

Kernfusion als Option zur Energiegewinnung - das Projekt WENDELSTEIN 7-X

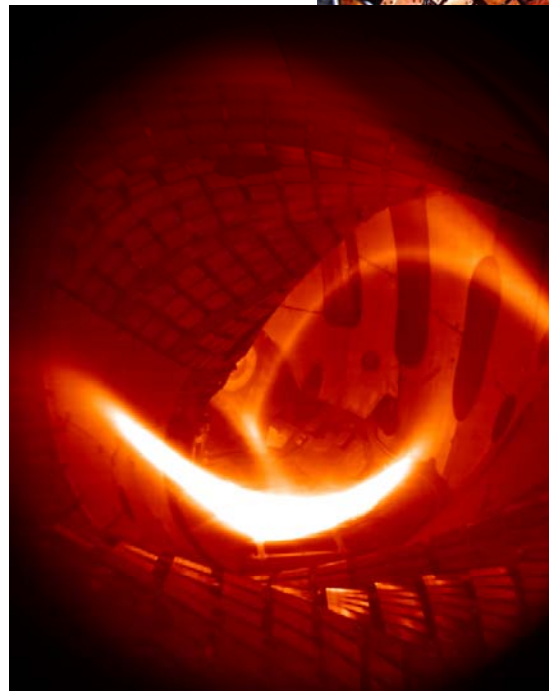
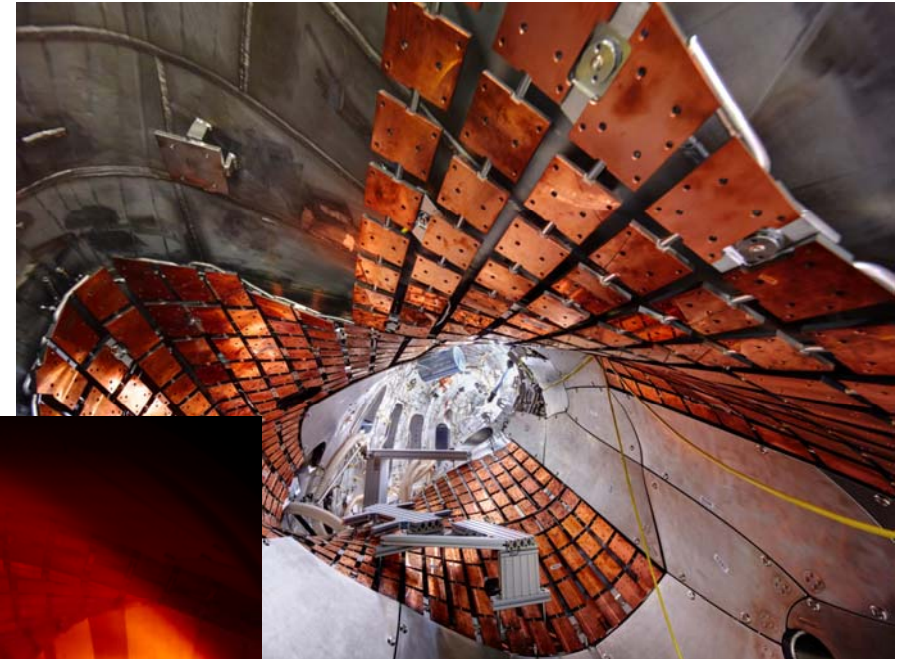
Führung

21. September 2016
Fersterkörperphysiker, TU Berlin,
Forschungsgruppe TH Wildau

Matthias Hirsch
for the W7-X Team

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik,
Greifswald, EURATOM-Association.

matthias.hirsch@ipp.mpg.de



erstes H-Plasma 3.2.2016

IPP: 1100 Mitarbeiter
Jahreshaushalt 130 Mio. EUR



Max-Planck Gesellschaft:
80 Inst. ca 20000 Mitarbeiter
außeruniversitäre Grundlagenforschung

Teilinstitut Greifswald (seit 1994) zur Durchführung
des Projekts Wendelstein 7-X :

