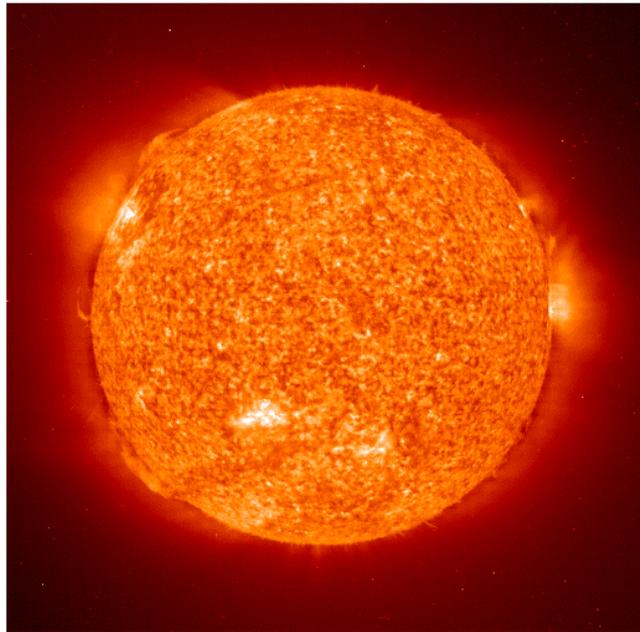


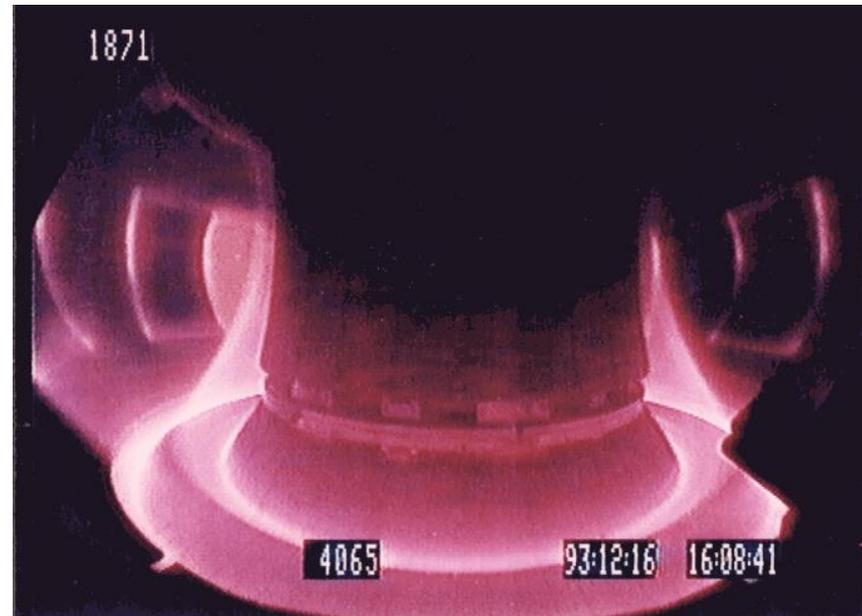
Kernfusion – der Weg von ITER zum Fusionskraftwerk



Hartmut Zohm

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

85748 Garching



Sitzung des AKE der DPG

Bad Honnef

02.10.2020



Gliederung

- 1.) Kernfusion mit magnetischem Einschluss
- 2.) Aktueller Stand
- 3.) ITER – Stand und Perspektiven
- 4.) Der Weg zum Fusionskraftwerk
- 5.) Zusammenfassung

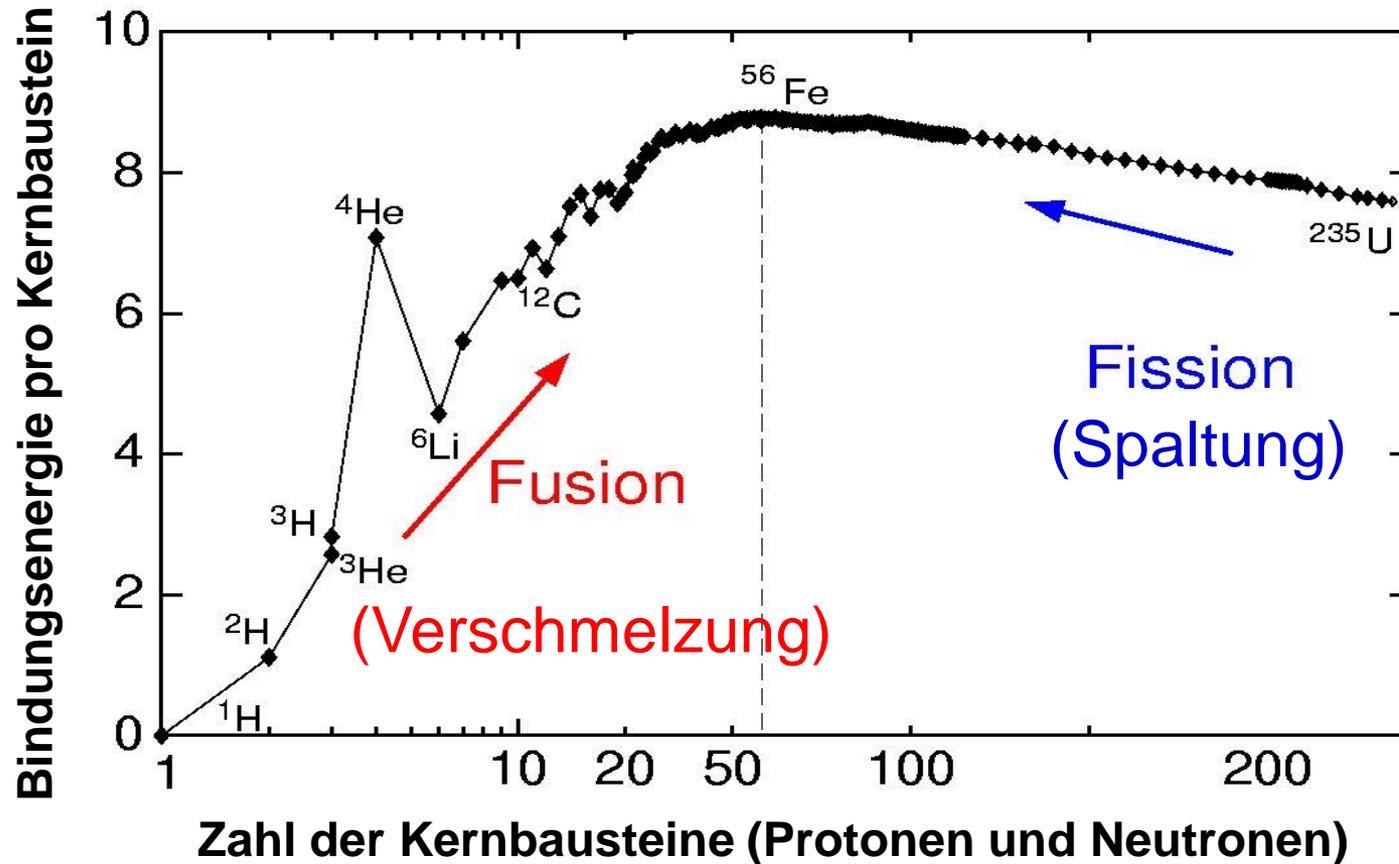


Gliederung

- 1.) Kernfusion mit magnetischem Einschluss
- 2.) Aktueller Stand
- 3.) ITER – Stand und Perspektiven
- 4.) Der Weg zum Fusionskraftwerk
- 5.) Zusammenfassung



Energiegewinn durch Kernreaktionen



Mit steigender Anzahl der Kernbausteine überwiegt elektrische Abstoßung

- Bindungsenergie hat ein Maximum bei mittlerer Massenzahl
- Energiegewinnung durch Fusion leichter oder Spaltung schwerer Kerne



Kernfusion erfordert Annäherung der Teilchen

Für Energiegewinnung durch Kernfusion müssen die Reaktionspartner

- oftmals miteinander stoßen können \Rightarrow Notwendigkeit des Einschlusses
- eine thermische Energie von 10-20 keV haben (entspricht 100-200 Mio °C)

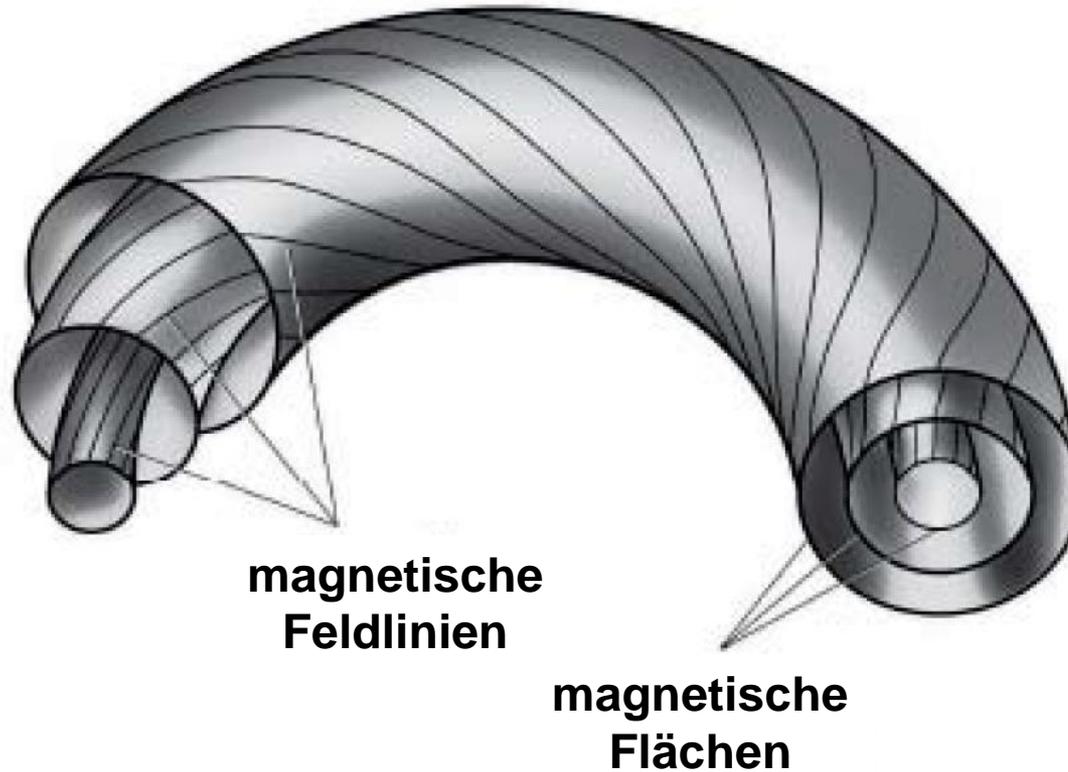


Bei solchen Temperaturen liegt ein Wasserstoffgas als *Plasma* vor

- vollständig ionisiert – Gas aus geladenen Teilchen



Aufgabe der Fusionsforschung ist es, ein mehrere 100 Mio° heißes Plasma zu erzeugen und einzuschließen

