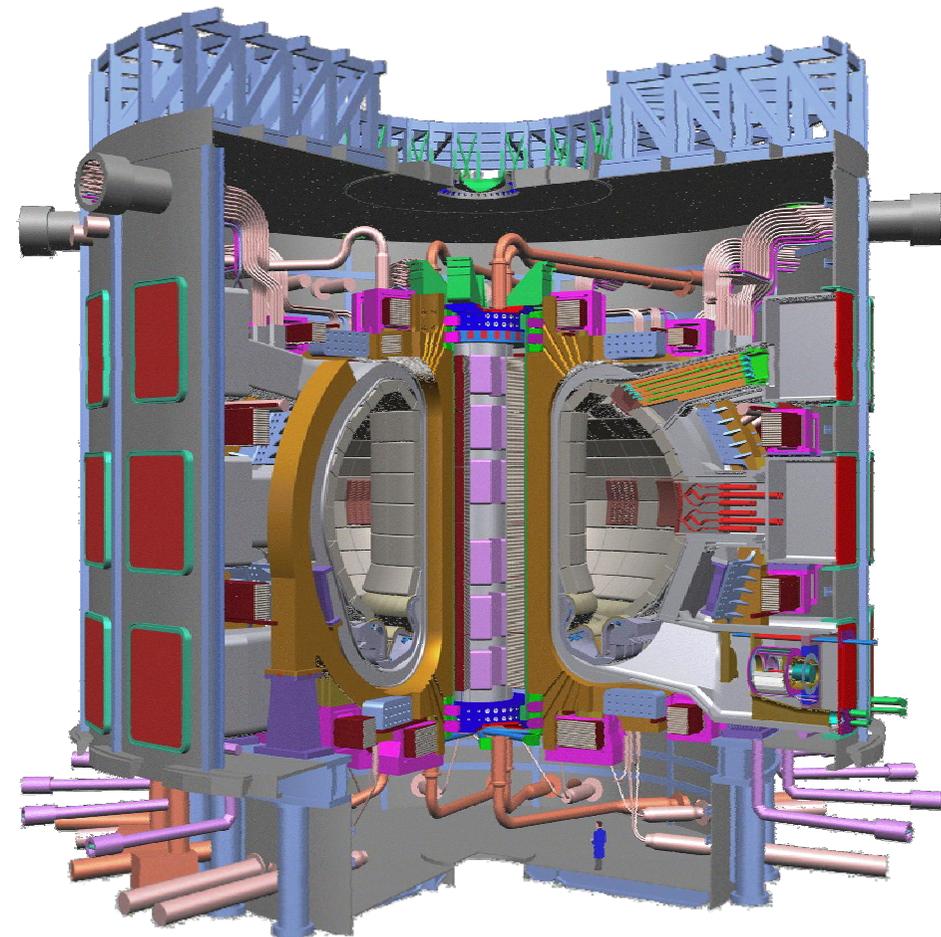


Der lange Weg zu ITER



A. M. Bradshaw

Festkolloquium Dr. Schunck
DESY, Hamburg, 28. Oktober 2005

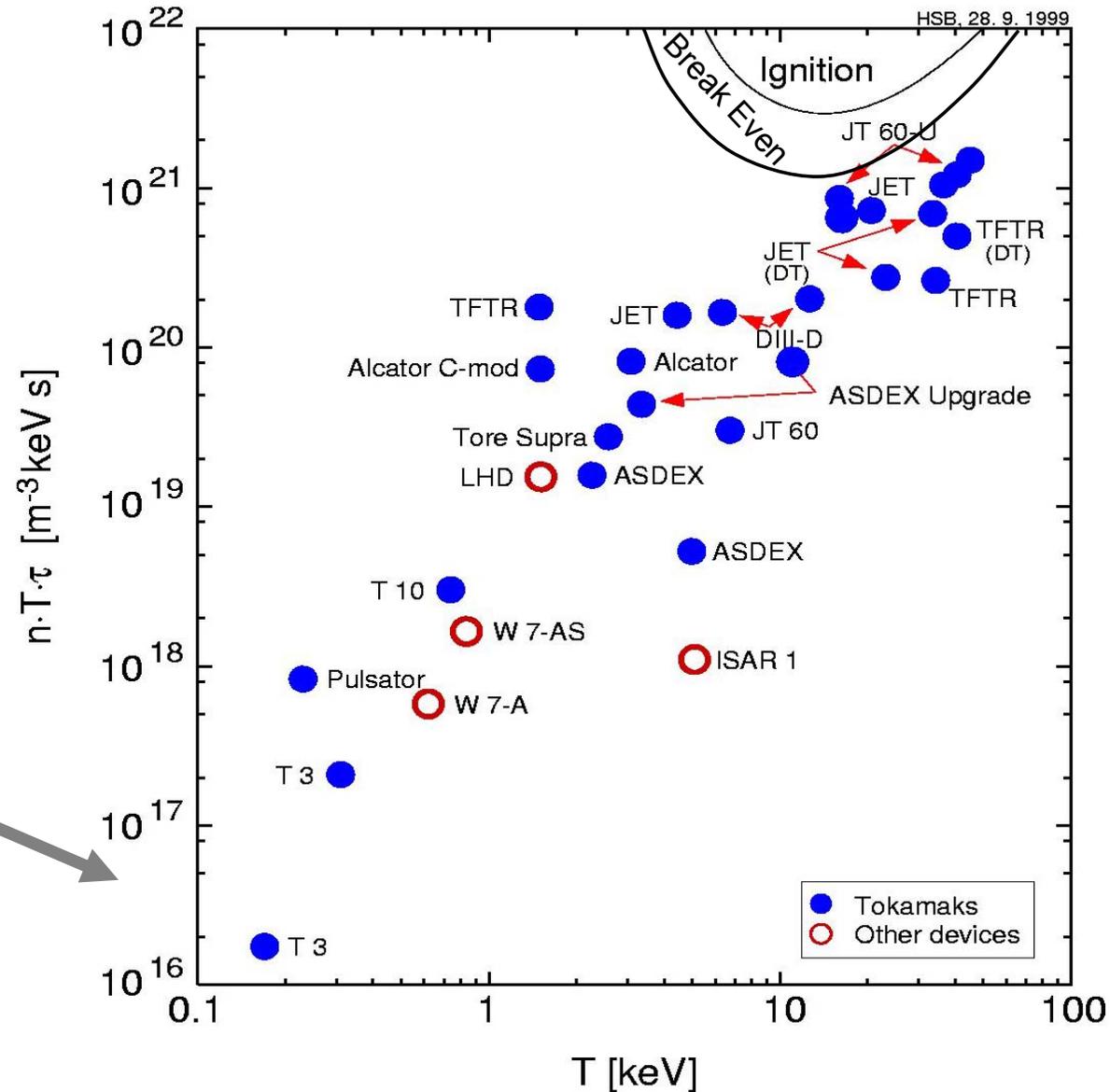
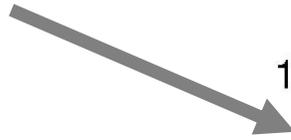
Wo stehen wir?