-> 550 Mitarbeiter (incl. 80 Arb..Überlassung):
typ.: 10% Ausländer, 13 Postdocs, 20% Frauen
10 Doktoranden, 10 Diplomanden, 16 Azubis

W7-X Torushalle

HV-Versorgung

Mikrowellen
Heizung

Neutralteilchene Injektoren
Kühlanlage, He-versorgung

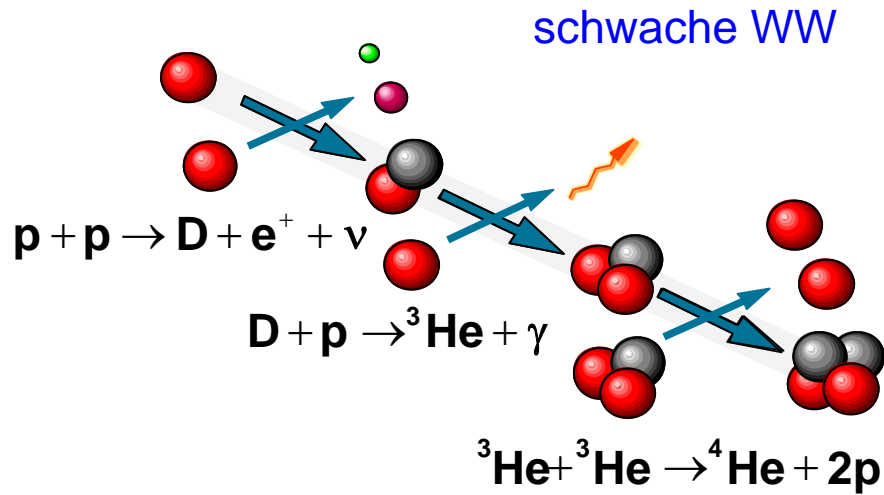