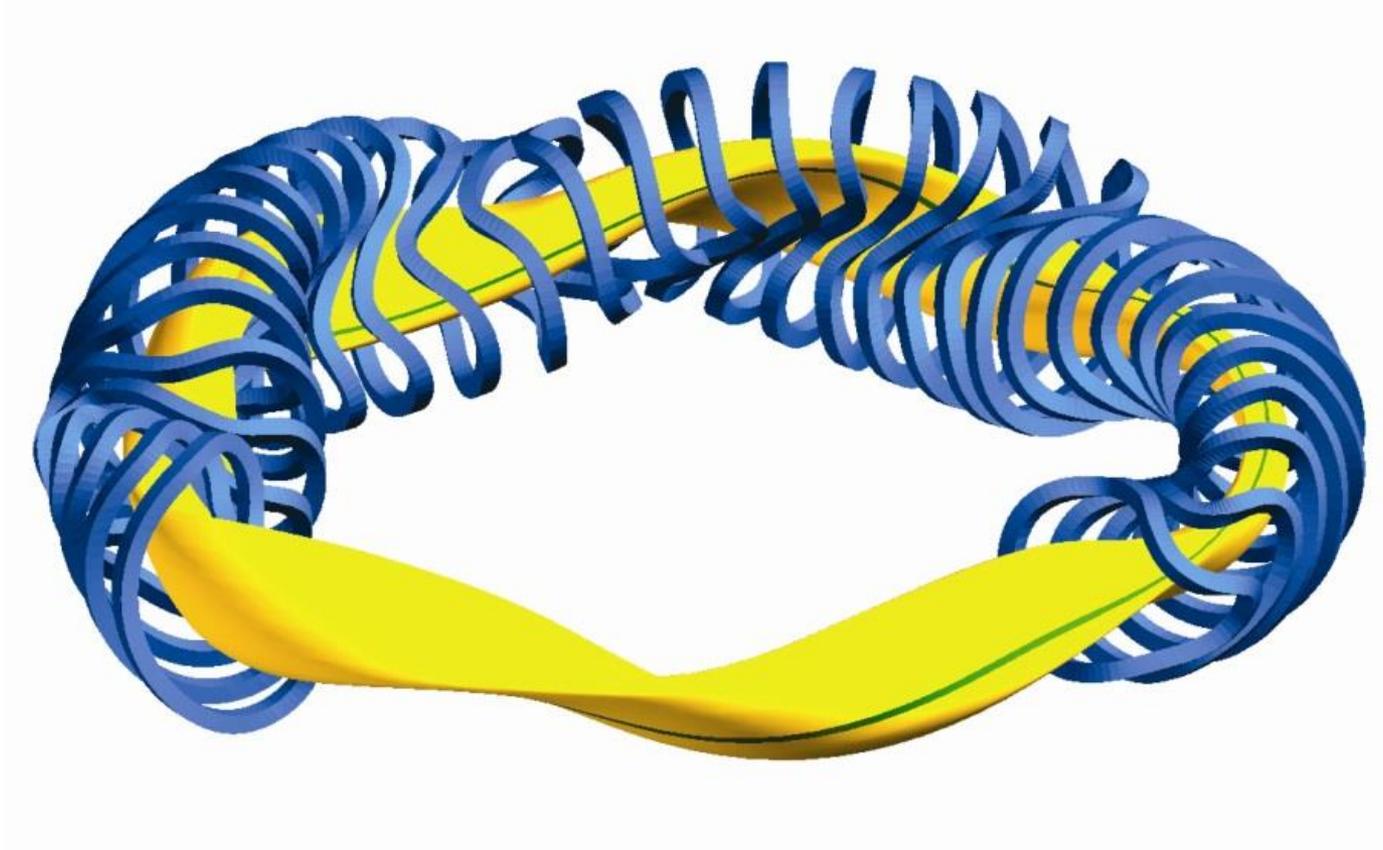


Zur Vermeidung von Endverlusten wird ein magnetischer Torus verwendet

- helikal verschraubte Feldlinien minimieren Teilchendiffusion



'Stellarator': (komplizierte) Magnetfeldstruktur durch externe Spulen



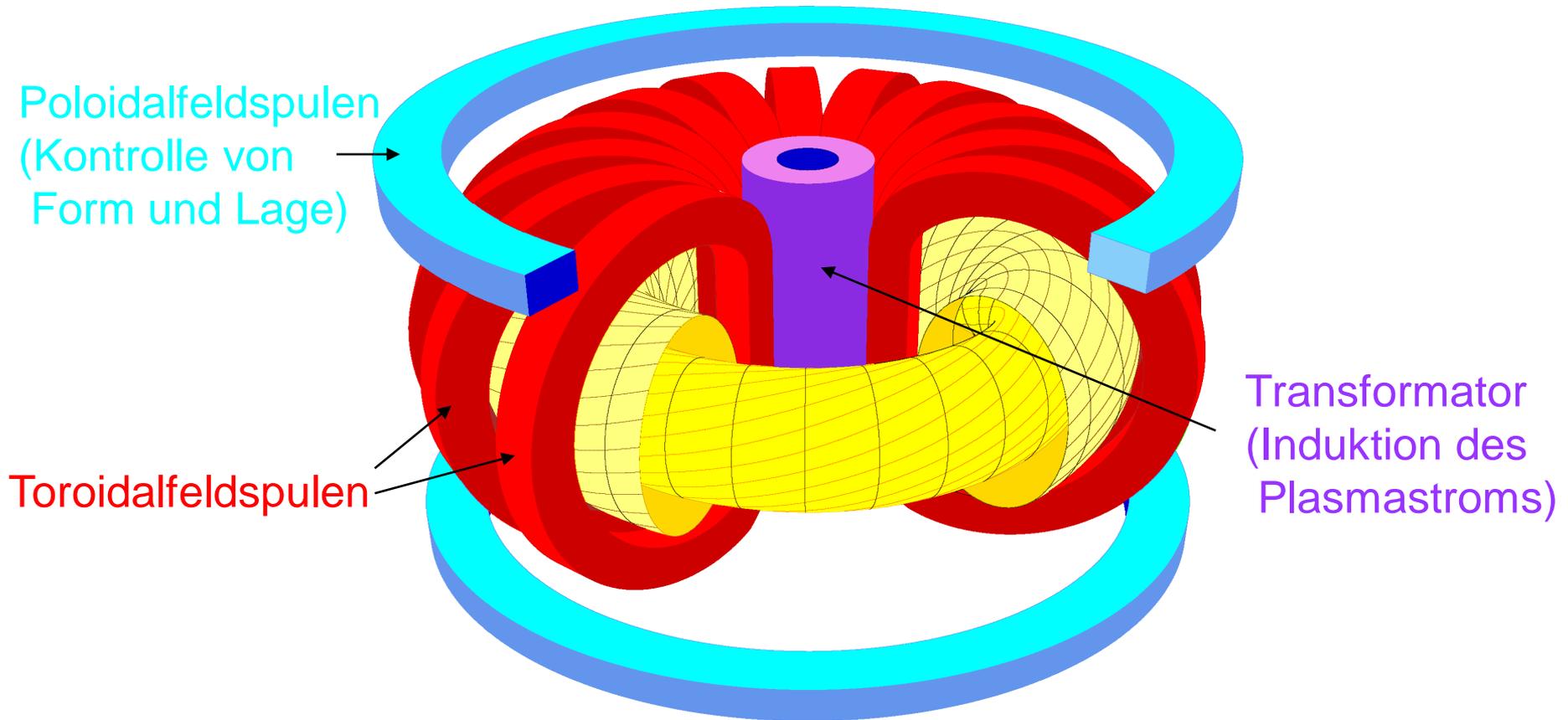
Beispiel: Wendelstein 7-X (MPI Greifswald)



Magnetischer Einschluss von Plasmen



'Tokamak': Magnetfeld z.T. durch interne Ströme erzeugt (Transformator)



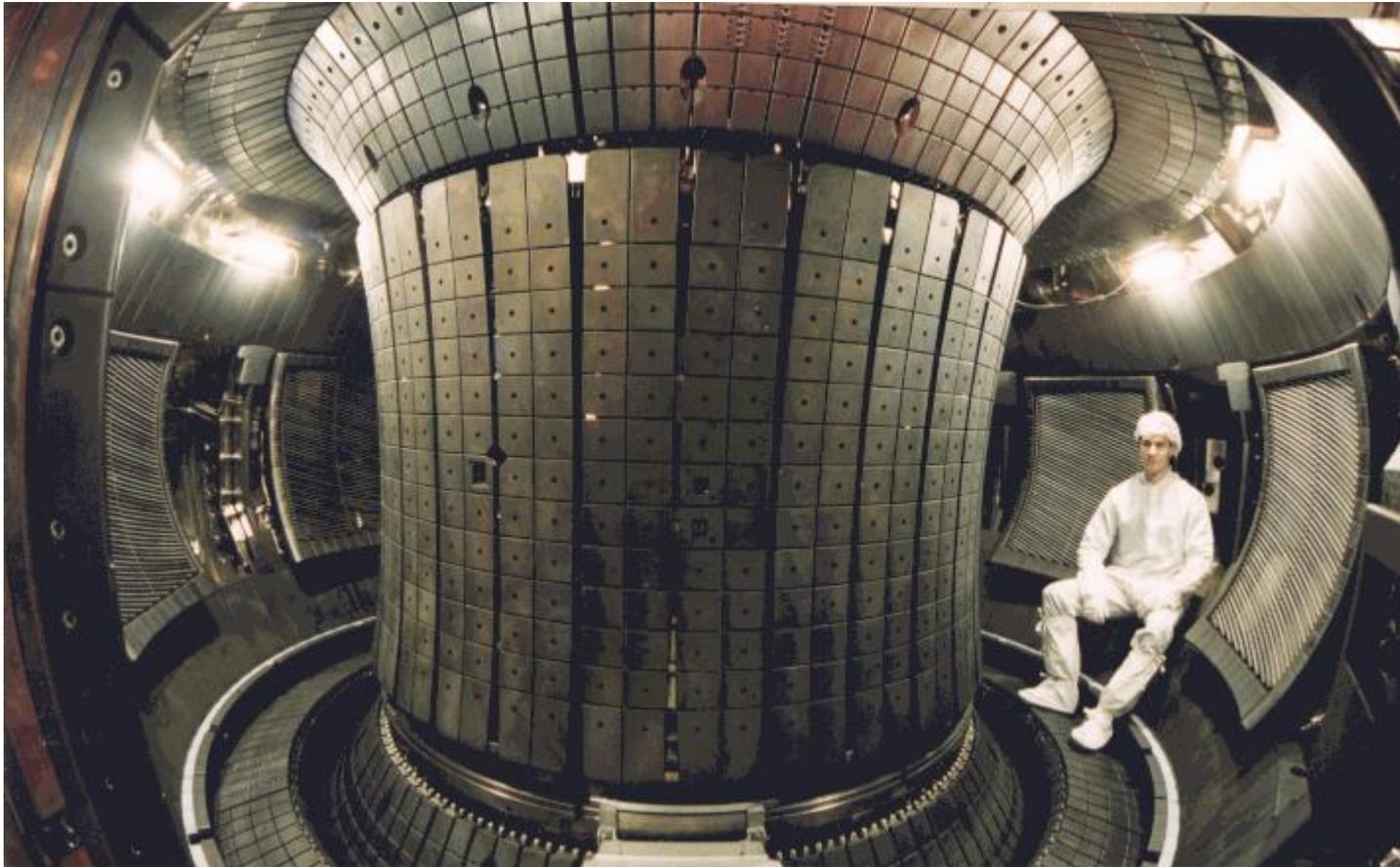
Beispiel: ASDEX Upgrade (MPI Garching)



Magnetischer Einschluss von Plasmen



'Tokamak': Magnetfeld z.T. durch interne Ströme erzeugt (Transformator)



Beispiel: ASDEX Upgrade (MPI Garching)



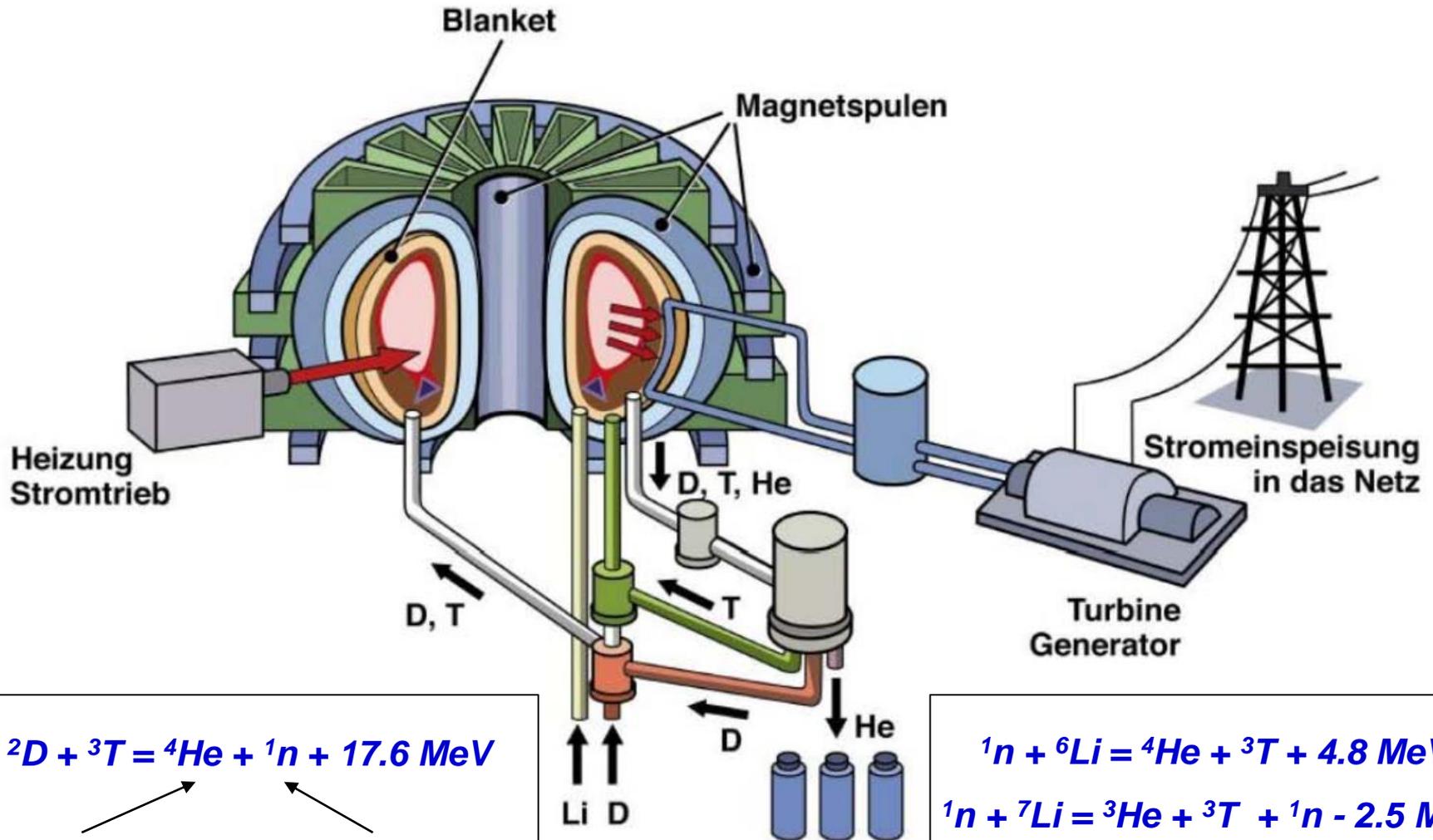
'Tokamak': Magnetfeld z.T. durch interne Ströme erzeugt (Transformator)



Beispiel: ASDEX Upgrade (MPI Garching)



Funktionsschema eines Fusionskraftwerks



He-Kerne
heizen den
Brennstoff

Neutronen
heizen die Wand
des Reaktors



Neutronen erzeugen T aus Li in
der Wand (Brennstoffkreislauf)



Geeignet für Grundlast/Ausregelung (nicht vom Wetter abhängig)

- komplementär zu stochastischen Regenerativen wie Wind und Solar
- 'high grade heat' – auch für andere Anwendungen

Nachhaltige Energiequelle (Brennstoffe für viele Millionen Jahre vorhanden, ~ gleichmässig über den Erdball verteilt)

- Deuterium kann z.B. aus Meerwasser gewonnen werden
- Tritium wird im inneren Brennstoffkreislauf aus Li gewonnen
- Lithium ist in der Erdkruste ausreichend vorhanden

Fusionskraftwerke werden günstige Umwelteigenschaften haben

- keine CO₂ Emission
- keine unkontrollierte Kettenreaktion
- Nachwärme kann Anlage nicht zerstören (keine Kernschmelze)
- aktivierte Strukturmaterialien brauchen keine Endlagerung

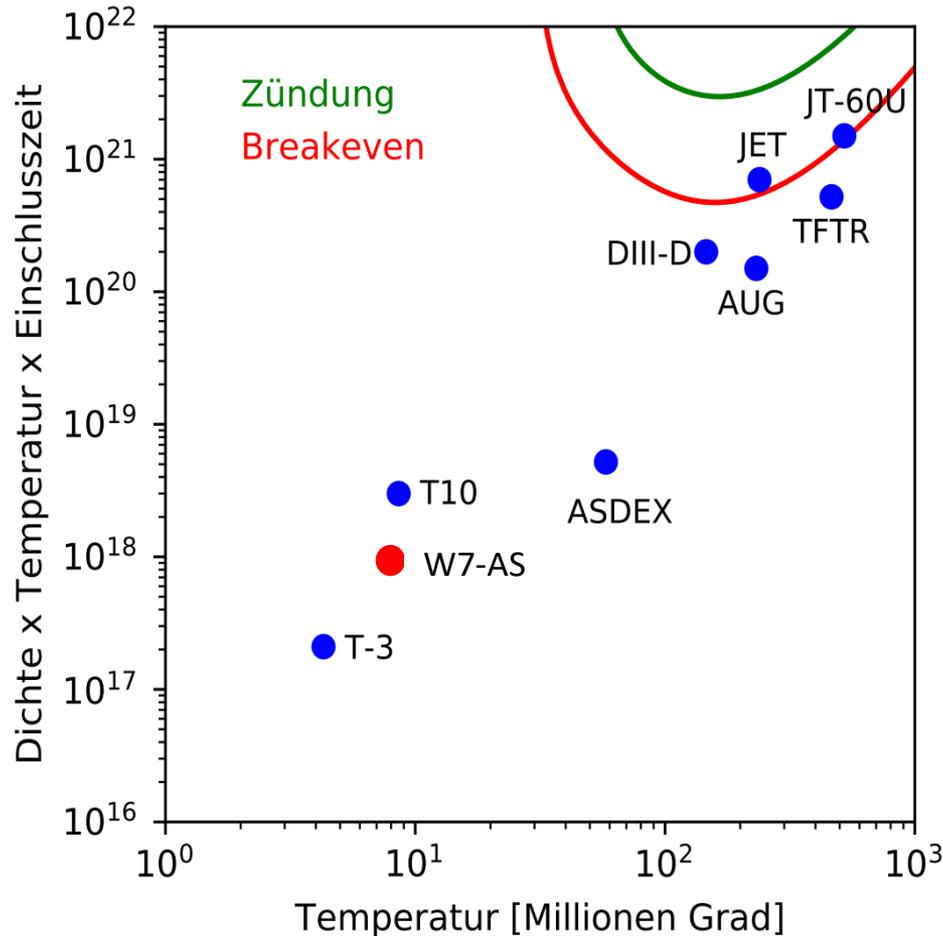


Gliederung

- 1.) Kernfusion mit magnetischem Einschluss
- 2.) **Aktueller Stand**
- 3.) ITER – Stand und Perspektiven
- 4.) Der Weg zum Fusionskraftwerk
- 5.) Zusammenfassung