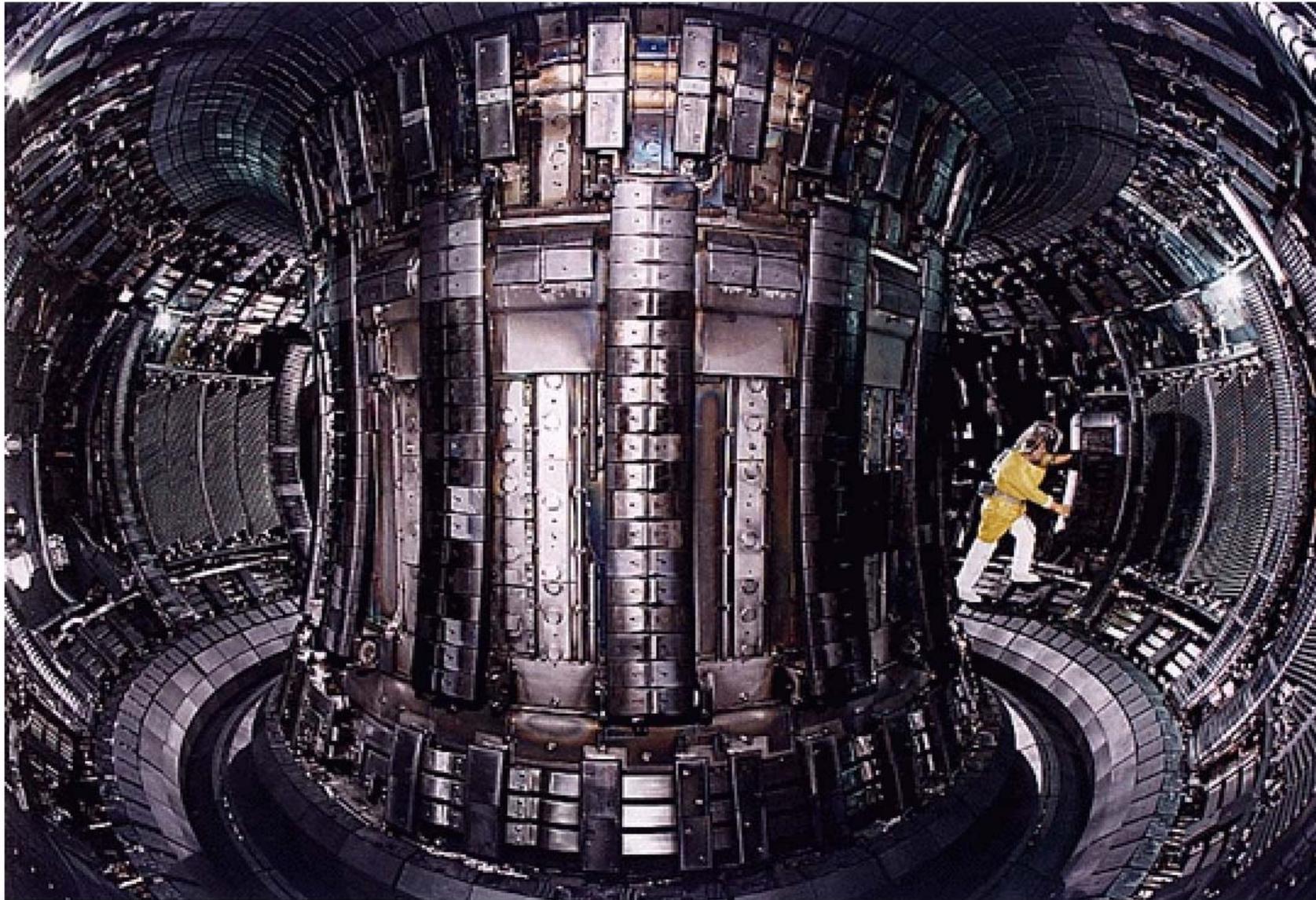
1955:

Bau des ersten Tokamaks im Kurchatov-Institut, Moskau

1969:

Bestätigung von $T_e \approx 1$ keV in T3 in gemeinsamem britisch-russischem Experiment





1997, Mark IIA Divertor

Parameter und Ergebnisse von JET

JET-Parameter:

$$R_0 = 3,0 \text{ m}$$

$$a = 1,2 \text{ m}$$

$$I_p = 5 \text{ MA}$$

$$B_T \leq 3,5 \text{ T}$$

Zusatzheizung:

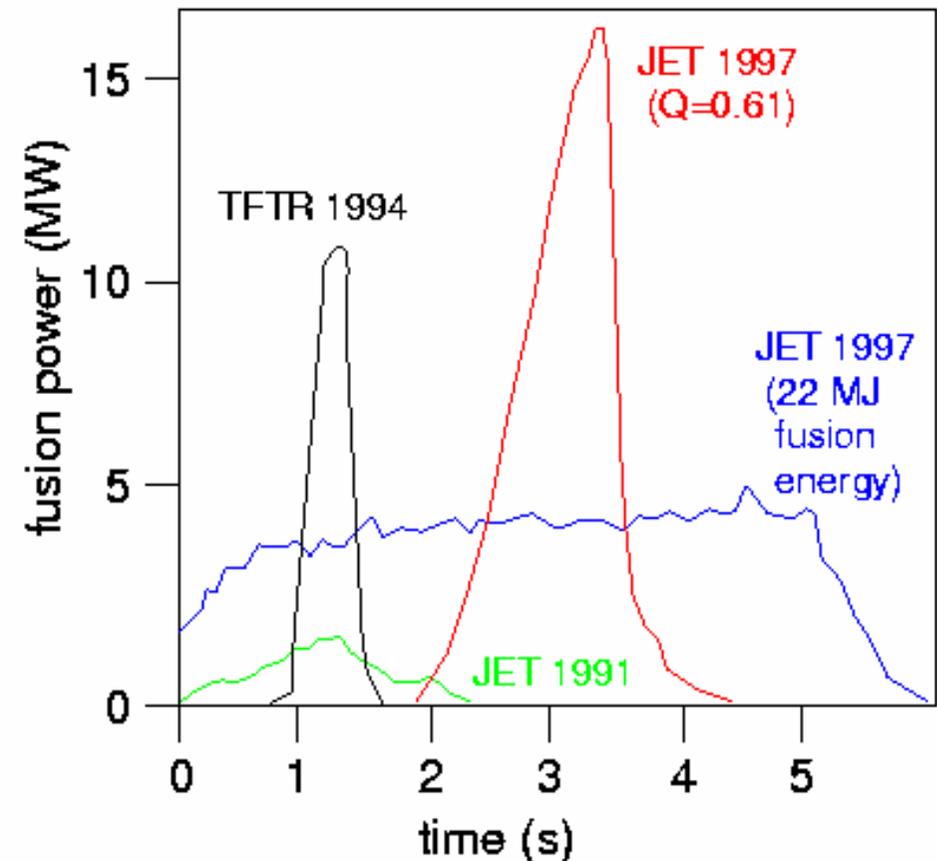
21 MW NBI

16 MW ICRH

6 MW LH (lower hybrid)

DT-Betrieb an JET:

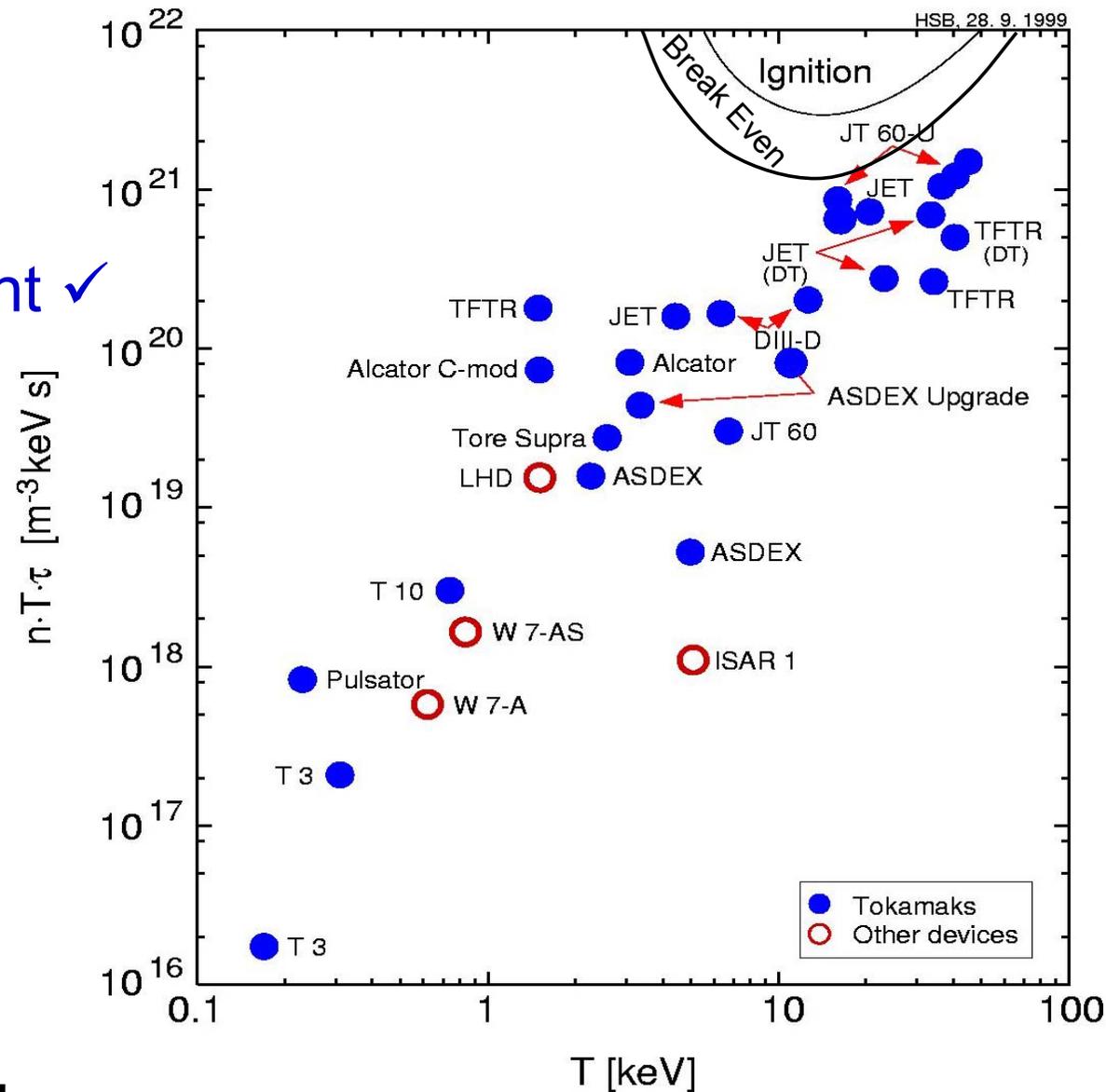
$$Q = P_{\text{fus}} / P_{\text{ext}} = 0,61$$



Wo stehen wir?

Notwendig für Zündung:

- hohe Temperaturen:
 - ▶ 400 Mio. °C (40keV) erreicht ✓
- hohe Dichte:
 - ▶ $10^{20} / \text{m}^3$ erreicht ✓
- lange Einschlusszeit:
 - ▶ $\tau_E \approx 1 \text{ s}$ erreicht
 - ▶ aber 5 s benötigt!

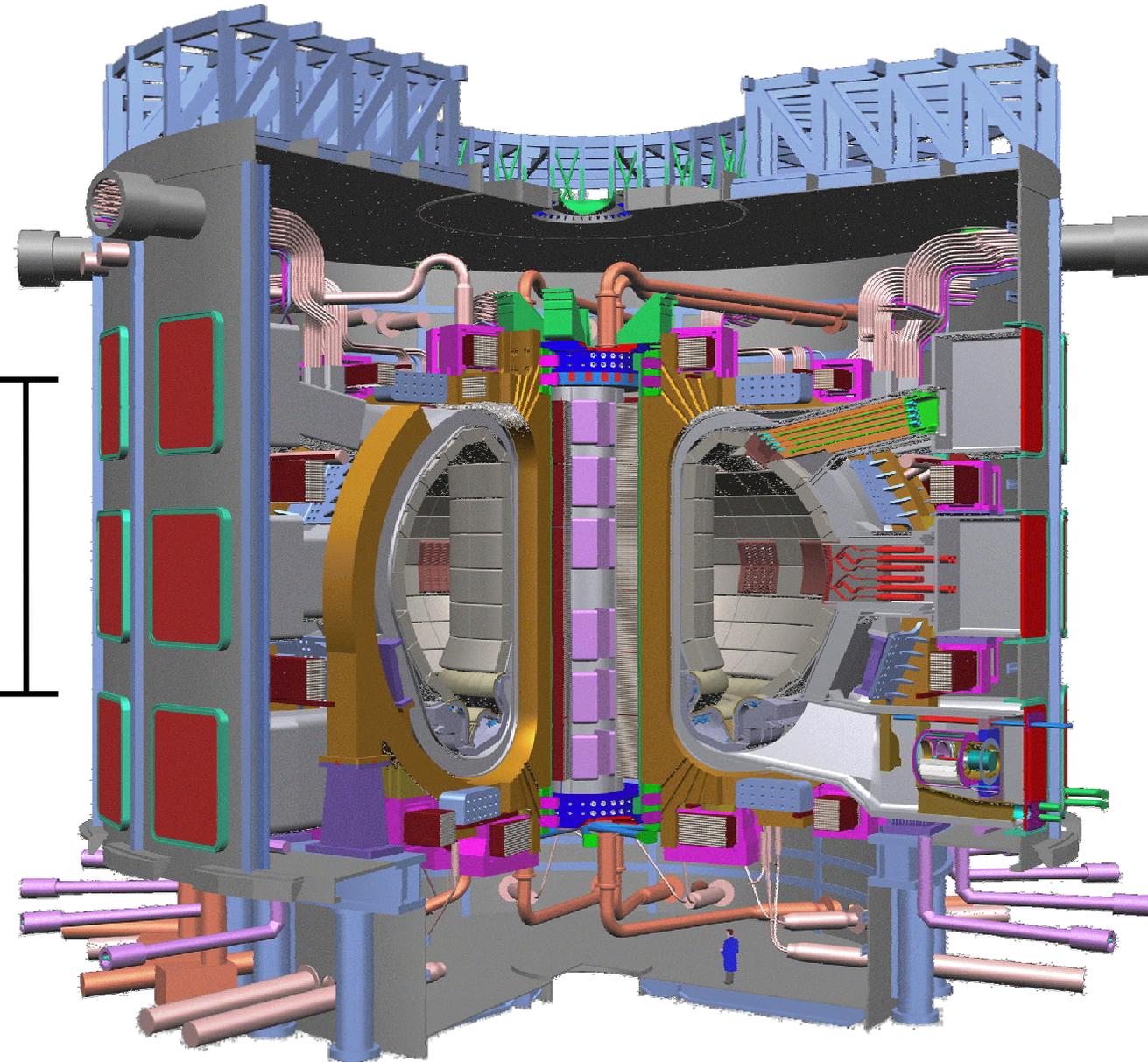


Wie können wir τ_E vergrößern,
d.h. die Isolation des Plasmas verbessern? → **2 Methoden**

ITER (lat. "der Weg")