Montagehalle, Hochfrequenz-Heizung

Diagnostik, Kontrollraum



Kernfusion – riesige Mengen von Energie und die Entstehung der Elemente

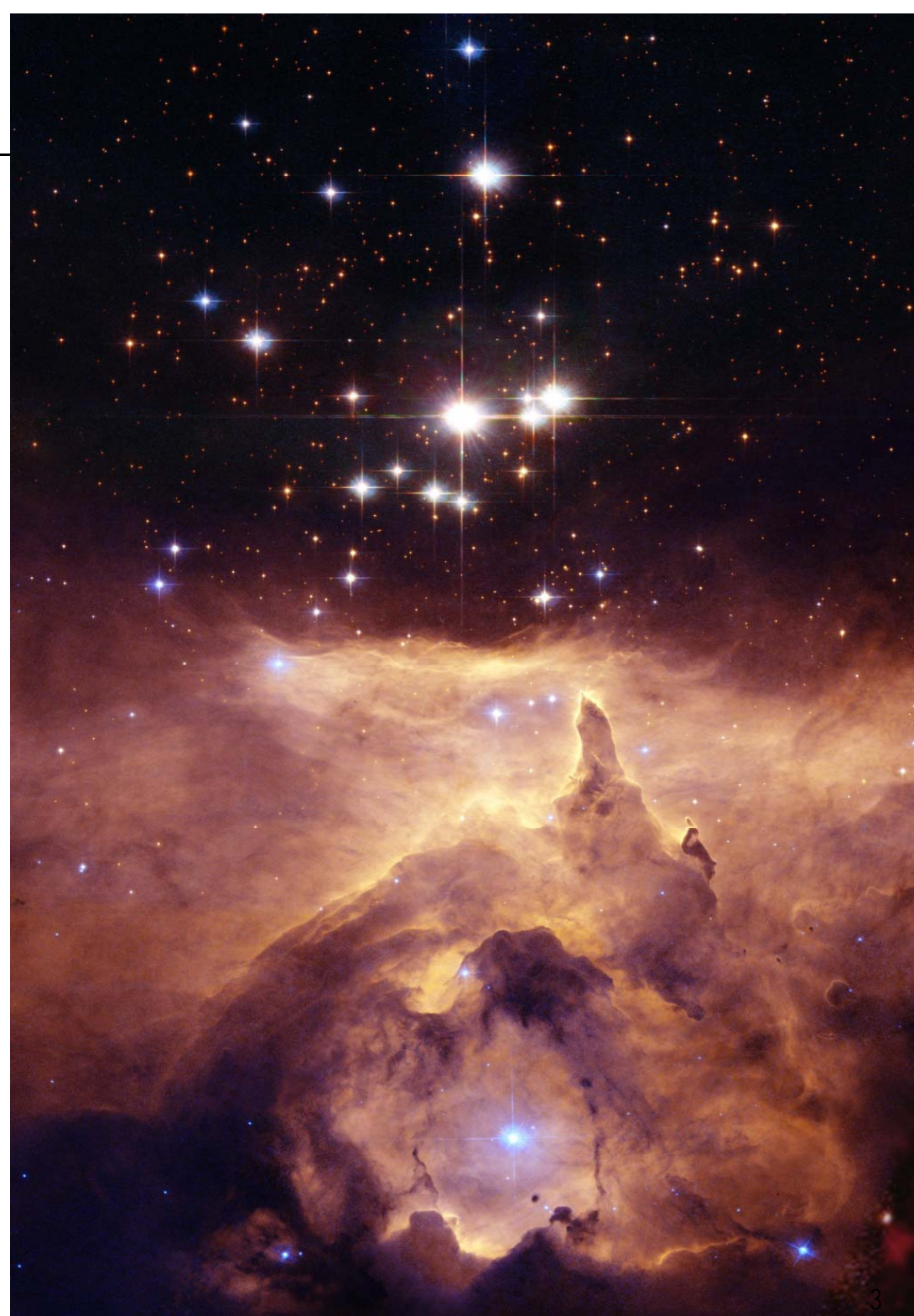
Sterne gewinnen ihre Energie durch Fusion
(=Verschmelzung) von Atomkernen.