Magnetischer Einschluss - Zielparameter



Zündbedingung:

Fusionsleistung > Wärmeverluste

Führt zu Bedingung an $nT\tau_E$

n – Teilchendichte

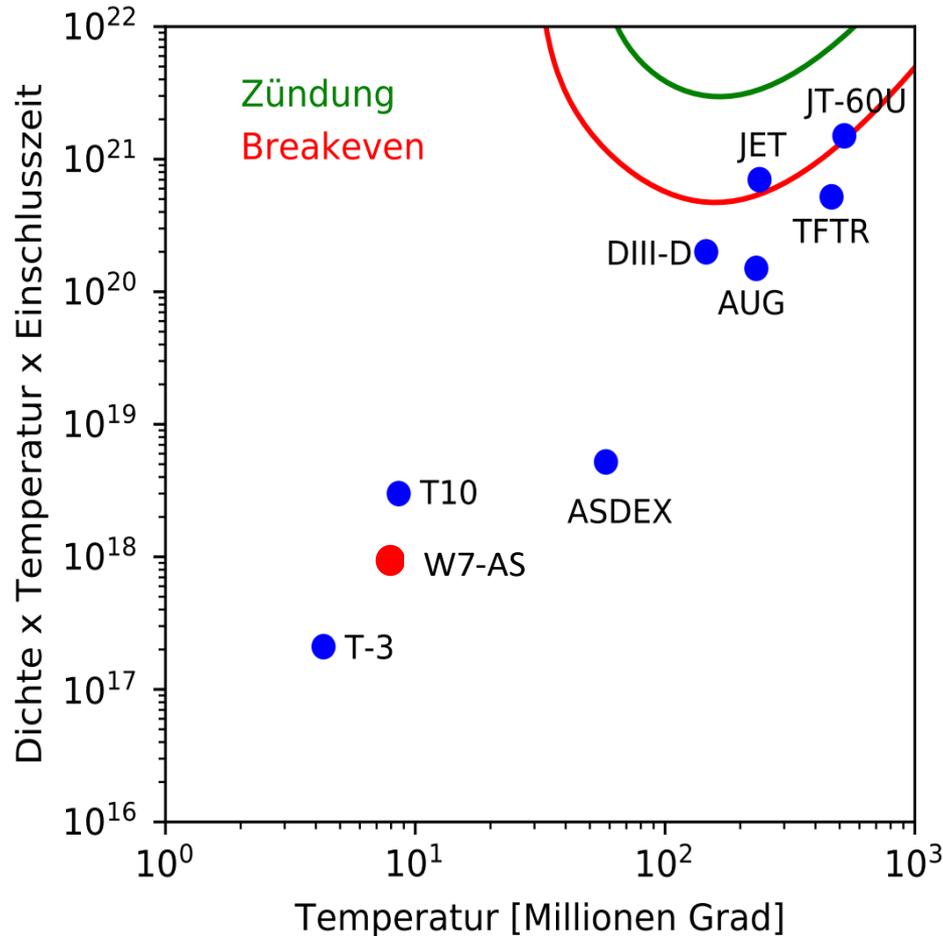
T – Plasmatemperatur

τ_E – Energieeinschlußzeit
(Maßzahl für Wärmeisolation)

„Tripelprodukt“ $nT\tau_E$ muss
Minimalwert übersteigen



Magnetischer Einschluss - Zielparameter



Zur Zündung notwendig:

- hohe Temperatur:

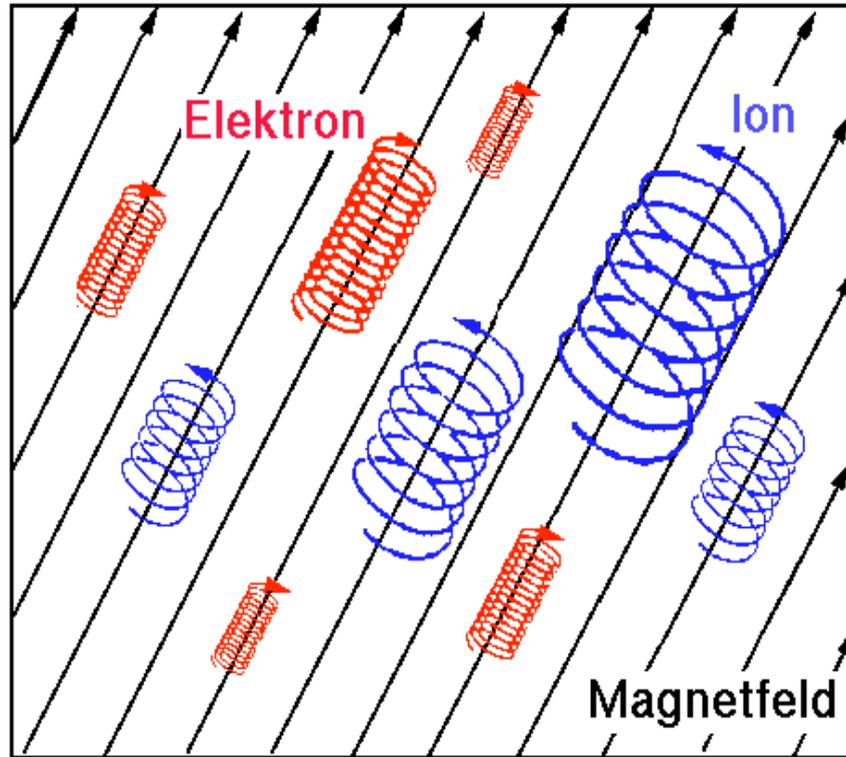
400 Mio. °C erreicht 😊

- ‚hohe‘ Teilchendichte:

$10^{20} / \text{m}^3$ erreicht 😊

- gute Wärmeisolation:

$\tau_E < 1 \text{ s}$ erreicht 😞



Einfacher Ansatz:

- Verluste durch Stöße zwischen Teilchen
- Tokamak von $R = 0.15$ m sollte zünden (!)

Die (traurige) Realität:

- Zündung für $R > 6-7$ m
- Energietransport durch Turbulenz bestimmt

Wärmeisolation durch turbulente Verluste bestimmt – eines der zentralen Themen der fusionsorientierten Plasmaphysik



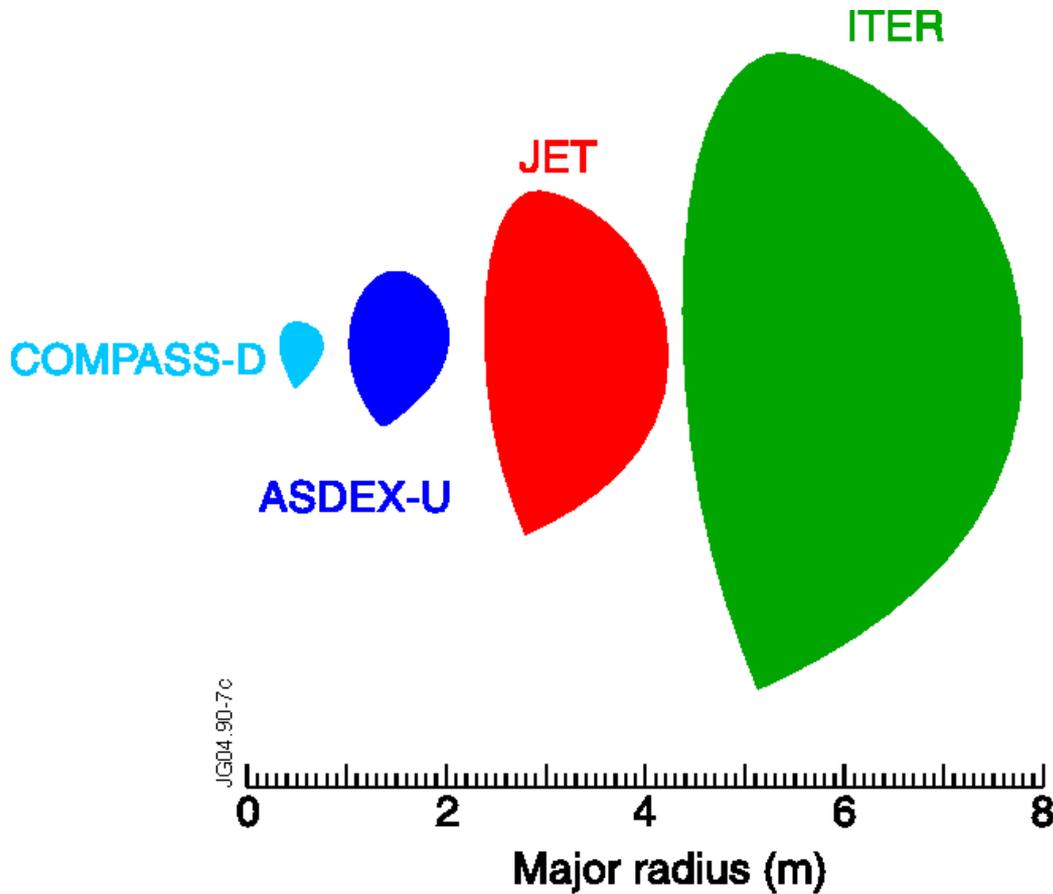
Global Gyrokinetic Simulation of
Turbulence in
ASDEX Upgrade



gene.rzg.mpg.de

Transport durch gradientengetriebene Turbulenz verursacht

- starke Gradienten von Temperatur und Dichte führen zu Mikroinstabilitäten
- Mikroinstabilitäten bilden turbulenten Zustand
- turbulente Zellen transportieren Wärme und Teilchen nach aussen



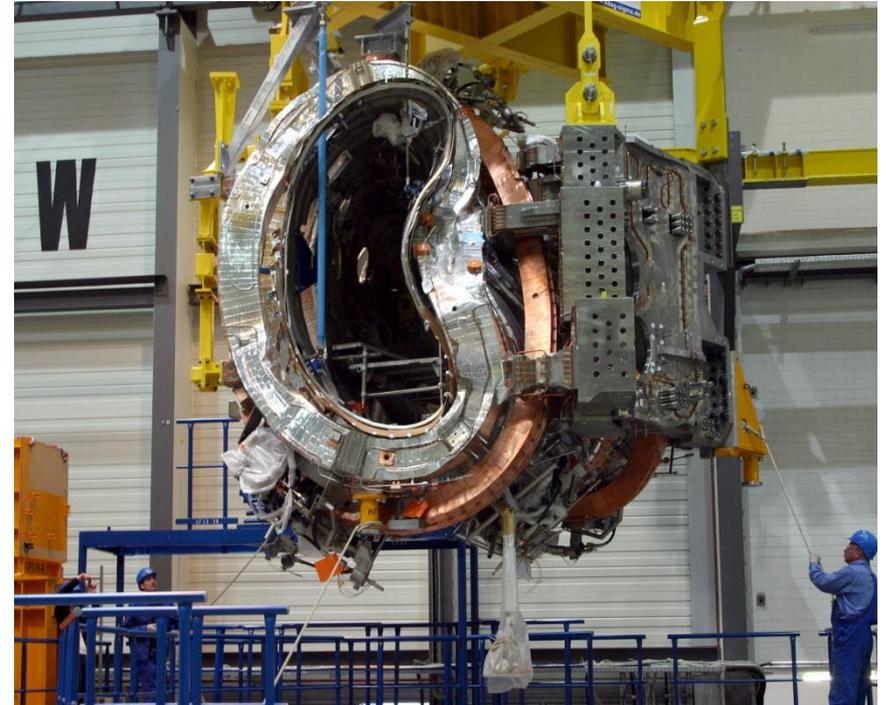
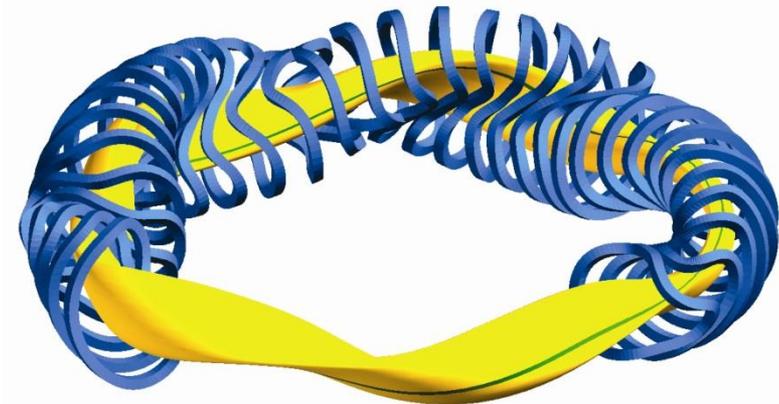
Für diffusiven Prozess:

- Wärmeisolation wächst mit Plasmaquerschnitt

ASDEX Upgrade:
 $R = 1.65 \text{ m}$, $\tau_E = 100 \text{ ms}$

JET (GB):
 $R = 3 \text{ m}$, $\tau_E = 500 \text{ ms}$

ITER (F):
 $R = 6.2 \text{ m}$, $\tau_E = 3 \text{ s}$



Komplexe technologische Probleme wurden gelöst

- Betrieb von W7-X (seit 2/2016) soll Einschussgüte wie Tokamaks zeigen
- Stellaratoren sind inhärent stationär (Tokamaks nicht)

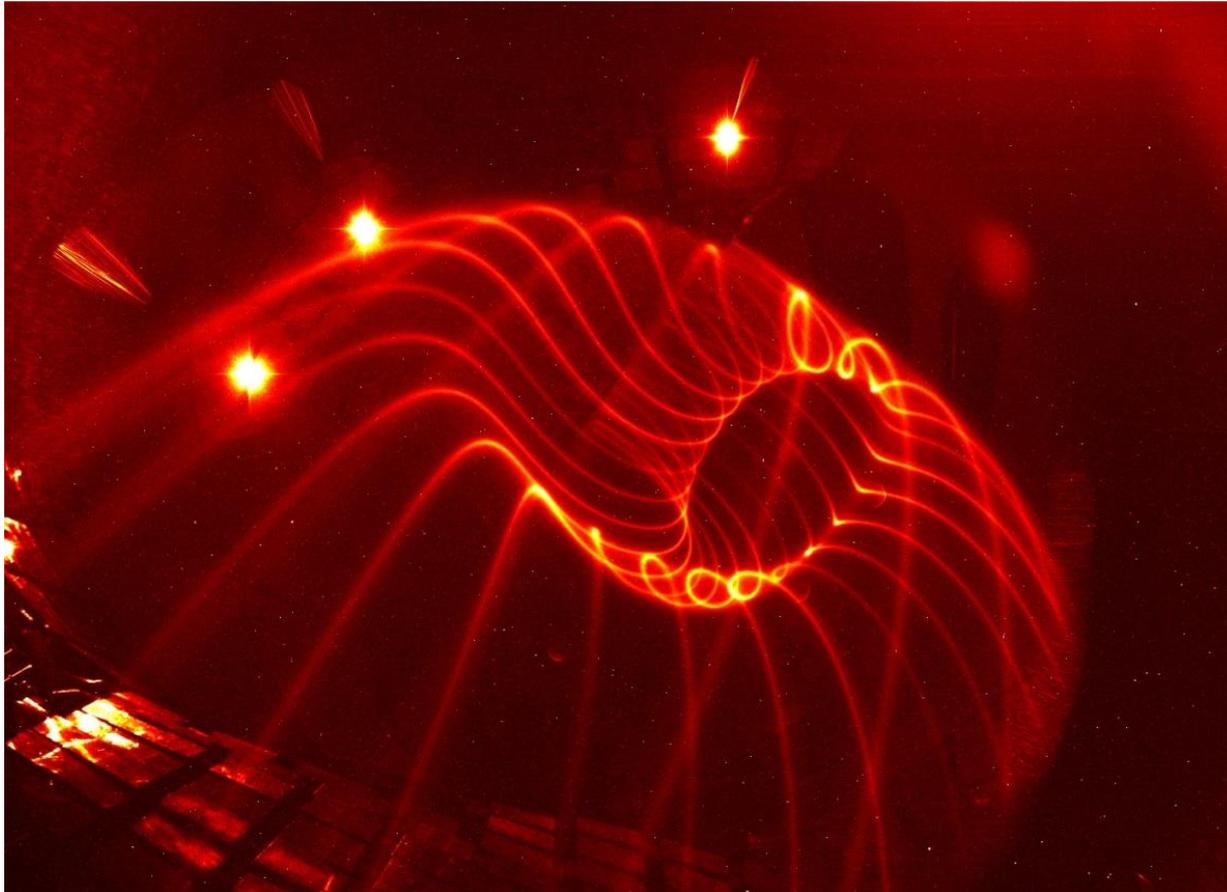


Mit Wendelstein7-X holen die Stellaratoren auf



Komplexe technologische Probleme wurden gelöst

- Betrieb von W7-X (seit 2/2016) soll Einschussgüte wie Tokamaks zeigen
- Stellaratoren sind inhärent stationär (Tokamaks nicht)