→ größerer Torus

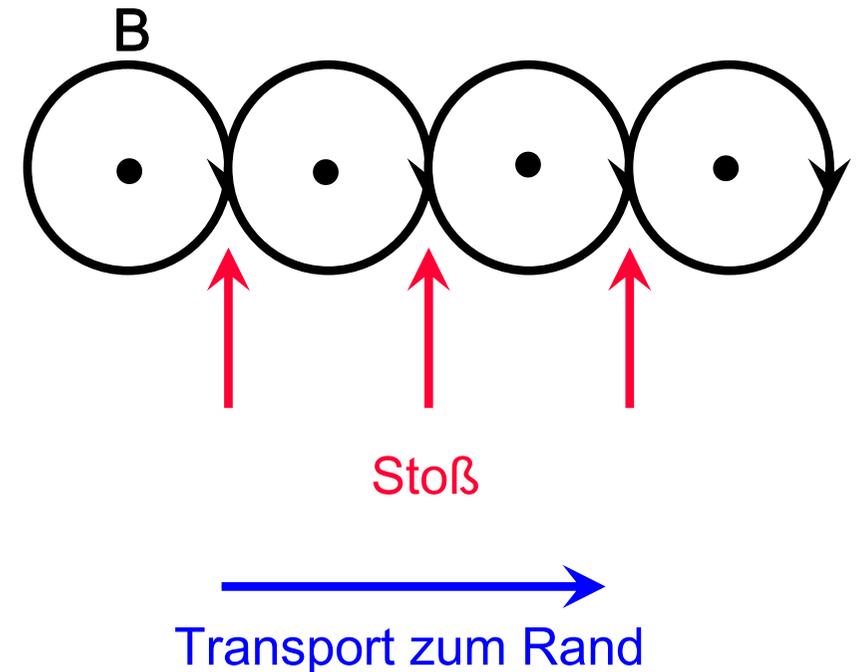
12 m



Transport von Energie bestimmt die Energieeinschlusszeit τ_E

Einfacher (klassischer) Ansatz:

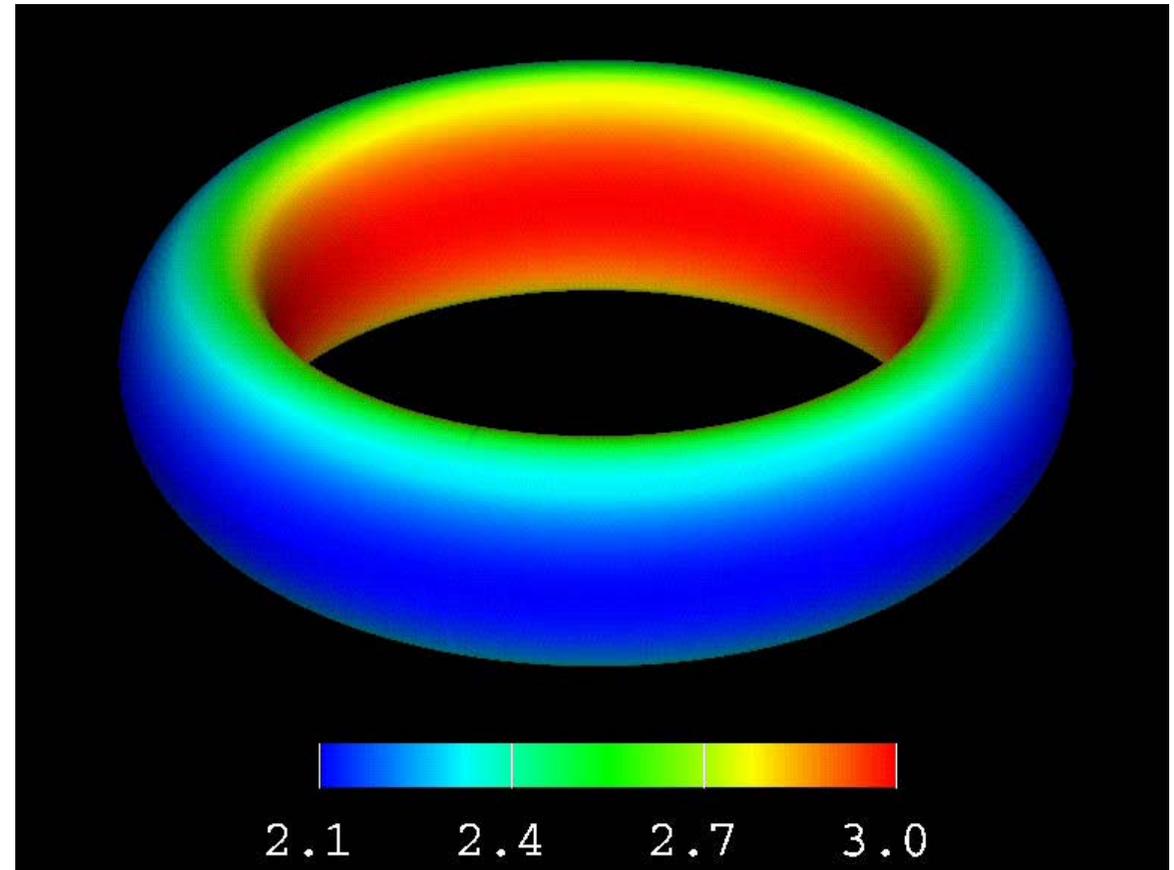
- Diffusion durch Stöße:
 χ , $D \approx 0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$



→ Tokamak von $a \approx 2 \text{ cm}$ sollte zünden (!)

Modifizierter (neoklassischer) Ansatz:

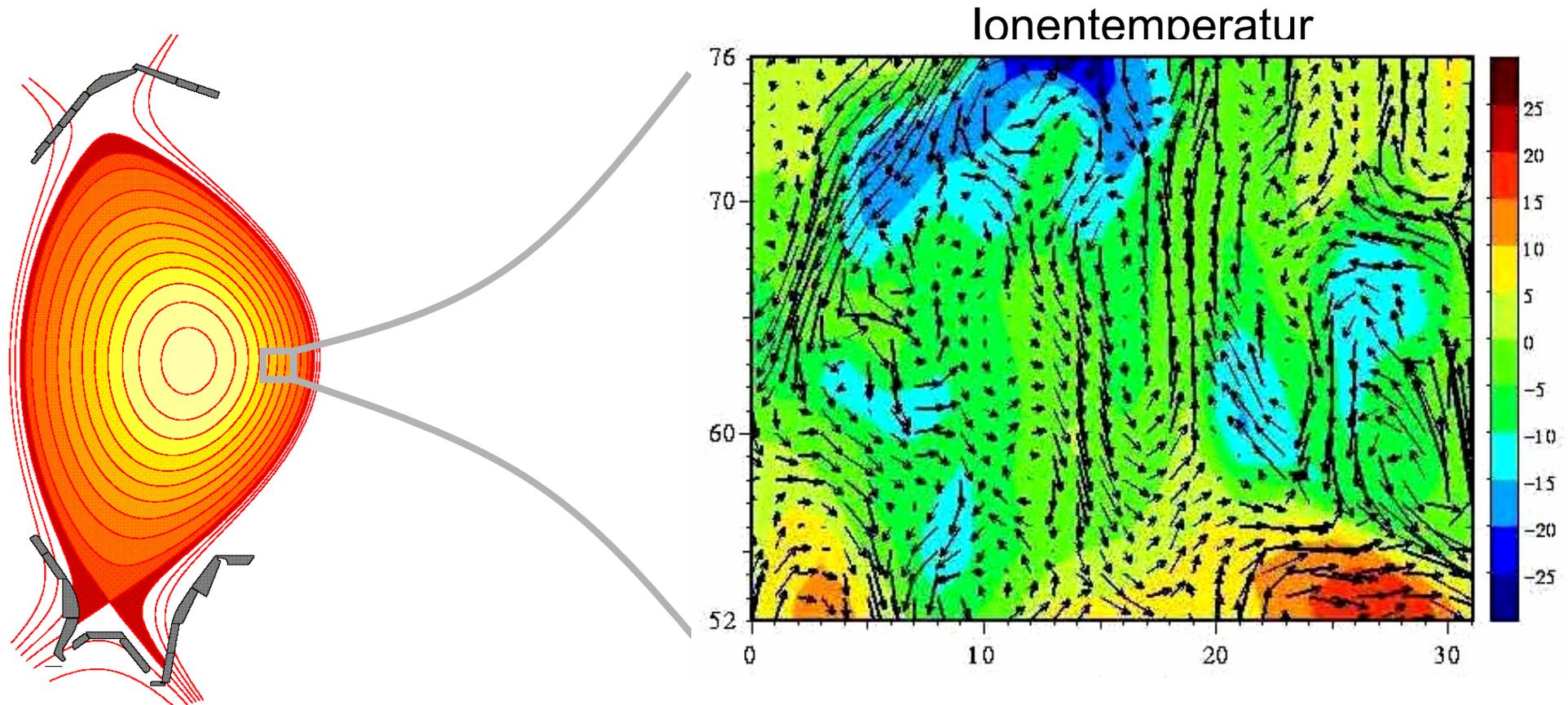
- Beachtung der Inhomogenität des Magnetfeldes
 - Es gibt im Magnetfeld auf Bananebahnen gefangene Teilchen
 - Versatz bei Stößen ist Bananenbreite
- $\chi, D \approx 0.01 \text{ m}^2/\text{s}$



→ Tokamak von $a \approx 20 \text{ cm}$ sollte zünden (!)

