Eingriff für eine lange Zeit
  - ein Kühlkreislauf wird undicht und transportiert Tritium und angeregten Staub durch alle Barrieren in die Umwelt

→ 1-18 mSv für jemand am Rand des Reaktorgeländes

Umwelteigenschaften

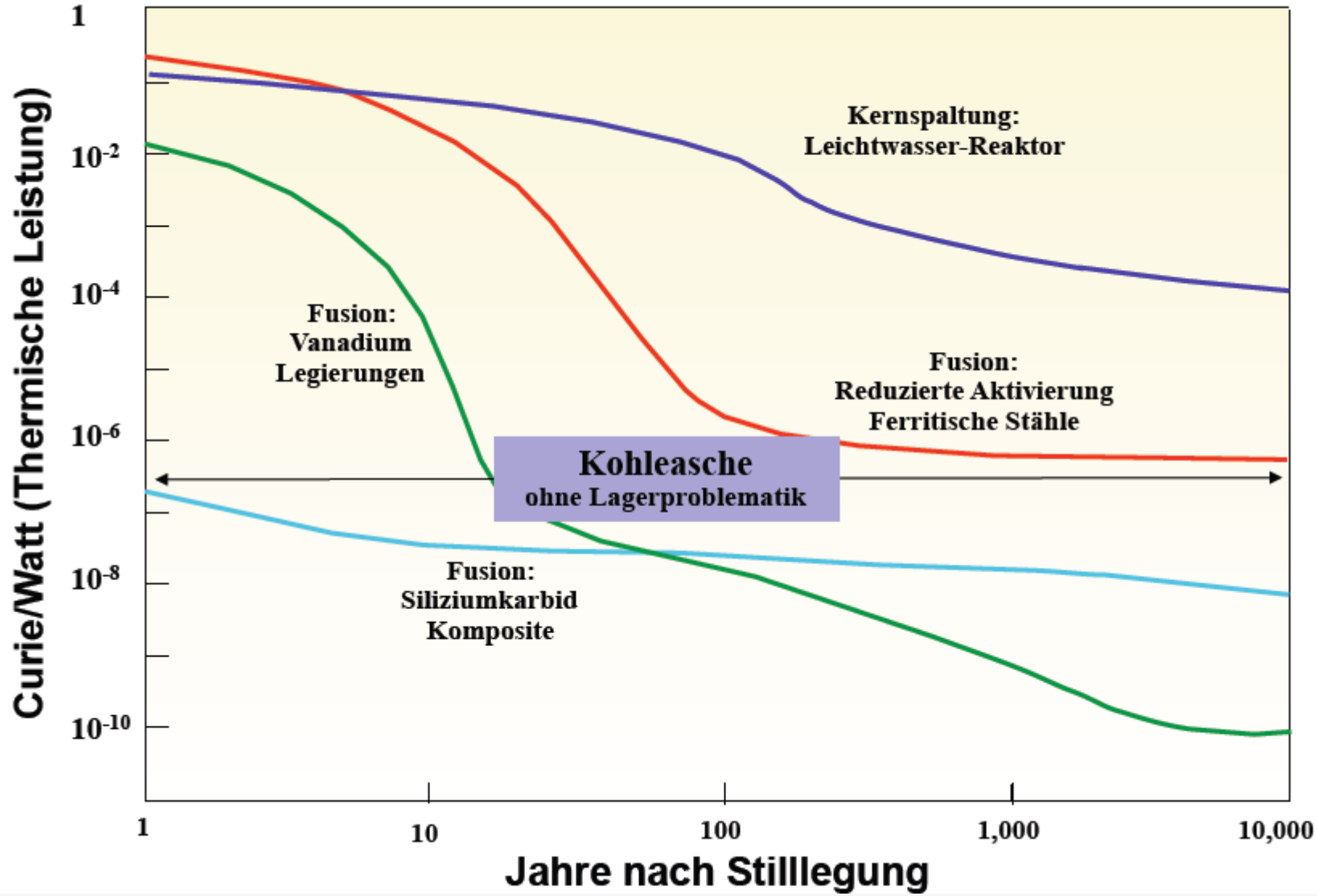
- als Asche nur Helium – keine Treibhausgase
- Umweltbeeinflussung durch Stromverteilung und Kühlwasser wie bei anderen Großkraftwerken
- kleiner kontinuierlicher Ausstoß von Tritium über Diffusion durch Wände
- Reaktormaterialien nach ca 100 Jahren zu 100% recyclebar (PPCS Model B)

Radiotoxizität nach Stilllegung



[5]

Radiotoxizität nach Stilllegung



[8]

Referenzen

- [1] The Physics Basis of ITER Confinement – F.Wagner – 2009 American Institute of Physics
- [2] The physics of DEMO – D J Ward – 2010 IOP Publishing Ltd
- [3] Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS) - 2005
- [4] www.iter.org
- [5] http://www2.fz-juelich.de/ief/ief-4//__no_content/flash/Flash_Praesentation_Kernfusion_800x600/
- [6] http://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion
- [7] Vorlesung ”Plasmaphysik und Fusionsforschung” - S. Günter - 2011
- [8] Der Weg zu einem Fusionskraftwerk – Günther Hasinger – Bochumer Kolloquium - 2010