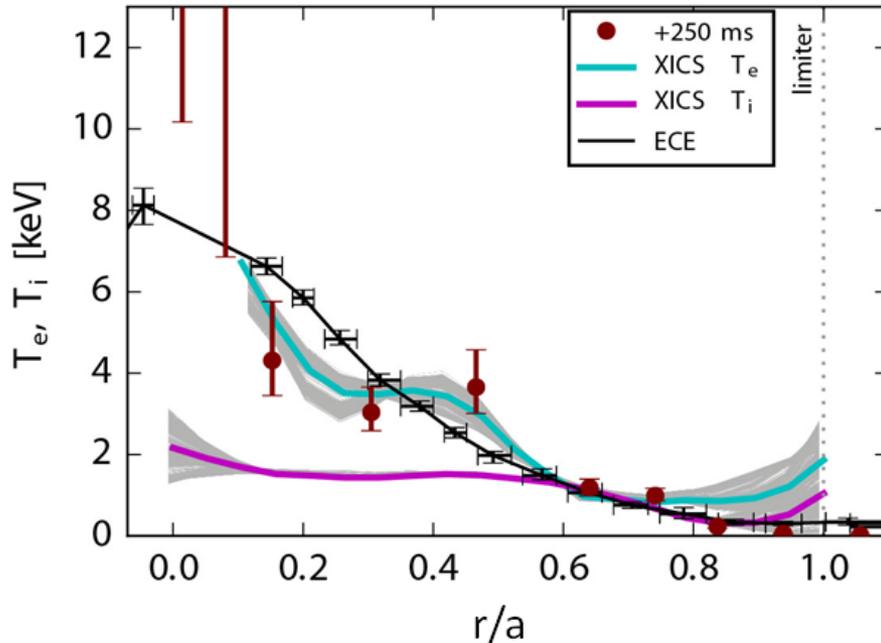


Komplexe technologische Probleme wurden gelöst

- Betrieb von W7-X soll Einschlussgüte wie Tokamaks zeigen
- Stellaratoren sind inhärent stationär (Tokamaks nicht)



Temperaturprofile



Wendelstein 7-X in Betrieb!

- alle technischen Systeme funktionieren wie geplant

Erste fusionsrelevante Plasmen

- $T_e \approx 10$ keV
- $T_i \approx 2$ keV ($n_e \sim 2 \dots 8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$)

Einschluss entspricht Erwartungen

- τ_E bis zu 200 msec

Nächste Schritte

- längere Entladungen, bis zu 30 Minuten
- Maschine im Umbau bis ~ Ende 2021 (stationäre Gefäßkühlung)
- Höhere Plasmaperformance (Ausbau der Plasmaheizungen)



30 Sekunden stationäre Plasmaentladung in W7-X



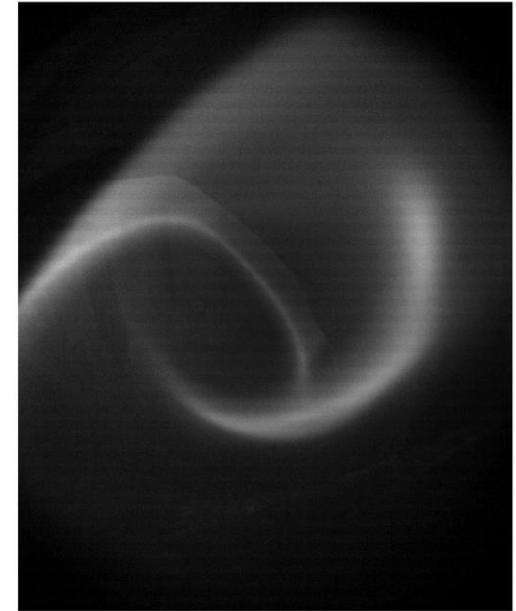
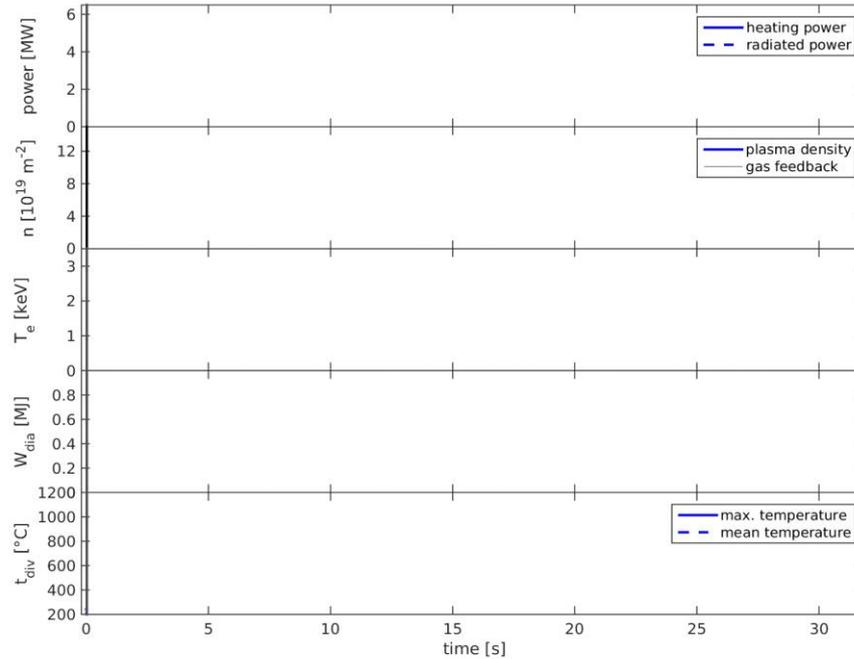
Heizleistung

Plasma Dichte

Elektronen
Temperatur

Plasma
Energie

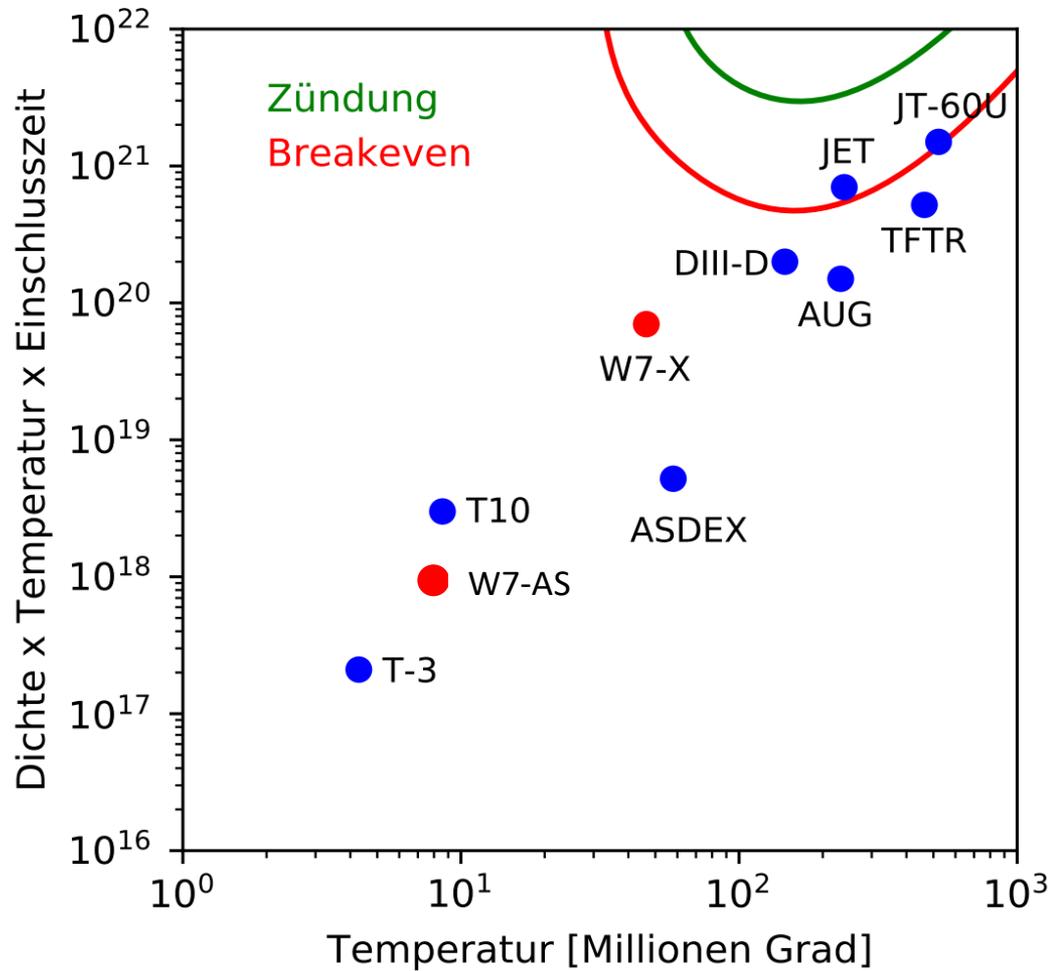
Divertor
Temperatur



W7-X Plasma stationär auf allen intrinsischen Zeitskalen 😊



Bisher erreichte Maximalwerte



Jahr 2018: Rekordwerte für das Tripelprodukt in Stellaratoren

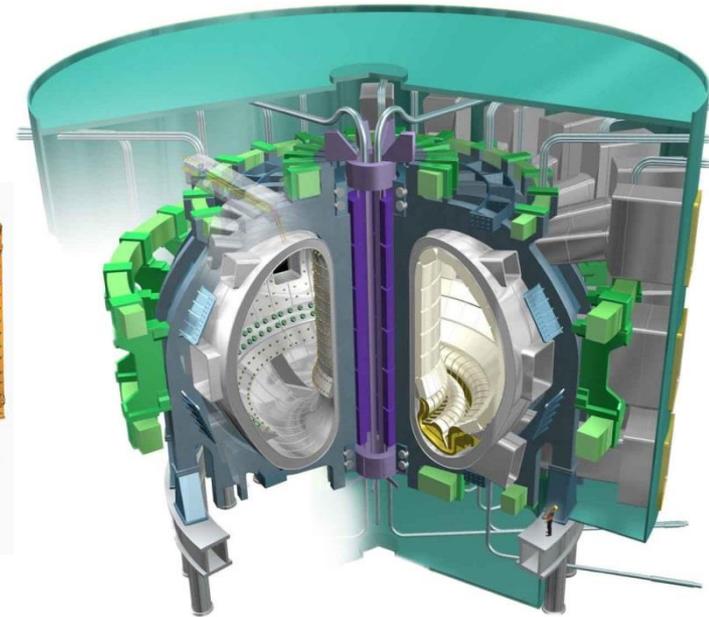
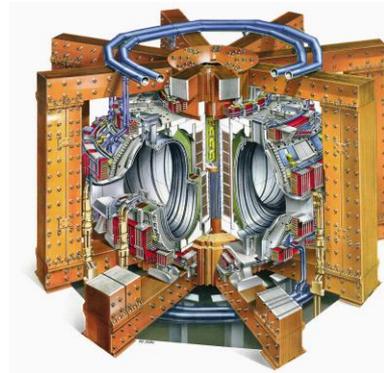


Gliederung

- 1.) Kernfusion mit magnetischem Einschluss
- 2.) Aktueller Stand
- 3.) ITER – Stand und Perspektiven
- 4.) Der Weg zum Fusionskraftwerk
- 5.) Zusammenfassung



Eine ‚Stufenleiter‘ von Tokamakexperimenten



ASDEX Upgrade

Durchmesser

3.3 m

Volumen

14 m³

Fusionsleistung

1.5 MW

(D-T äquivalent)

JET

6 m

80 m³

~ 16 MW_{th}

(D-T)

ITER

12 m

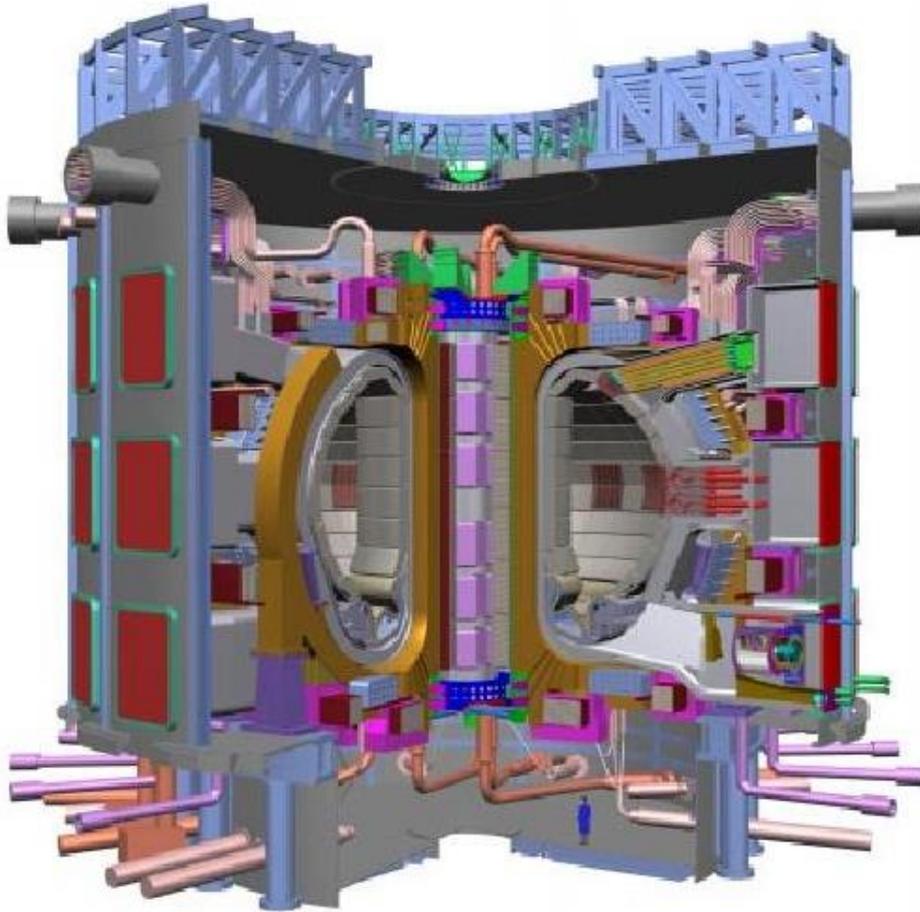
800 m³

~ 500 MW_{th}

(D-T)