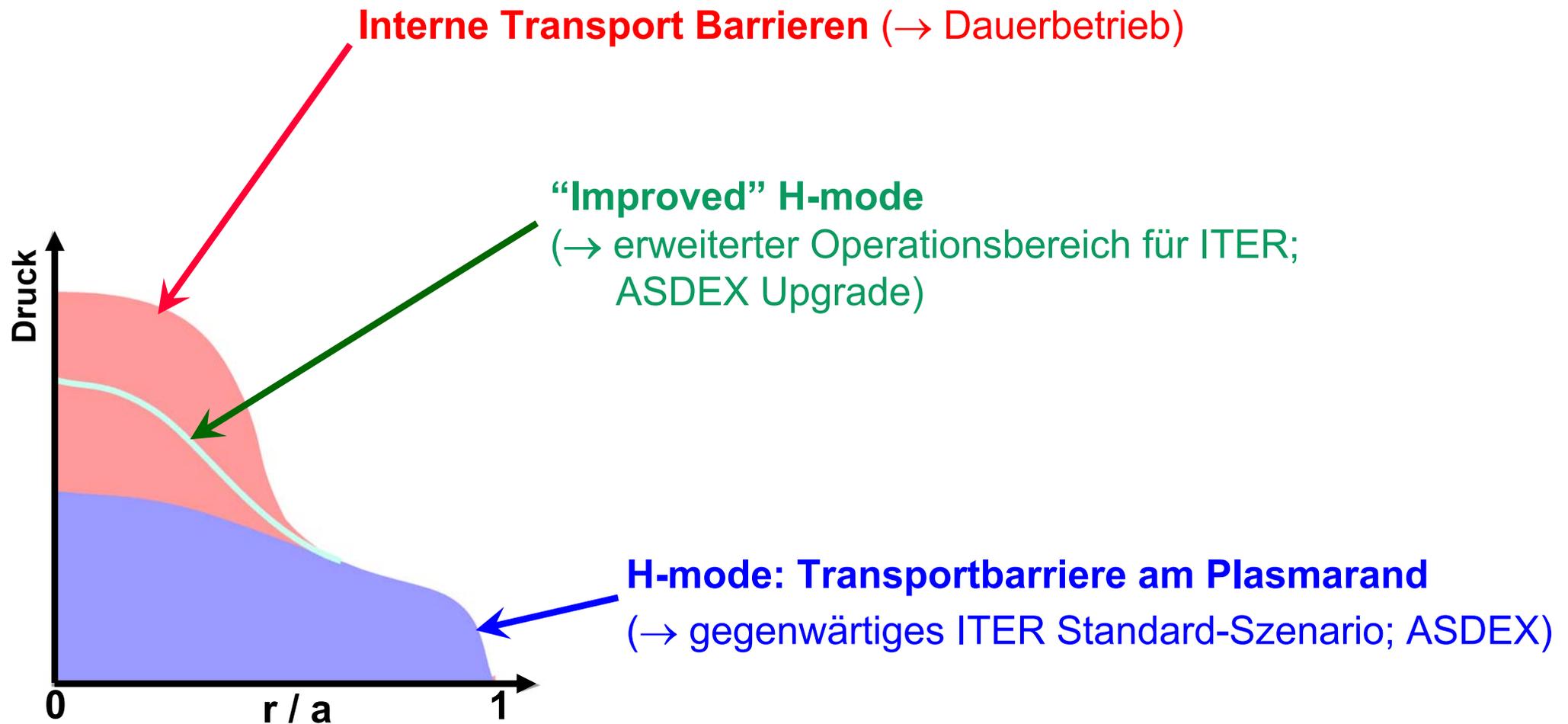
Experimentelles Ergebnis:

- Turbulenter (anomaler) Transport: $\chi, D \approx 1 \text{ m}^2/\text{s}$

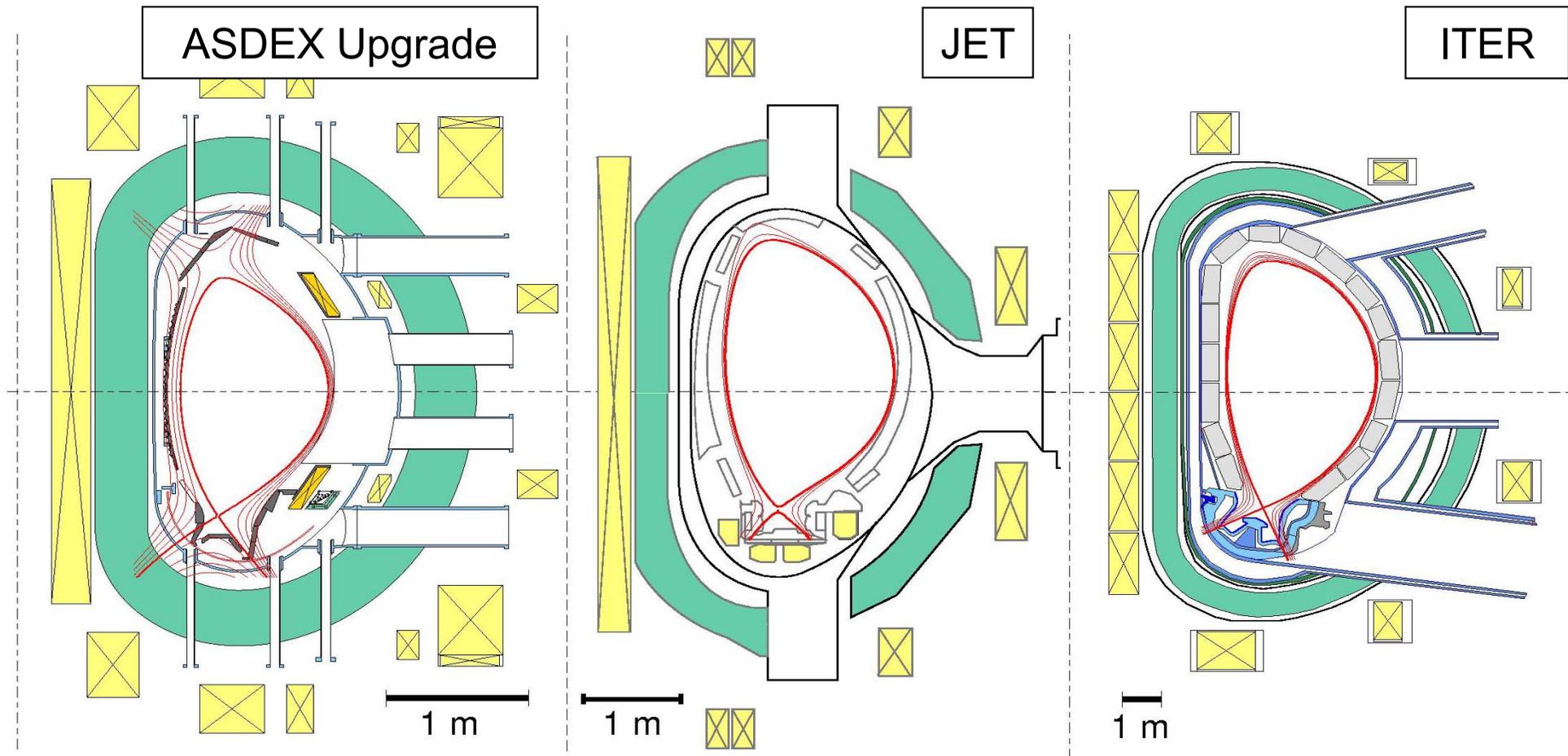


ASDEX Upgrade

→ Zündung für $R = 8 \text{ m}$, $a = 2 \text{ m}$ erwartet



AUG und JET: Extrapolation zu ITER



ASDEX Upgrade und JET bilden eine "Leiter" zu ITER:

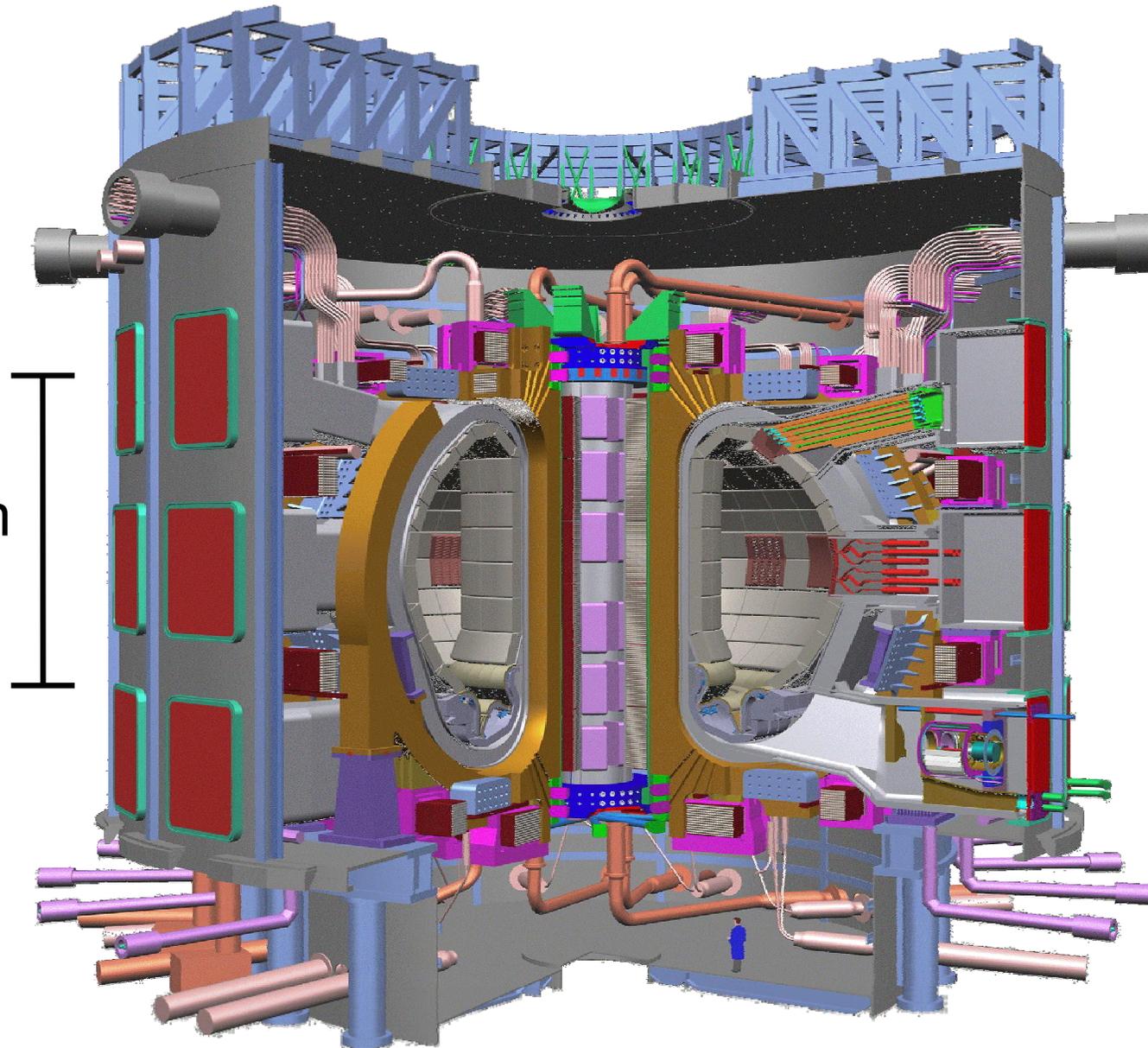
- ähnliche geometrische Konfiguration
- unterschiedlich in Größe und damit in dimensionslosen Parametern

ITER (lat. "der Weg")

→ Demonstration der physikalischen und technologischen Machbarkeit der Fusion als Energiequelle

12 m

Großer Radius: 6,2 m
Kleiner Radius: 2 m
Fusionsleistung: 500 MW
Pulsdauer: ≥ 300 s
Kosten: 4,7 Mrd. €



ITER: Physikalische und Technologische Ziele

■ Physik-Ziele:

- ein Energie lieferndes („brennendes“) Plasmas zu erzeugen, bei dem die in der Fusionsreaktion emittierten α -Teilchen die dominante Heizquelle bilden ($Q \geq 10$)
- stationäre Bedingungen mit nicht-induktiven Stromtrieb zu erreichen ($Q > 5$)
- das Plasma zur Zündung zu bringen wird nicht ausgeschlossen ($Q = \infty$; „advanced tokamak scenarios“)

■ Technologie-Ziele:

- Verfügbarkeit und Integration essentieller Fusionstechnologien prüfen, z.B.:
 - erste Wand testen
 - Blanket-Module zur Erbrütung von Tritium testen

ITER: Prototypenbau während der Entwicklung

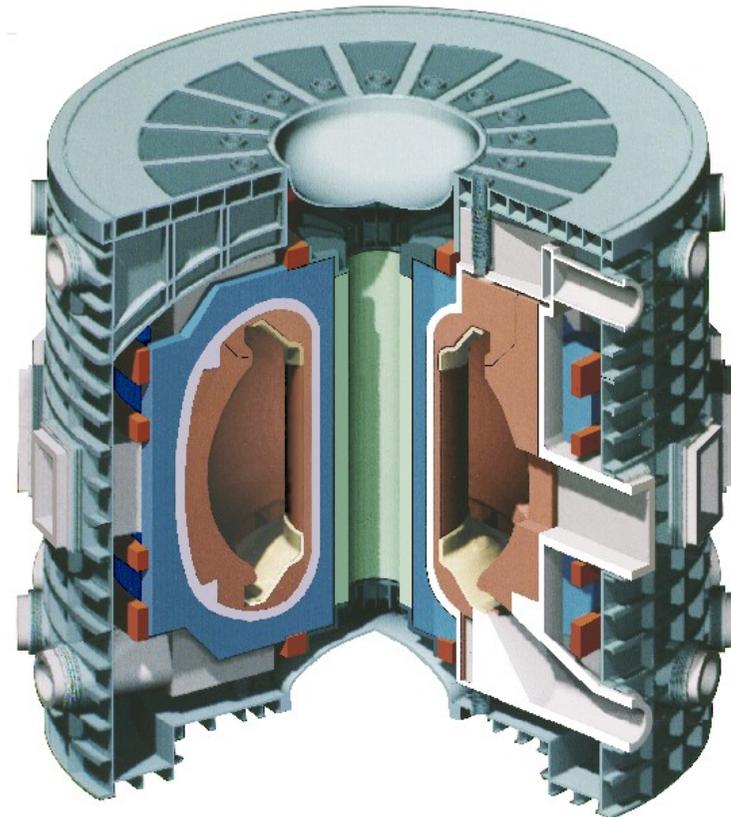
- Transformator-Modellspule
- Toroidalfeld-Modellspule
- Divertor-Kassette
- Plasmagefäß-Teilstück
- Blanket-Modul
- Fernbediente
Blanket-Handhabung
- Fernbediente
Divertor-Handhabung