dabei entstehen alle schweren Elemente

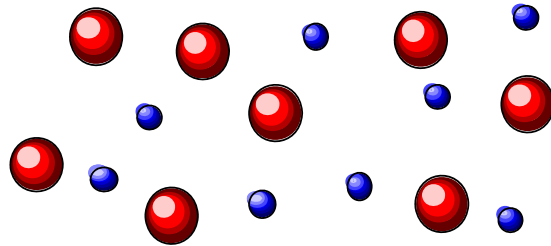
Sterne wie die Sonne sind riesige
Plasmakugeln (Plasma=leuchtendes Gas)

ca. 99% des Weltalls
befindet sich im **Plasma**zustand



Ein Plasma ist ein ionisiertes und daher leitfähiges und leuchtendes Gas

Plasma: der 4. Aggregatzustand des Empedokles:
Erde, Wasser, Luft und **Feuer**



in der Atmosphäre
Blitze



technische Plasmen
Leuchtstoffröhren



technische Plasmen
Plasmabildschirm



in der Ionosphäre
Nordlichter

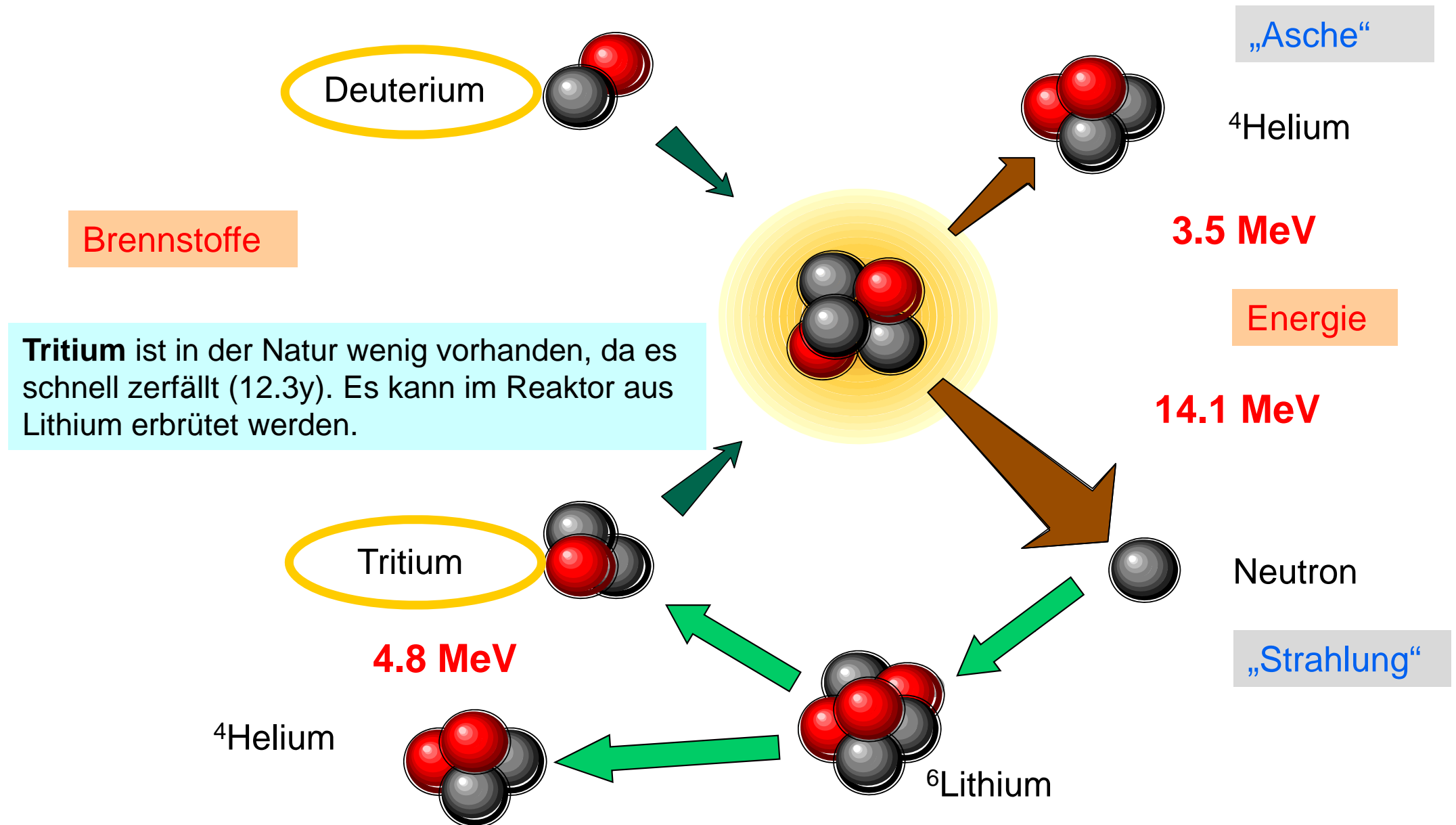


im Weltall
Sonne & Sterne



die Deuterium-Tritium Reaktion

Rohstoffe und Endprodukte

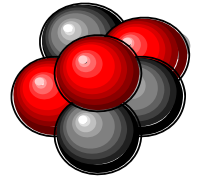


Brennstoffe der Fusion sind **Deuterium** und **Tritium**, wobei Tritium im Kraftwerk aus **Lithium** erbrütet wird.



D

Li



Beide Rohstoffe sind in den Mineralien der Weltmeeren in praktisch unerschöpflichen Mengen vorhanden

1 GW elektrische Energie

(= Berlin benötigt im Mittel 1,4 GW)

... lässt sich erzeugen aus täglich ...