ITER: Demonstration der α -(Selbst)heizung



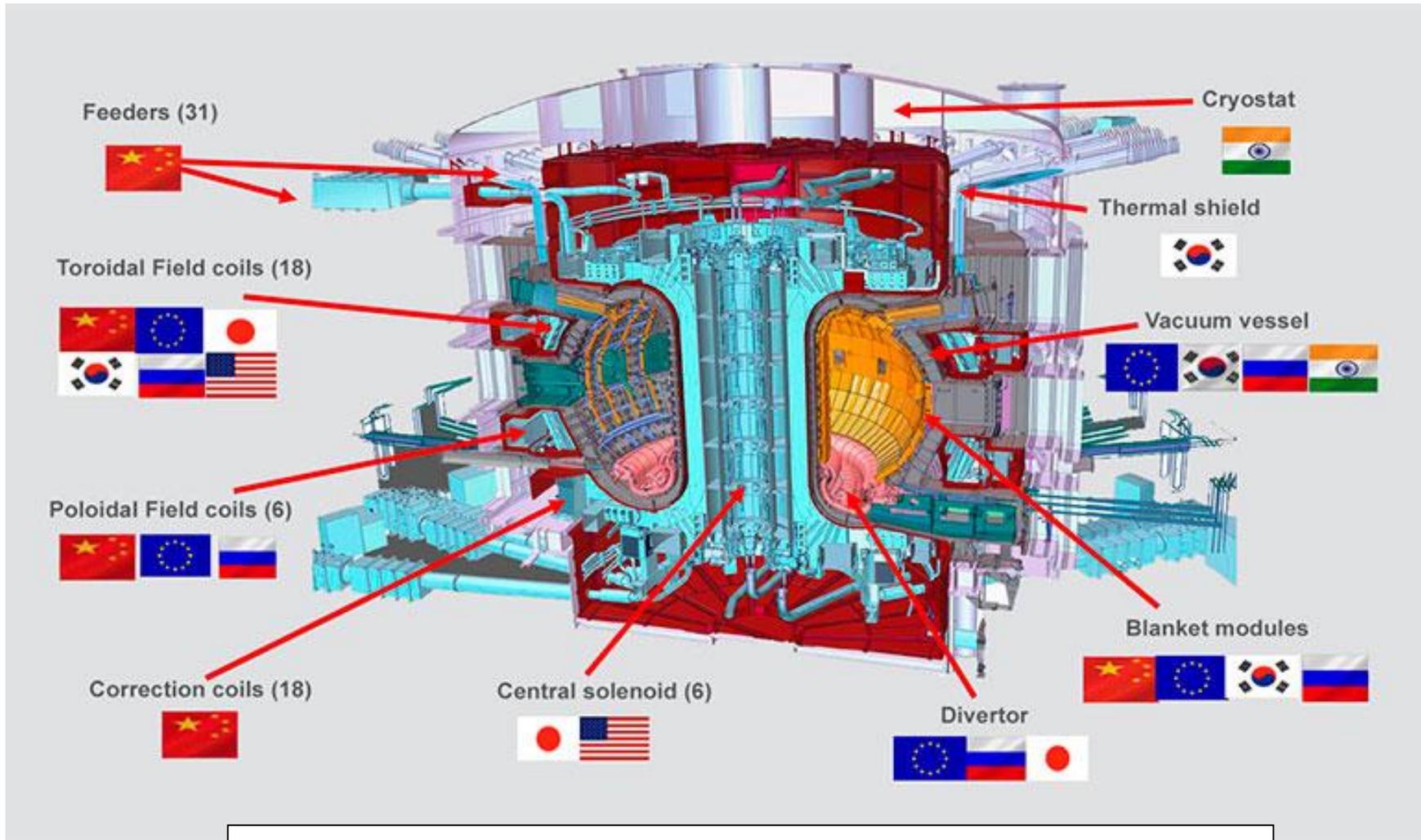
| | ITER |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Großer Radius | 6.2 m |
| Kleiner Radius | 2.0 m |
| Plasmastrom | 15 MA |
| Magnetfeld | 5.3 T |
| Leistungs- verstärkung Q | 10 (supraleitend) |
| Fusionsleistung | 500 MW |
| Brenndauer | 400 s |
| Externe Heizung | 50 MW |

Kosten: ~ 15 Milliarden €
Erfordert weltweite Anstrengung

ITER wird in Cadarache (F) durch Cn, EU, In, Jp, Ko, RF und die USA gebaut



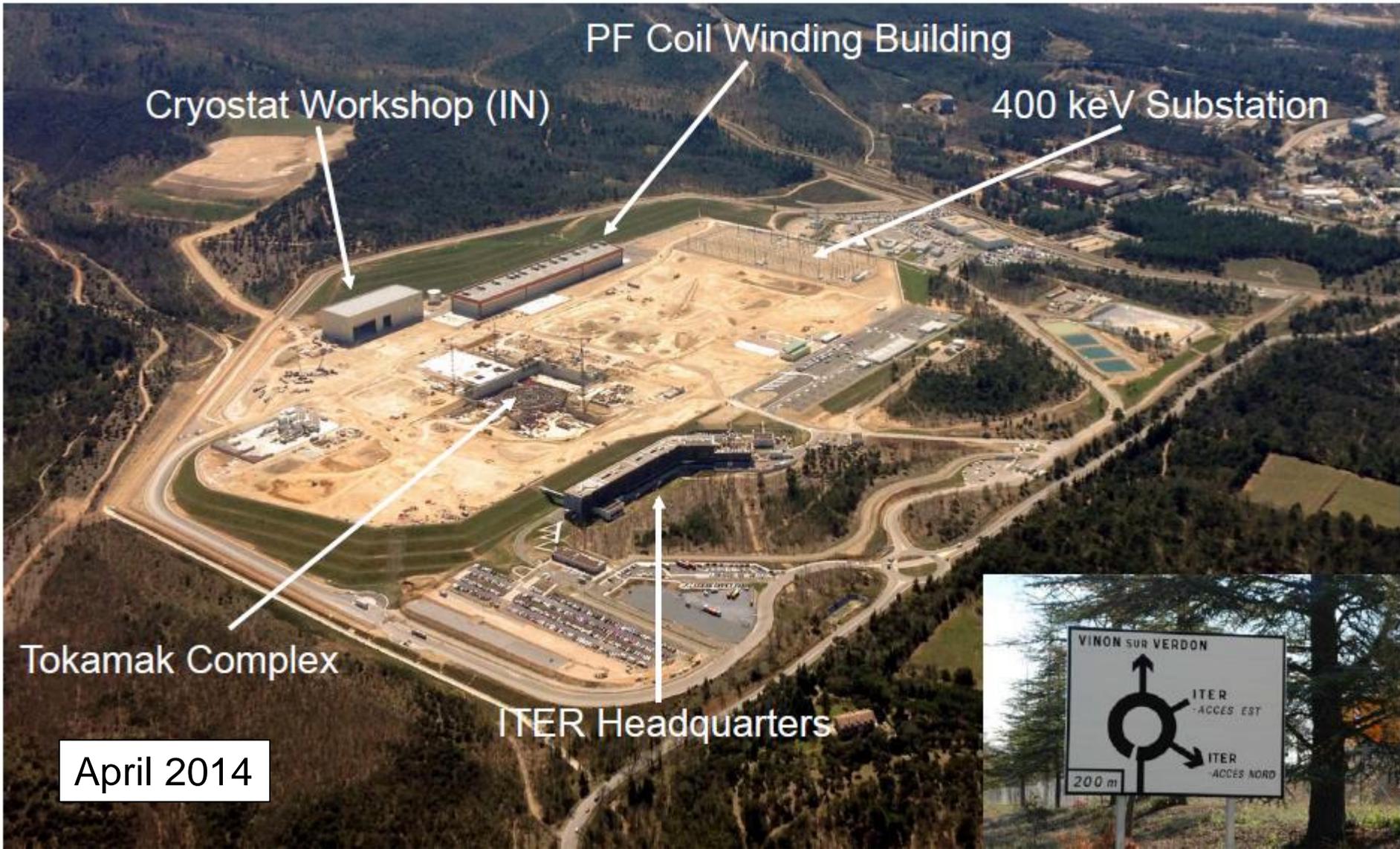
ITER Partner bauen ITER mit ‚In-kind‘ Leistungen



+ Ertüchtigung der Industrie in den Geberländern
- sehr komplexe Projektsteuerung



ITER Partner bauen ITER mit ‚In-kind‘ Leistungen



April 2014



ITER Partner bauen ITER mit ‚In-kind‘ Leistungen



August 2017



ITER Partner bauen ITER mit ‚In-kind‘ Leistungen



Juli 2018



ITER Partner bauen ITER mit ‚In-kind‘ Leistungen



Mai 2020



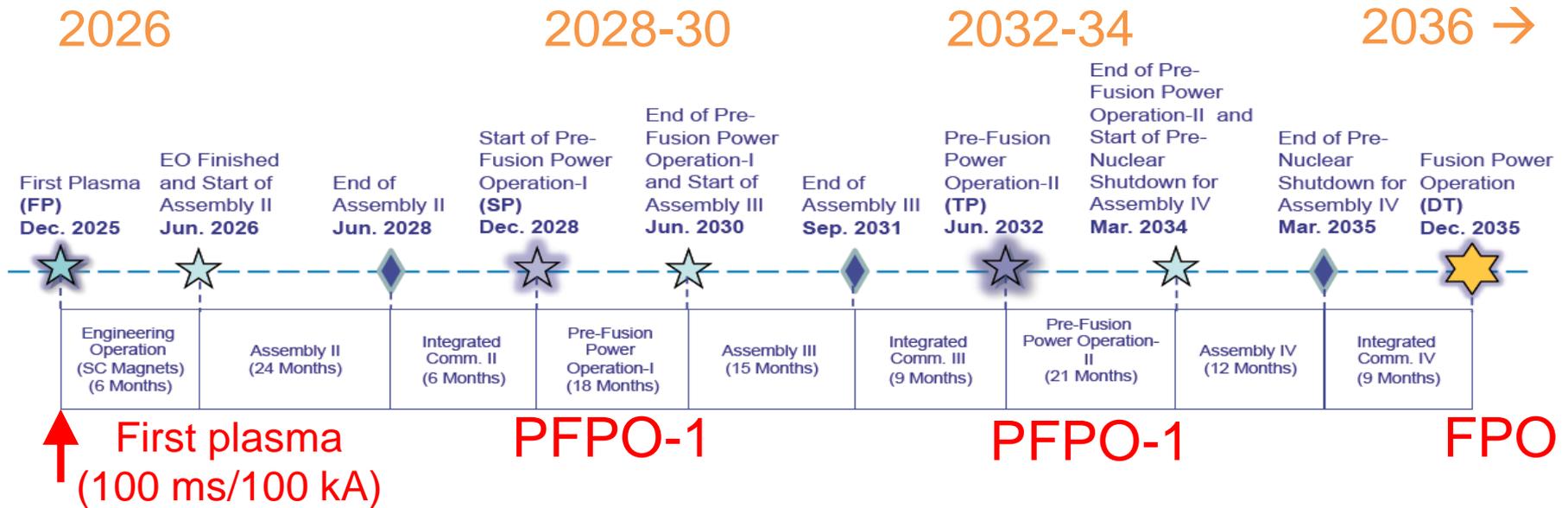
ITER Partner bauen ITER mit ‚In-kind‘ Leistungen



Geplante Fertigstellung ~ 2025



ITER: Zeitplan für den Betrieb („Research Plan“)



Der jetzige Plan sieht die Inbetriebnahme für ≥ 2025 vor

- schrittweise Steigerung der Plasmaparameter
- schrittweiser Ausbau (Komplettierung) der technischen Systeme
- zu Beginn mit einer nichtnuklearen Phase (H und He-Plasmen)
- D-T Betrieb zur Demonstration von $Q=10$ ab ca. 2035

Vorbereitung zum wissenschaftlichen Betrieb startet jetzt!

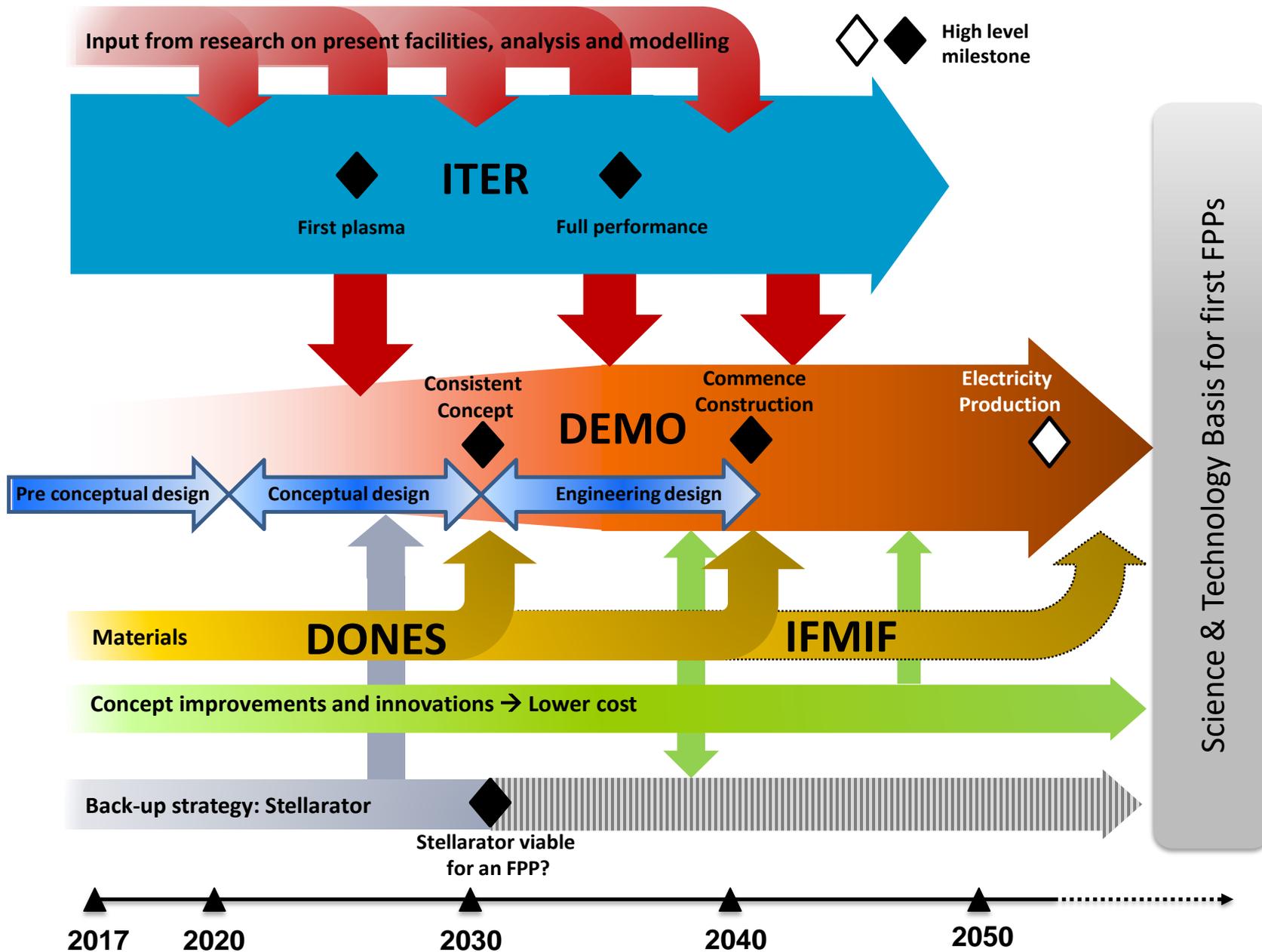


Gliederung

- 1.) Kernfusion mit magnetischem Einschluss
- 2.) Aktueller Stand
- 3.) ITER – Stand und Perspektiven
- 4.) Der Weg zum Fusionskraftwerk
- 5.) Zusammenfassung