ITER Toroidal-Modellspule,
Montage in der TOSKA Anlage

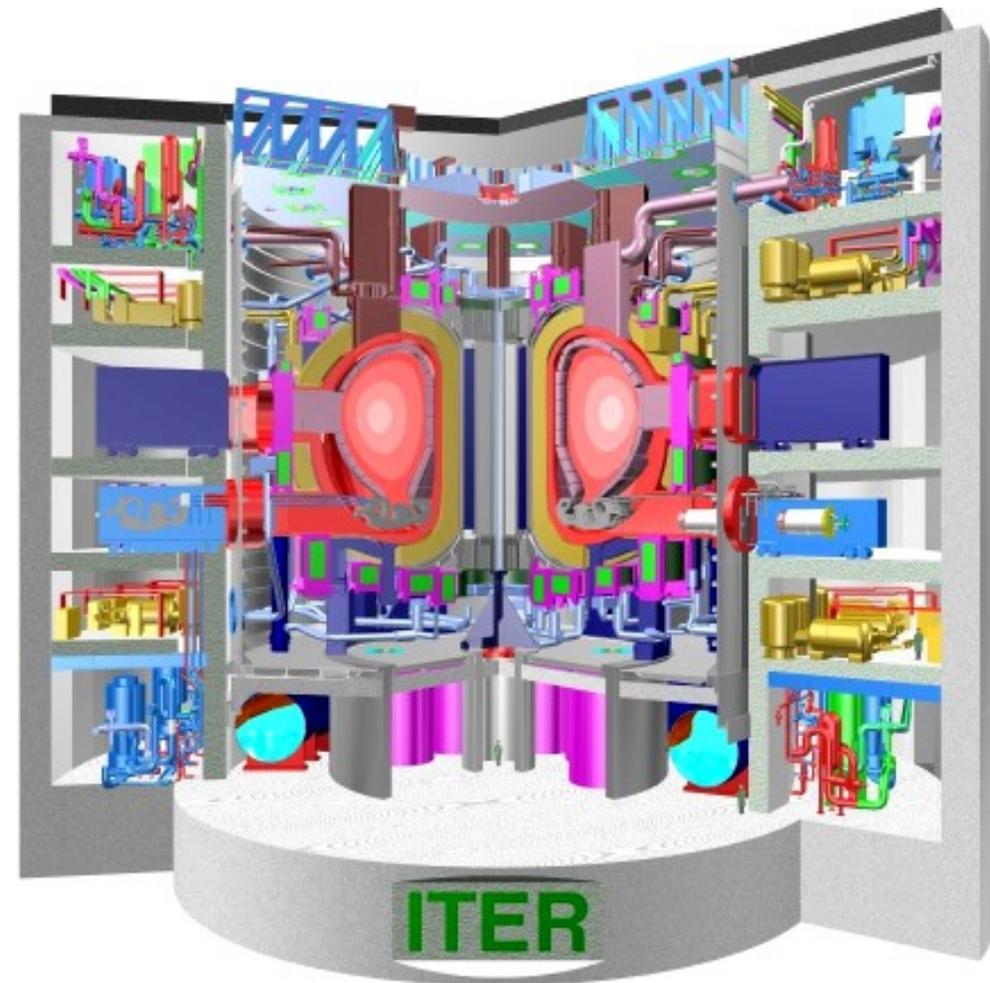
Geschichtliche Entwicklung des ITER-Projekts

- ITER entstammt einem Vorschlag von Premier Gorbachov an Präsident Reagan auf dem Genfer Gipfel der Supermächte vom November 1985.
- Europa, Japan, USA und die UdSSR begannen 1988 eine Zusammenarbeit zur Konstruktion des nächsten Fusions-experimentes unter der Schirmherrschaft der IAEA mit den „Conceptual Design Activities (CDA)“, beherbergt vom IPP Garching.
- Die CDA resultierte in einem Experiment mit:
 - $R = 6.0\text{m}$
 - $B = 4.85\text{T}$
 - $P_{\text{fus}} = 1000\text{MW}$
 - $t_{\text{Puls}} \geq 200\text{s}$
 - Kosten: \$6Mrd.



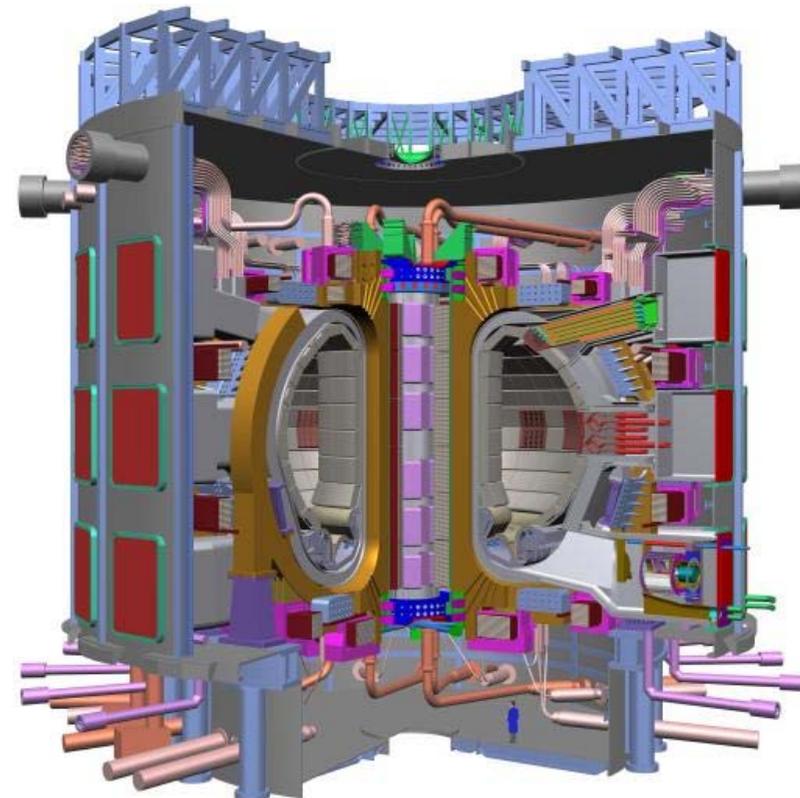
Geschichtliche Entwicklung des ITER-Projekts

- Die ITER-Parteien vereinbarten 1992, mit den „Engineering Design Activities (EDA)“ an 3 „joint work sites“ fortzufahren: Garching, Naka (Japan) und San Diego (USA).
- Nach mehreren Iterationen ergaben die EDA 1998:
 - $R = 8.1\text{m}$
 - $B = 5.6\text{T}$
 - $P_{\text{fus}} = 1500\text{MW}$
 - $t_{\text{Puls}} \geq 400\text{s}$
 - Kosten: \$5.46\text{Mrd (Dollars von 1989)}