-> **8000 t Steinkohle** oder (~3 Güterzüge)

-> **50 kg angereichertem Uran** oder

-> **600 g D-T Gemisch**

Annahme: keine Speicherung notwendig:

(+ Wasserstoffspeicher jeweils Faktor 2.5)

-> mit **Windrädern**: 3700 onshore (1.5 MW)

oder **625 Anlagen offshore (4MW)**

-> mit **Photovoltaik** auf einem Areal von **20 km²**



D in 4,5 l Wasser und Lithium (⁶Li) in einem alten Laptopakku können eine Familie für 3 Jahre mit Strom versorgen.

brennen = Prozess muss sich selbst erhalten

-> hoher Druck (= hohe Temperatur, hohe Dichte)

-> geringe Wärmeverluste

"Lawson Kriterium: $n \cdot \tau \cdot T_i$ "

Gravitation (Sonne, Sterne):

riesige Energie-Einschlusszeit ($\sim 10^6$ Jahre), hohe Dichte
"niedrige" T , wenig Fusionsprozesse (-> $300 \text{ W} / \text{m}^3$),
reicht aber, um Plasma am Brennen zu halten

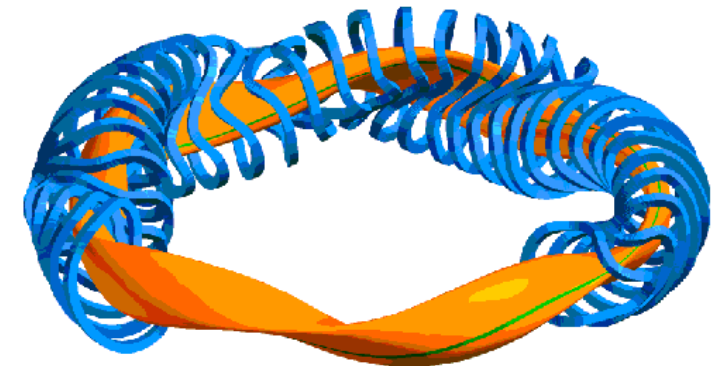
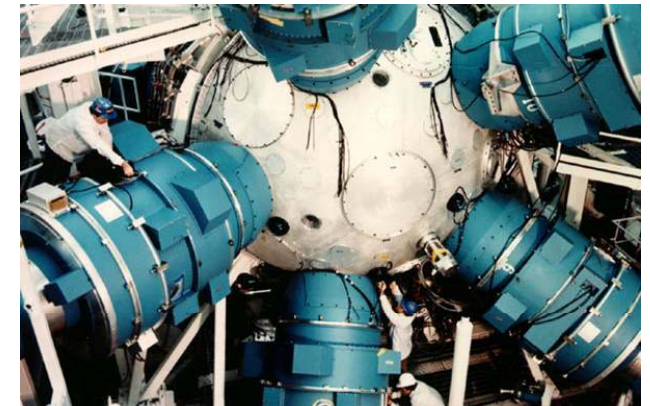
Der Mensch kann keine kleine Sonne bauen

Trägheit ("Explosion", Laserfusion, H-Bombe)