EU Roadmap zum Fusionskraftwerk





DEMO – der Schritt nach ITER

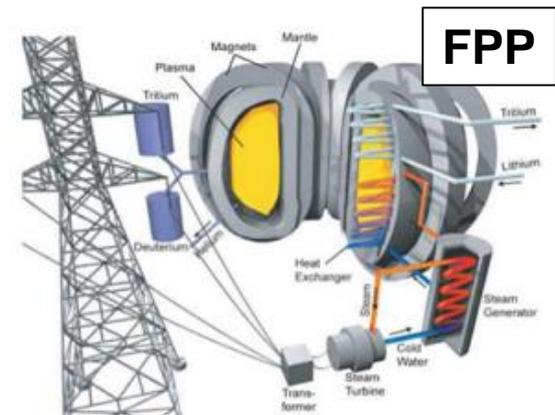
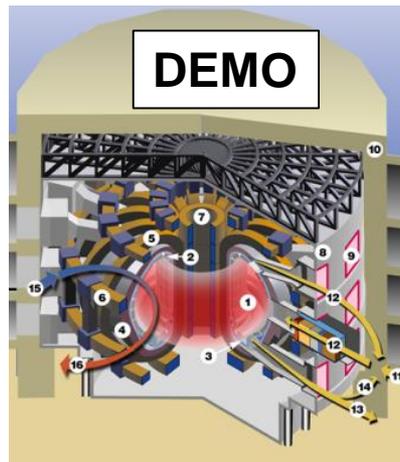
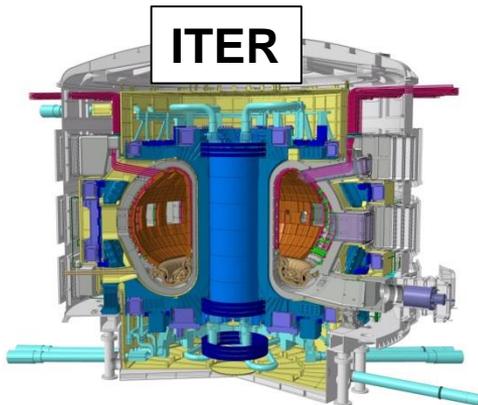


DEMO = Schritt zwischen ITER und dem kommerziellen Fusionskraftwerk

Alle ITER Partner haben eigene (z.T. sehr unterschiedliche) DEMO Pläne

Es gibt keine einheitliche Definition, ‚high level‘ Ziele der EU sind

- zuverlässige netto Elektrizitätsgewinnung (einige 100 MW)
- geschlossener Brennstoffkreislauf (keine externe T-Zufuhr)
- Nachweis der ökonomischen und ökologischen Eigenschaften



EU: ‚Stepladder to Fusion Electricity‘



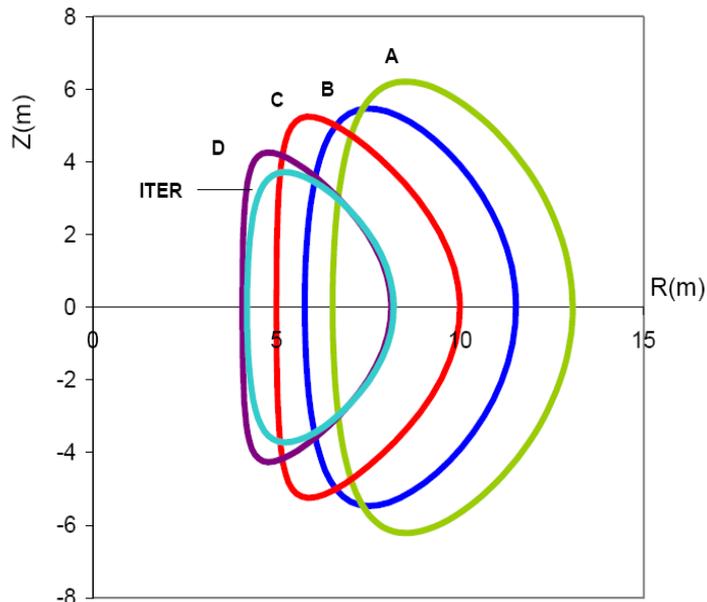
Der Schritt von ITER zu DEMO



ITER = ‚proof of principle‘ der Selbstheizung durch α -Teilchen

DEMO = ‚proof of principle‘ des geschlossenen Brennstoffkreislaufs

DEMO wird größer als ITER sein: 6.2 m \Rightarrow 8-9 m, 500 MW \Rightarrow ~ 2-3 GW

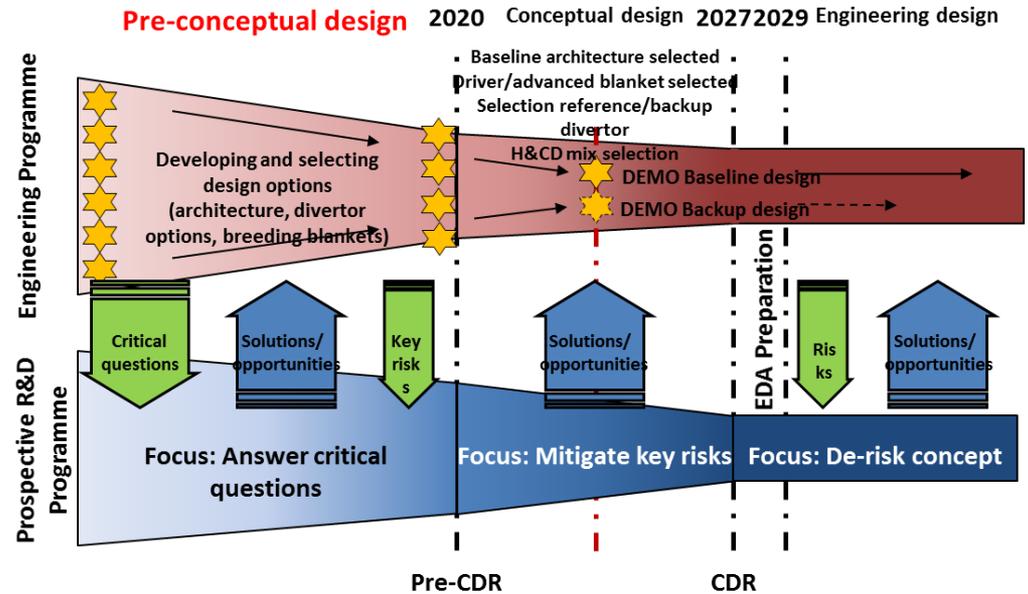
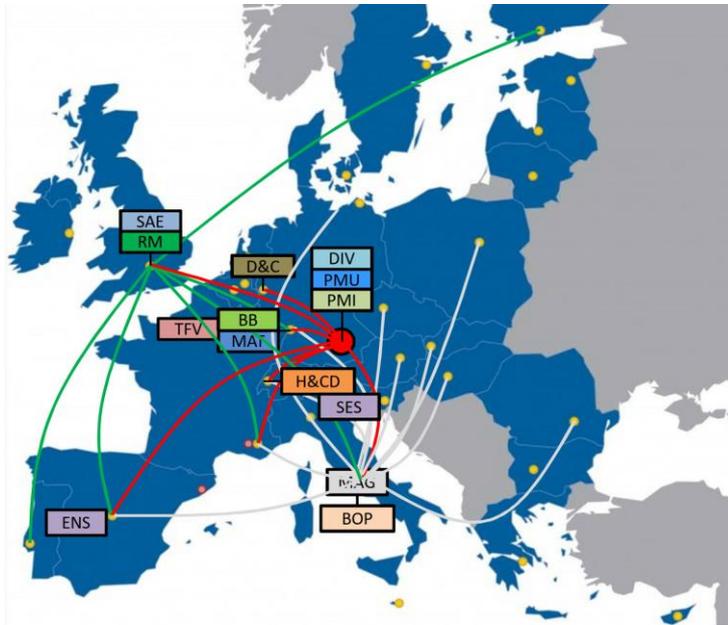


| | A | B | C | D |
|----------------------------|------------------|-----|-----|------|
| Electrical power [GW] | 1.5 | 1.3 | 1.5 | 1.5 |
| Fusion power [GW] | 5.0 | 3.6 | 3.4 | 2.5 |
| Plasma current [MA] | 30 | 28 | 20 | 14 |
| Total β_N [% m/MA T] | 3.5 | 3.4 | 4.0 | 4.5 |
| coolant | H ₂ O | He | He | LiPb |
| Efficiency of H&CD [%] | 60 | 60 | 70 | 70 |

Dies hängt aber stark von den Annahmen über den Fortschritt in den nächsten Jahren ab (d.h. von Optimismus und Ressourcen 😊)



EU-DEMO: ‚Lessons Learned‘ 2014-2020

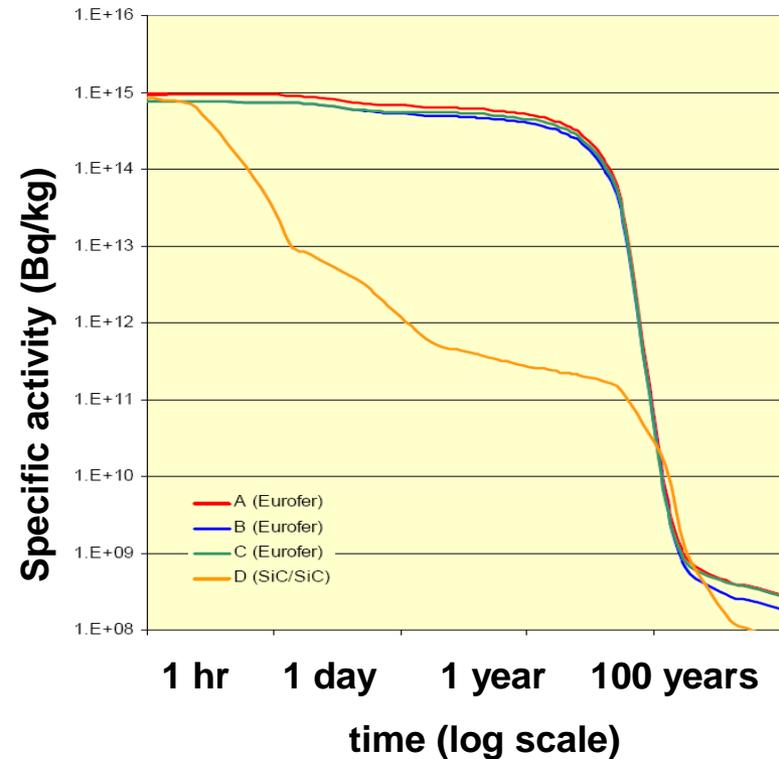
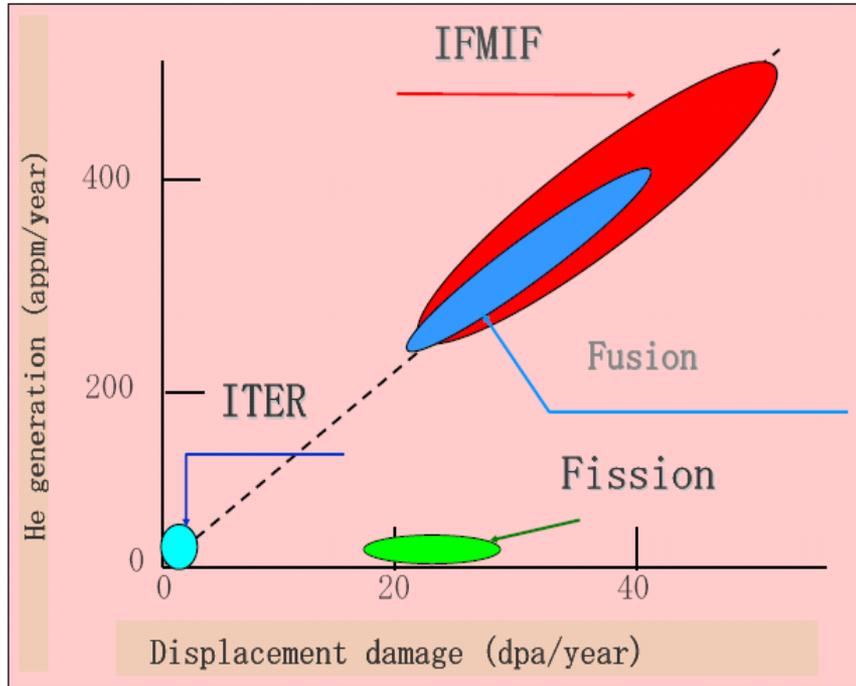


‚Conceptual Design Phase‘ für EU DEMO läuft seit 2014

ITER Physik und Technologie (Spulen, Heizungen...) Basis für die Auslegung

- Plasmabetriebsszenario muss weiter entwickelt werden
- geschlossener Brennstoffkreislauf erfordert neue Entwicklungen
- höhere Neutronenfluenz erfordert weitere Materialentwicklungen

‚Integrated Design‘ wichtig um die R&D-Ziele schon jetzt zu erkennen

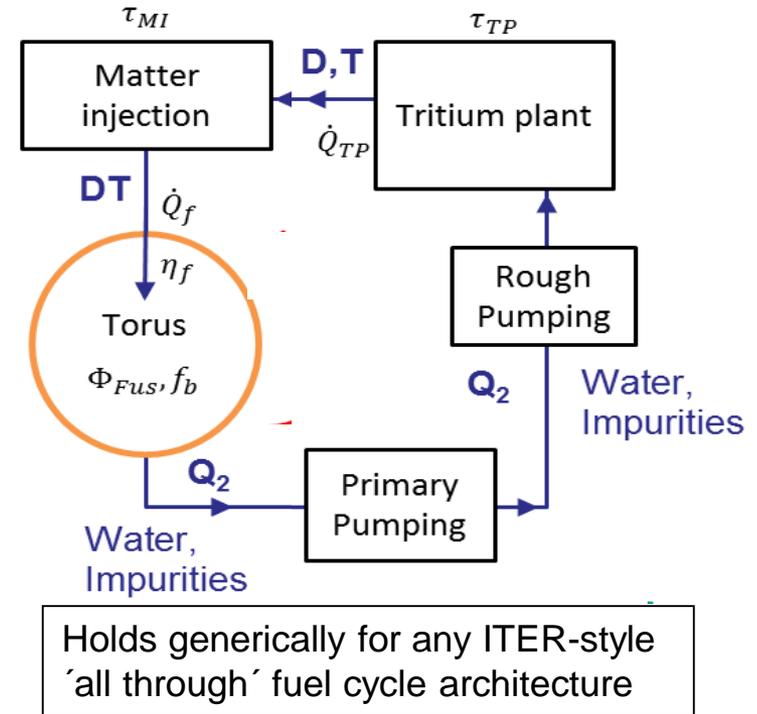
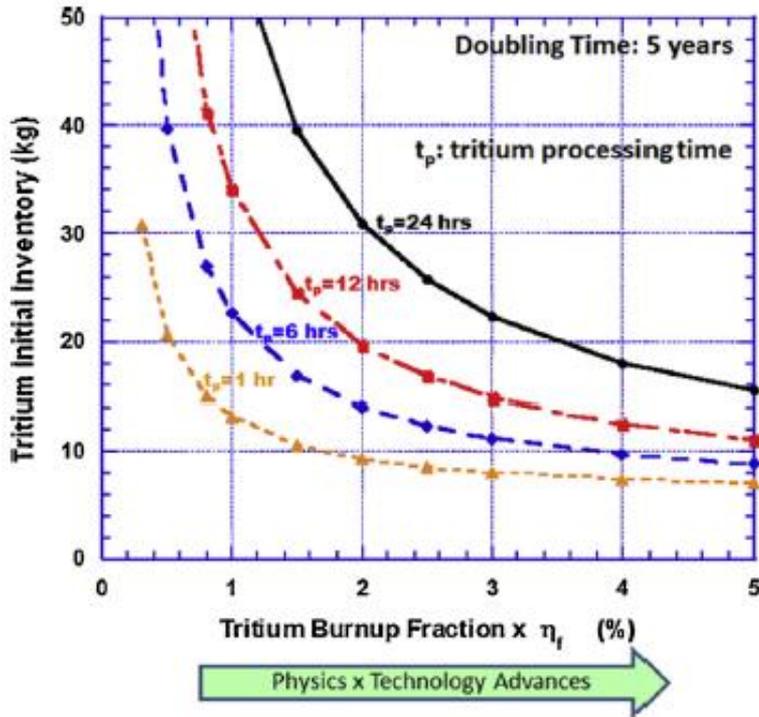