Geschichtliche Entwicklung des ITER-Projekts

- Zum „Final Design Report“ der EDA 1998 gaben die USA Zweifel zum Ausdruck über die Zündfähigkeit des Experiments und die hohen Kosten des Projekts.
- Aufgrund einer Machbarkeitsstudie über eine kleinere, kostenreduzierte Version von ITER mit geringeren technischen Anforderungen wurde die EDA bis 2001 verlängert, trotz der Entscheidung der USA 1999, sich aus dem ITER-Projekt zurückzuziehen.
- Neuer ITER-Entwurf 2001:
 - $R = 6.2\text{m}$
 - $B = 5.3\text{T}$
 - $P_{\text{fus}} = 500\text{MW}$
 - $t_{\text{Puls}} \geq 400\text{s}$
 - Kosten: \$2.755Mrd.
 - (49% der Kosten des Entwurfs von 1998)



- 08/09. November 2001: 1. ITER-Verhandlungsrunde (N1). Partner: EU, Russland, Japan und Kanada.
- 2002-2003 Vier Standortvorschläge: Spanien, Frankreich, Kanada und Japan.
- 2003 China, Süd-Korea stoßen dazu, Kanada scheidet aus. Europa entscheidet sich für den Standort Cadarache in Süd-Frankreich. Kompensation für Spanien!
- 2004: Weitere Gespräche über technische Fragen und das Konzept eines „Broader Approach“, aber keine Fortschritte zur Standortfrage.
- November 2004: Sitzung des „Wettbewerbs“-Rats: Lösung mit allen sechs Partnern angestrebt, aber Alleingang der EU in Cadarache mit möglichst vielen Beteiligten auch ins Auge gefasst.
- Genfer Vereinbarung am 05. Mai 2005: Finanzierung, Management, Hauptquartier-Funktion, gewichtete Abstimmungen, „Broader Approach“, DEMO.
- 28. Juni 2005: ITER wird in Cadarache gebaut! Die sechs Partner *„share the common understanding that (a) ITER should be implemented by an international organisation....(b) ITER shall be sited at Cadarache....(c) sharing of costs: host 50%, others 10% each....(d) Broader Approach open to other Parties“*.



Cadarache, Frankreich
Forschungsinstitut der CEA nahe Aix-en-Provence

ITER-Entscheidung in der Presse

Frankfurter Allgemeine Zeitung - 1. Seite

Fusionsreaktor Iter wird in Cadarache gebaut

Frankreich setzt sich gegen Japan durch / Bulmahn: Lukrative Aufträge für deutsche Firmen

Die Welt

Kraft des Sonnenfeuers

In Frankreich wird eines der **bedeutendsten Experimente** der Gegenwart lanciert: Der Kernfusionsreaktor Iter, zehn Milliarden Euro teuer, soll die Energieprobleme der **Menschheit** lösen. Die Bauzeit beträgt zehn Jahre

Westdeutsche Allgemeine Zeitung, WAZ

Der internationale Kernfusionsreaktor Iter wird für zehn Mrd Euro gebaut

Die Sonne im Kasten

SCIENCE
FUSION RESEARCH

ITER Finds a Home—With a Whopping Mortgage

Stuttgarter Nachrichten

Frankreich bekommt Zuschlag für Fusionsreaktor

20 000 Arbeitsplätze sollen entstehen – Baukosten für Demonstrationskraftwerk bei 4,5 Milliarden Euro

Die Welt

Deutsche Fusionsforscher führend

1500 Wissenschaftler arbeiten bereits heute am Zukunftsthema

NATURE

Japan consoled with contracts as France snares fusion project

Berliner Zeitung

Hoffen auf die Energie der Zukunft

Der größte internationale Kernfusionsreaktor wird in Südfrankreich gebaut / Erfolg für die EU

Welt am Sonntag

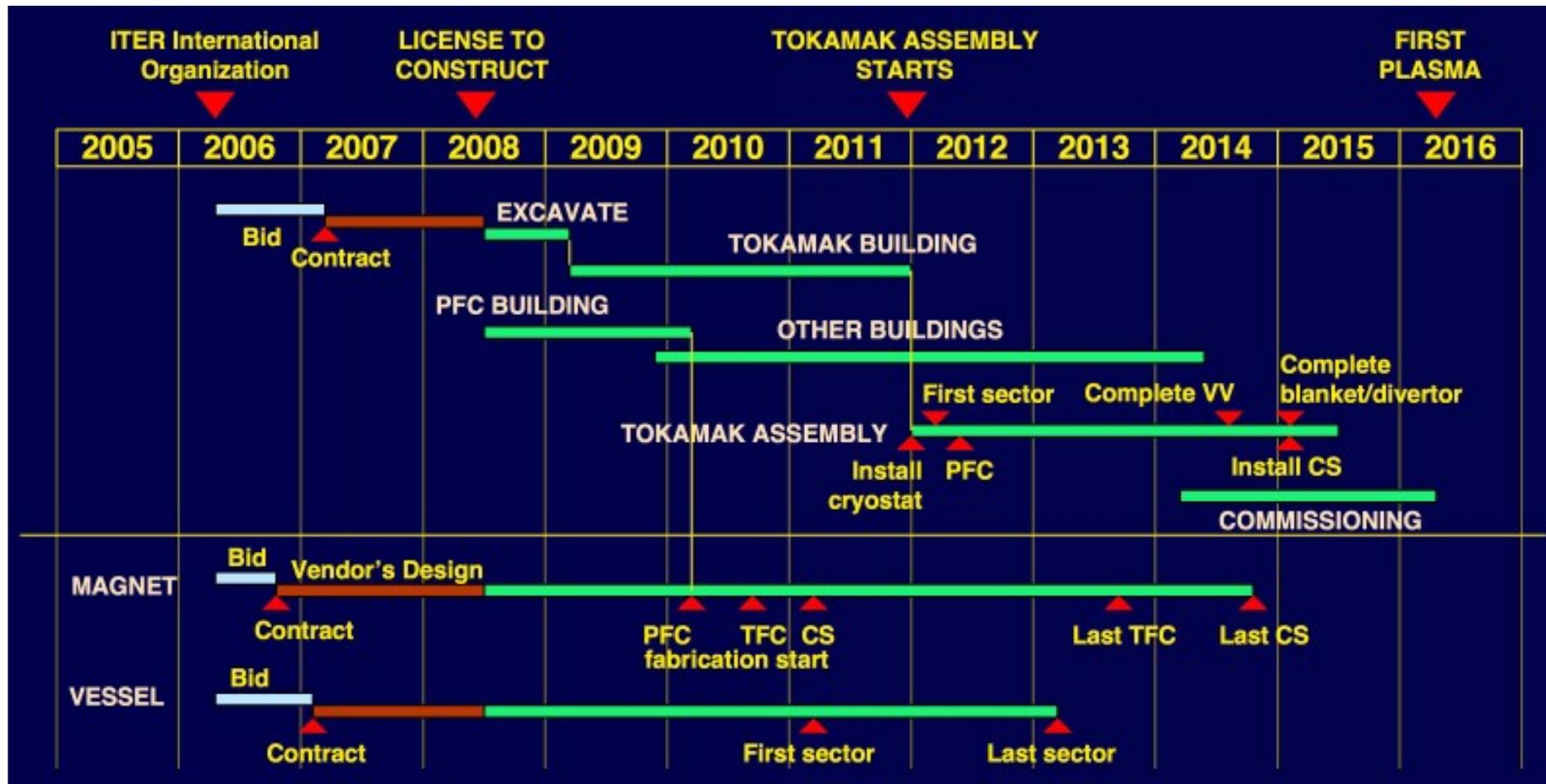
Der experimentelle Fusionsreaktor Iter wird in Südfrankreich gebaut. Das erste kommerzielle Fusionskraftwerk könnte in 50 Jahren ans Stromnetz gehen

Sonnenfeuer kommt nach Europa



ITER-Verhandlungen

- Juli 2005 Antrag Indiens, dem ITER-Projekt beizutreten.
- September 2005: ITER-Verhandlungen werden wieder aufgenommen.
Ziel: ITER Implementing Agreement bis Ende 2005.
Noch einige strittige Punkte!



Der Weg zum Kraftwerk