Fortschritte in der Materialentwicklungen um Vorteile der Fusion zu nutzen

- Herausforderung: mechanische Stabilität bei hoher Temperatur und unter 14 MeV n-Beschuss (Erhöhung der Ductile-Brittle Transition Temperature)
- EUROFER Stahl bis zu 550° C, besser wären ODS oder SiC/SiC
- auch: Minimierung der Aktivierung und Halbwertszeiten



DEMO Brennstoffkreislauf: ein neues Konzept

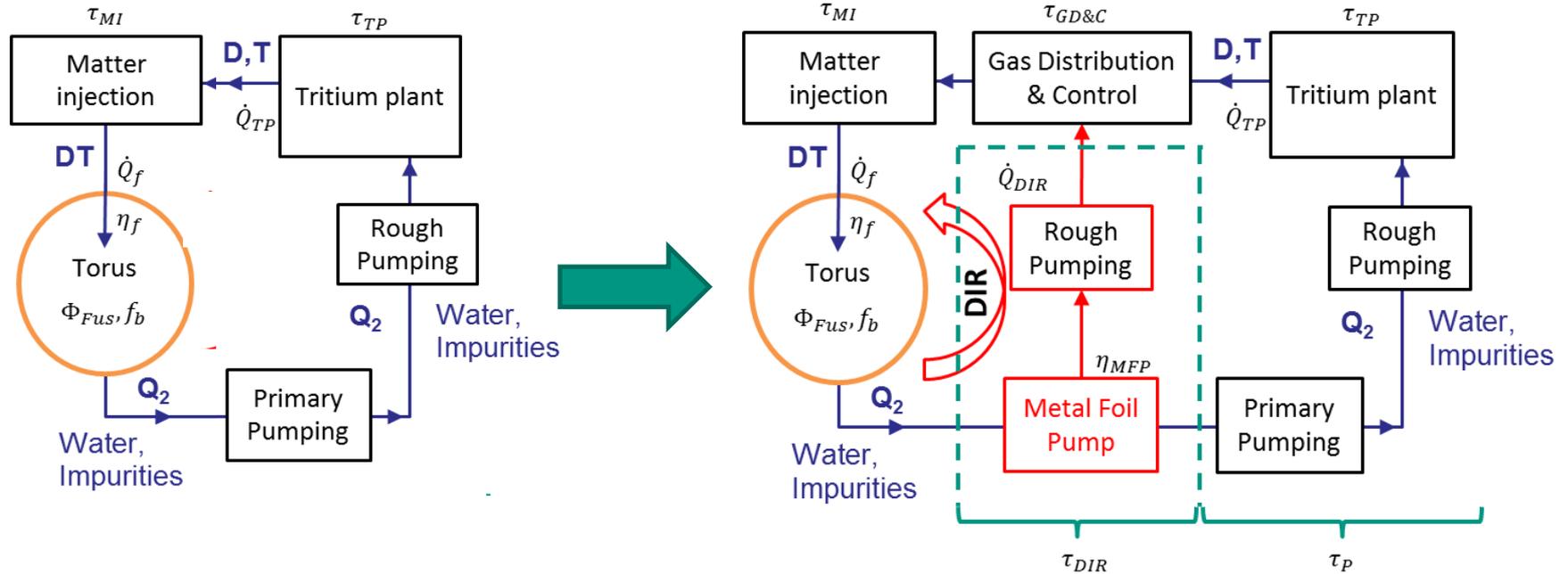


Ziel: Minimierung des T-Inventars (ITER Site Limit: wenige kg)

- der direkte Abbrand des Brennstoffs ist gering (wenige Prozent)
- langwierige Aufbereitung des abgepumpten D-T Gemischs (~ Stunden)



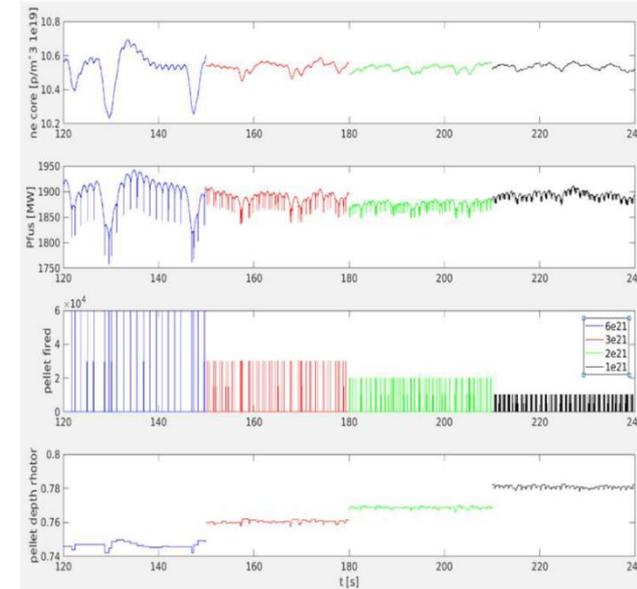
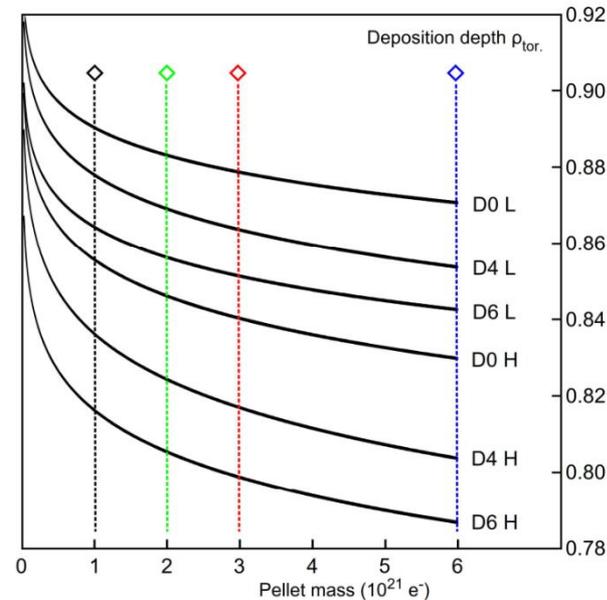
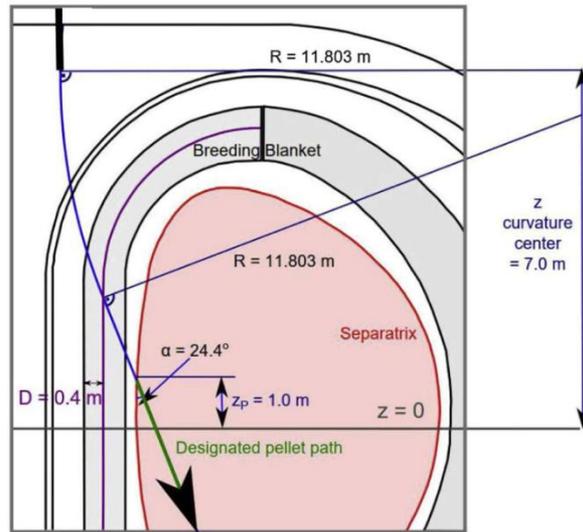
DEMO Brennstoffkreislauf: ein neues Konzept



Neuer Ansatz: ‚direct internal recycling‘

- D-T Gemisch wird von He-Asche (teil)separiert, aber nicht getrennt
- Prozesszeit kann in den Minutenbereich gesenkt werden
- Abschätzungen versprechen Senkung des Inventars um Faktor 10 (!)

Bedingt Entwicklung neuer Technologien (Membranpumpen)

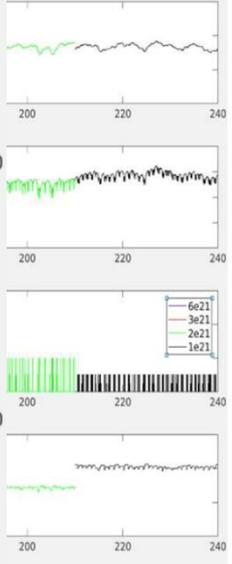
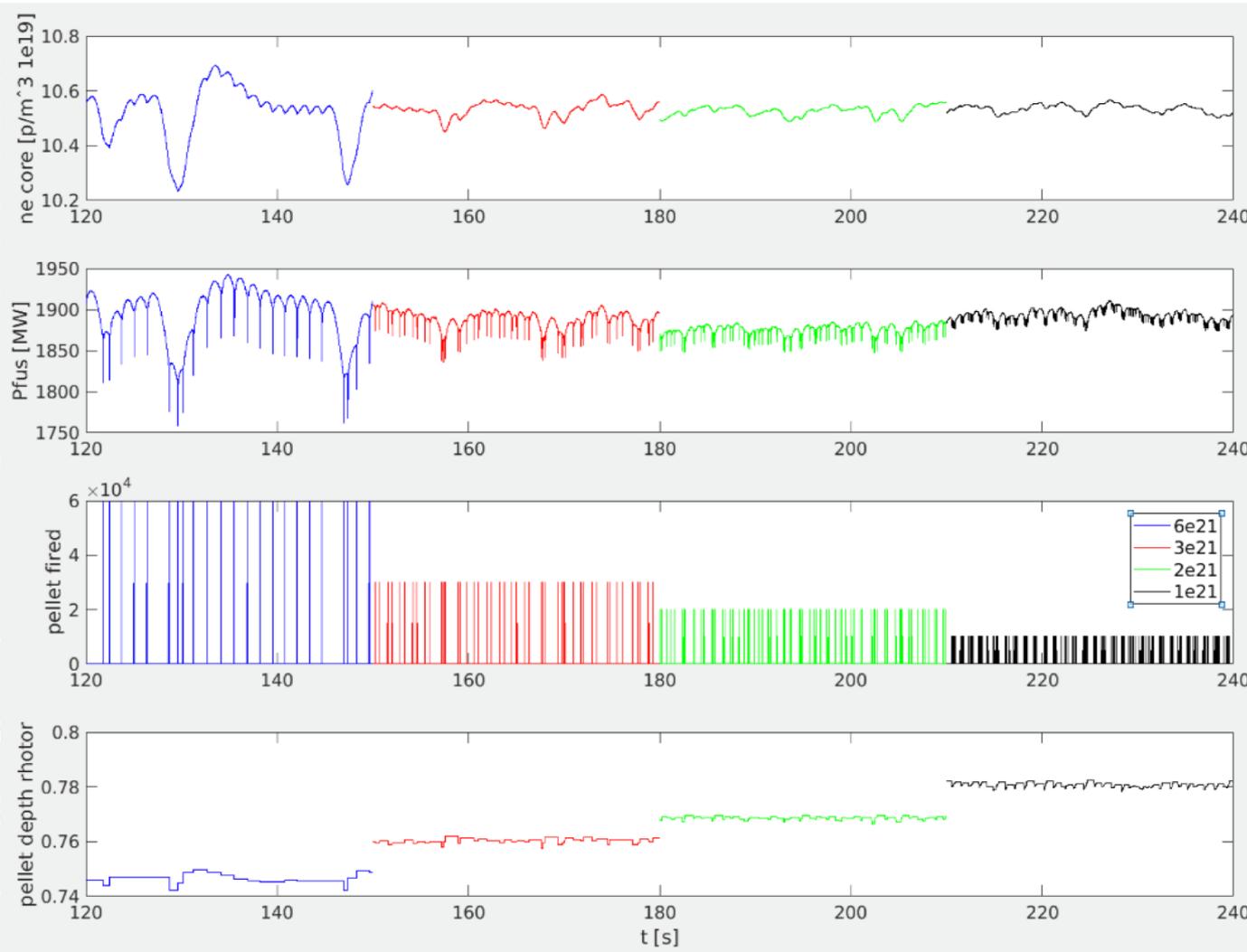
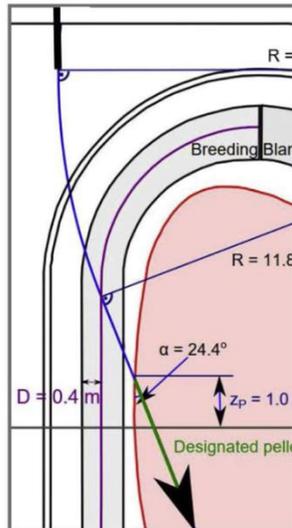


Sensoren und Aktuatoren nicht mehr durch Physikverständnis getrieben

- höchste Priorität: Maschinensicherheit
- zweite Priorität: Kontrolle des Betriebspunkts (Plasmaparameter)

„Integrierte“ Entwicklung unter Berücksichtigung aller Randbedingungen

Beispiel: Brennkontrolle mit D-T Pellets



Sensoren

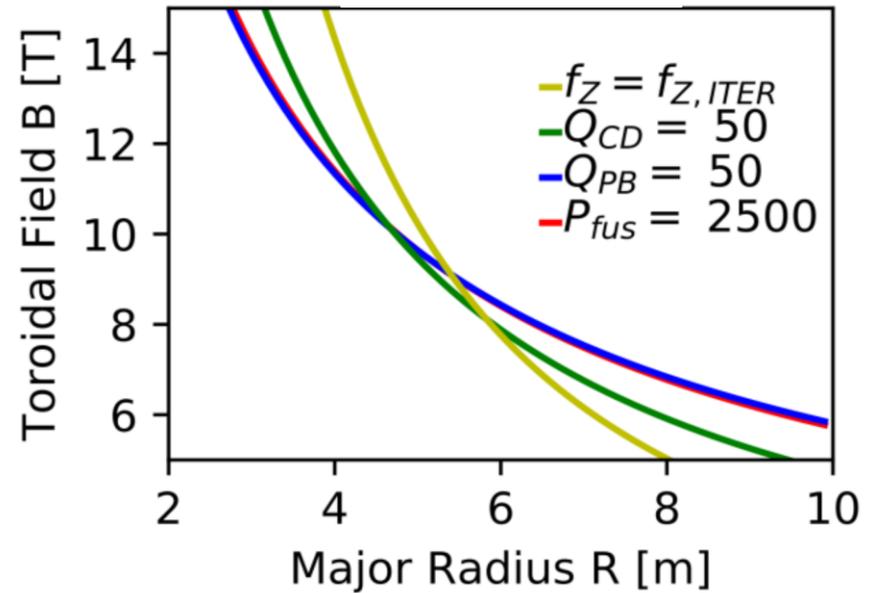
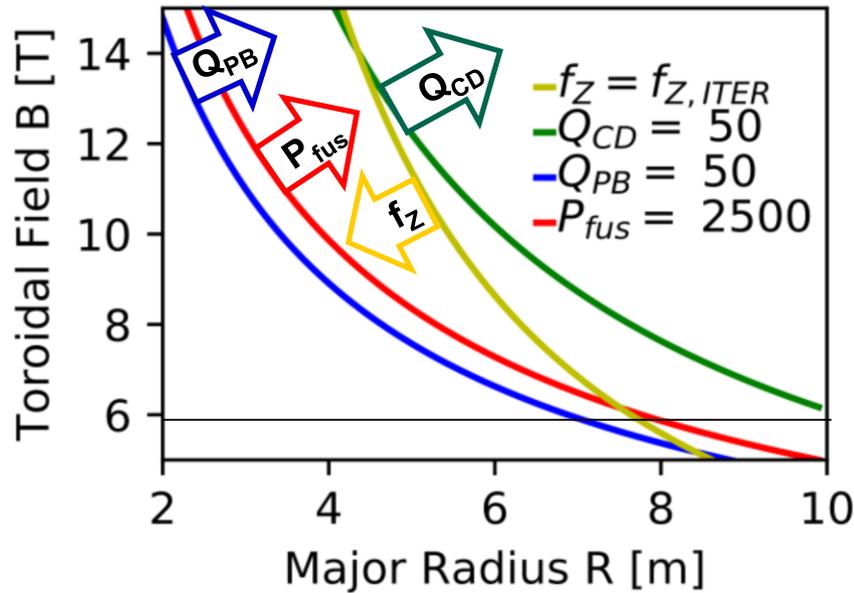
- höchst
- zweite

,Integrier

eben

igen

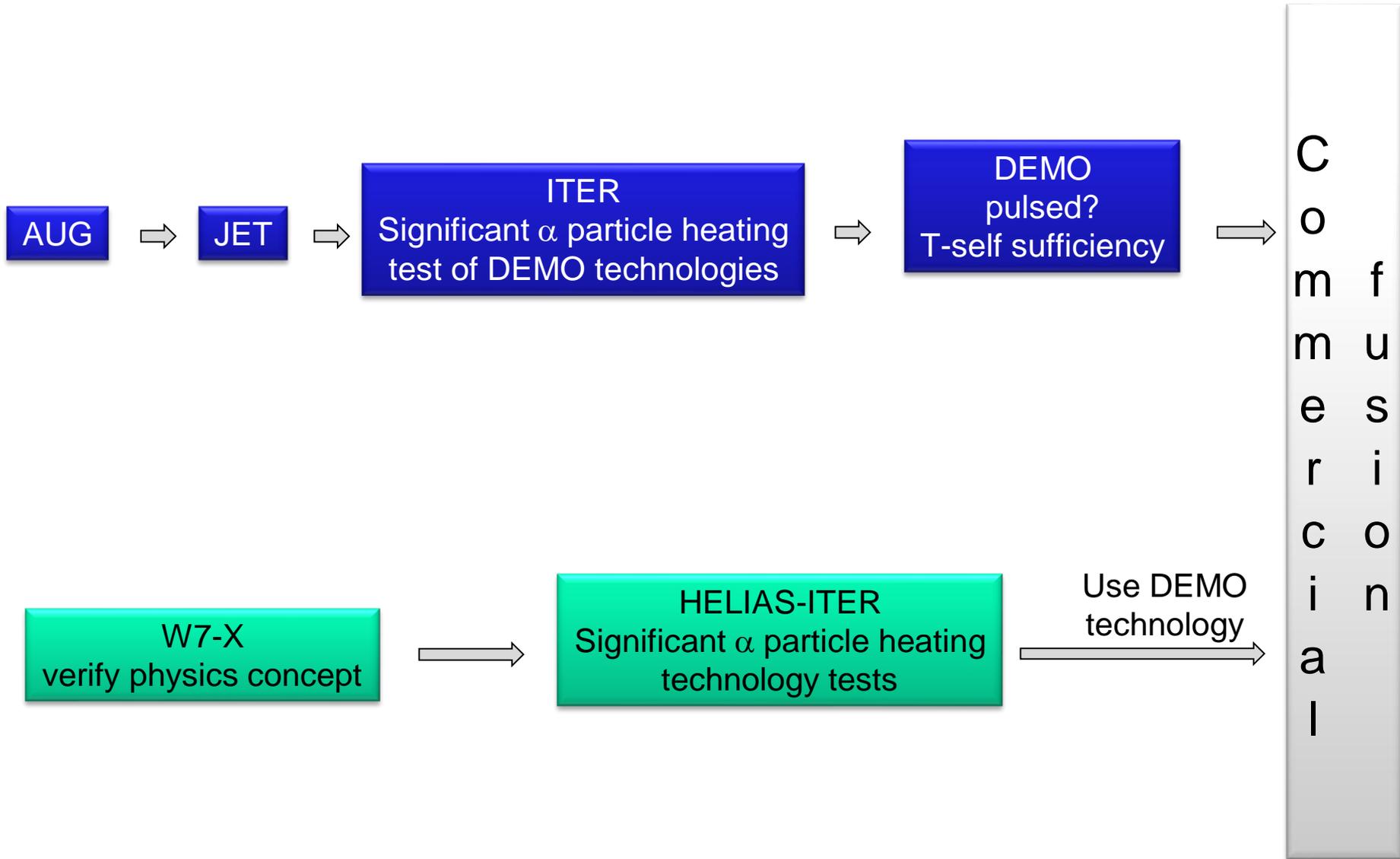
Beispiel: Brennkontrolle mit D-T Pellets



Während der jetzigen Designstudien werden weitere Fortschritte gemacht
Beispiel: Hochtemperatur Supraleitung könnte ein ‚Game Changer‘ sein



Wie passt der Stellarator in diese Strategie?





Wie passt der Stellarator in diese Strategie?



| WP | Description | Design | R&D | Risk | W7X contr. |
|-------|---------------------------|--------|------|---------------------|--|
| WPPMI | Plant Level Systems Eng. | H | L | Feasible | Lessons learned |
| WPRM | Remote Maintenance | H | M | Needs investigation | |
| WPMAG | Magnet System | H | L-M | Open issues | Lessons learned |
| WPBB | Breeding Blanket | M | L | Open issues | |
| WPDIV | Divertor | M | L | Feasible | Div. performance |
| WPHCD | Heating and Current Drive | M | L | Feasible | Gyrotron & ECCD |
| WPSAE | Safety and Environment | L-M | Zero | Feasible | |
| WPTFV | Tritium, Fueling, Vacuum | L | Zero | Feasible | Steady-state pellets test diff. pumps? |
| WPBOP | Balance-of-Plant | L | L | Feasible | |
| WPDC | Diagnostic and Control | L-M | L | Needs investigation | 3D, continuous data, Archive, etc. |
| WPMAT | Materials | Zero | Zero | | long time plasma exposure, W-PFC |
| WPENS | Early Neutron Source | Zero | Zero | | |

Amount which has to be redone

L:10-20%

M:20-40%

H:40-60%

EUROfusion entwickelt eine Strategie, die ‚Lücken‘ zu schliessen

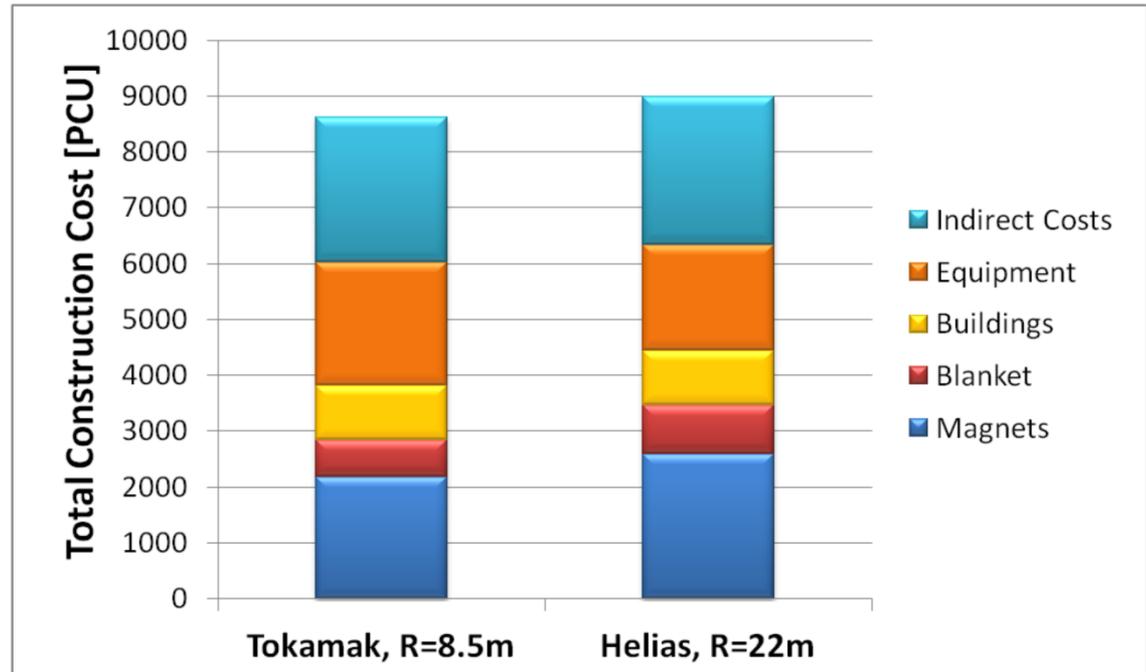


Erste Abschätzungen zeigen ähnliche Kosten(!)



- **Cost breakdown (share of total construction cost)**

| Device | Tokamak | Helias |
|-----------|---------|--------|
| Equipment | 26% | 21% |
| Buildings | 11% | 11% |
| Magnets | 25% | 29% |
| Blanket | 8% | 10% |
| Indirect | 30% | 30% |
| | | |
| Cold Mass | 44kt | 40kt |
| SC Mass | ~1.8kt | 2.9kt |

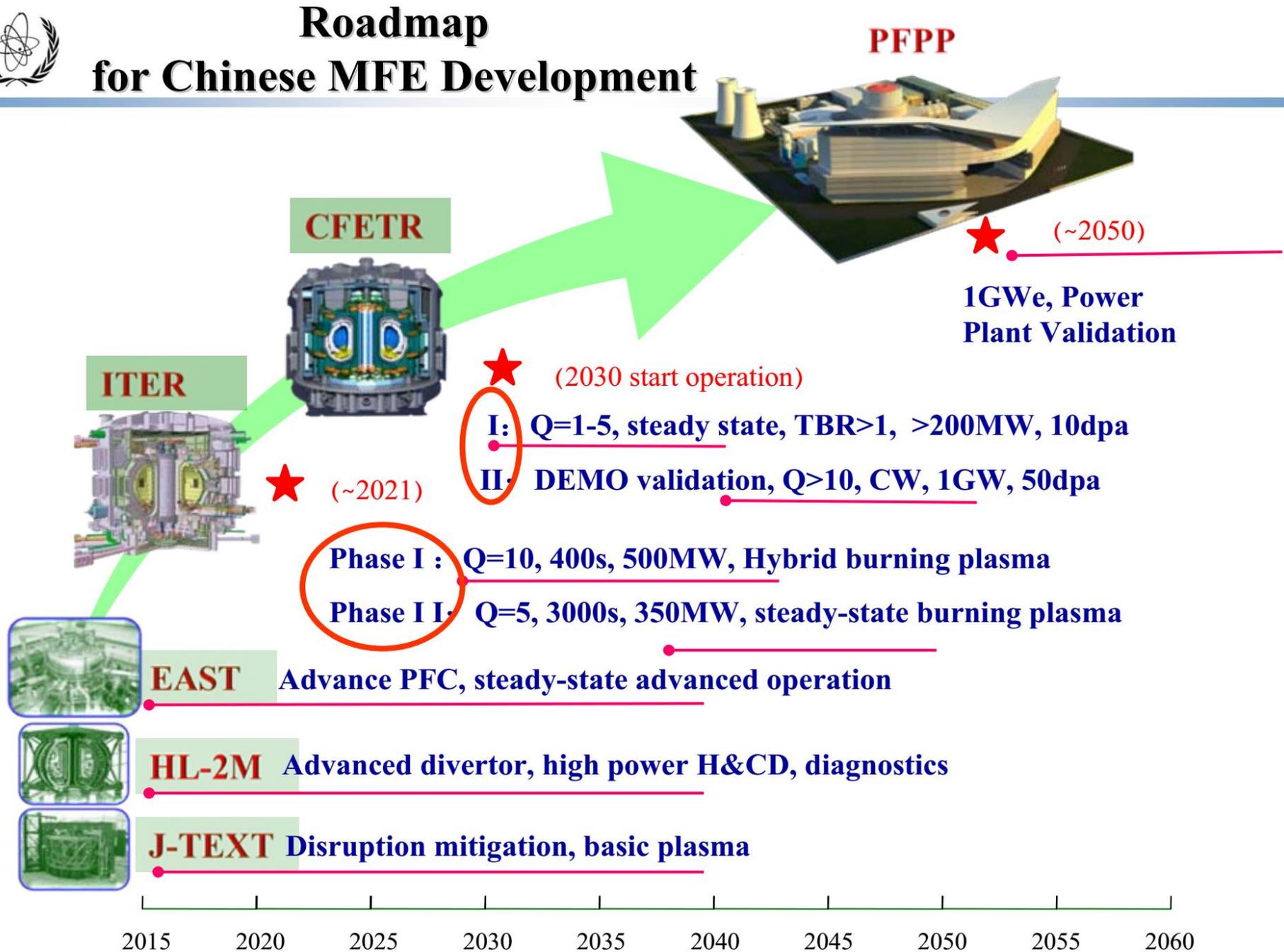


Studie welche Tokamak und Stellarator mit gleichen Annahmen vergleicht

- Stellaratorspulen aufwändiger, aber Kontrollanforderungen geringer



Roadmap for Chinese MFE Development





Gliederung

- 1.) Kernfusion mit magnetischem Einschluss
- 2.) Aktueller Stand
- 3.) ITER – Stand und Perspektiven
- 4.) Der Weg zum Fusionskraftwerk
- 5.) Zusammenfassung



Die Fusionsforschung hat in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt

- jetzige Kenntnisse ermöglichen den nächsten Schritt: ITER

Der Weg zum Fusionskraftwerk sieht 2 weitere Schritte vor:

- ITER zum Nachweis der Selbstheizung durch He-Kerne (> 2035)
- DEMO zum Nachweis des Kraftwerksbetriebs (Design startet jetzt!)

Fusionskraftwerke könnten > 2050 Baustein der Energieversorgung sein

- immer noch rechtzeitig um weltweite ‚Energiewende‘ zu vollziehen
- diese Entwicklung wird kontinuierliche Unterstützung benötigen

N.B.: Die deutsche Fusionsforschung spielt dabei eine wichtige Rolle!

N.B.2: Mit W7-X wird auch der Stellarator eine wichtige Rolle spielen