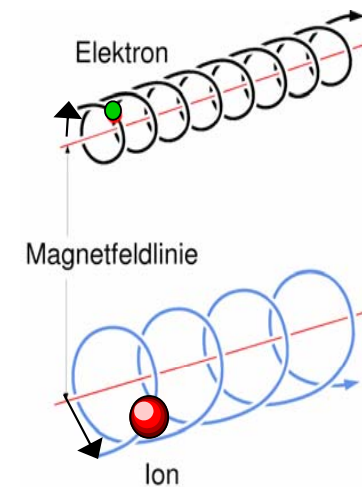
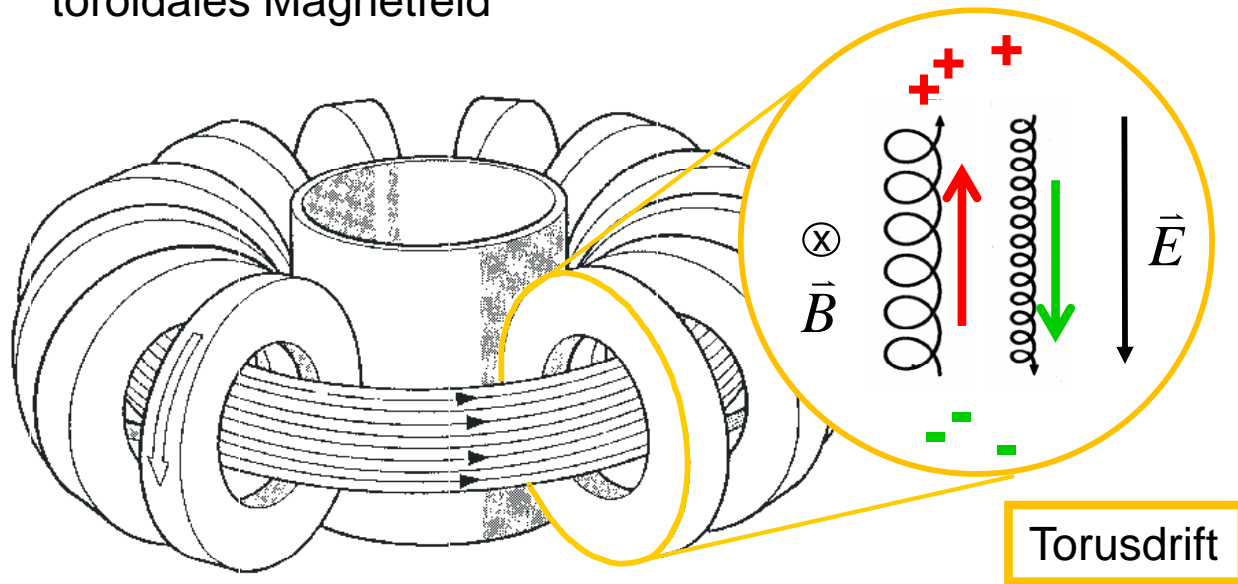
sehr kleine Einschlusszeit (ns)
aber Dichte etwa wie Sonneninneres
nur kurzfristig hoher Druck

Magnetfeld (Tokamak, Stellarator)

möglichst hohe Einschlusszeit (einige s)
hohe Temperatur (10 mal Sonneninneres)
Druck den das Magnetfeld halten kann ist begrenzt
 \sim Luftdruck / 100000 -> nur geringe Dichten mgl.



toroidales Magnetfeld

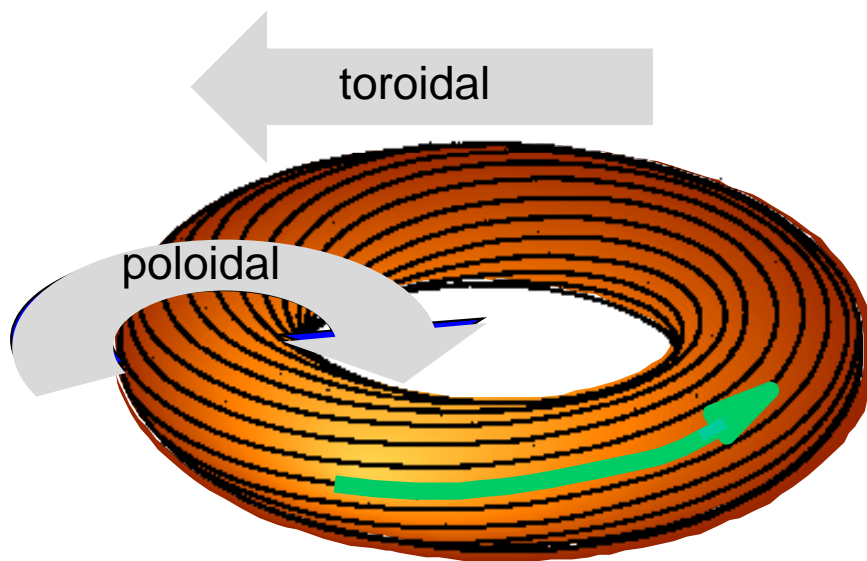


gyration

73000 km/s, $r=67\mu\text{m}$

mean thermal velocity
and gyro-radius at
100 Mio. K (10keV):

1700 km/s, $r=4.1\text{mm}$



helikal verschraubtes Magnetfeld

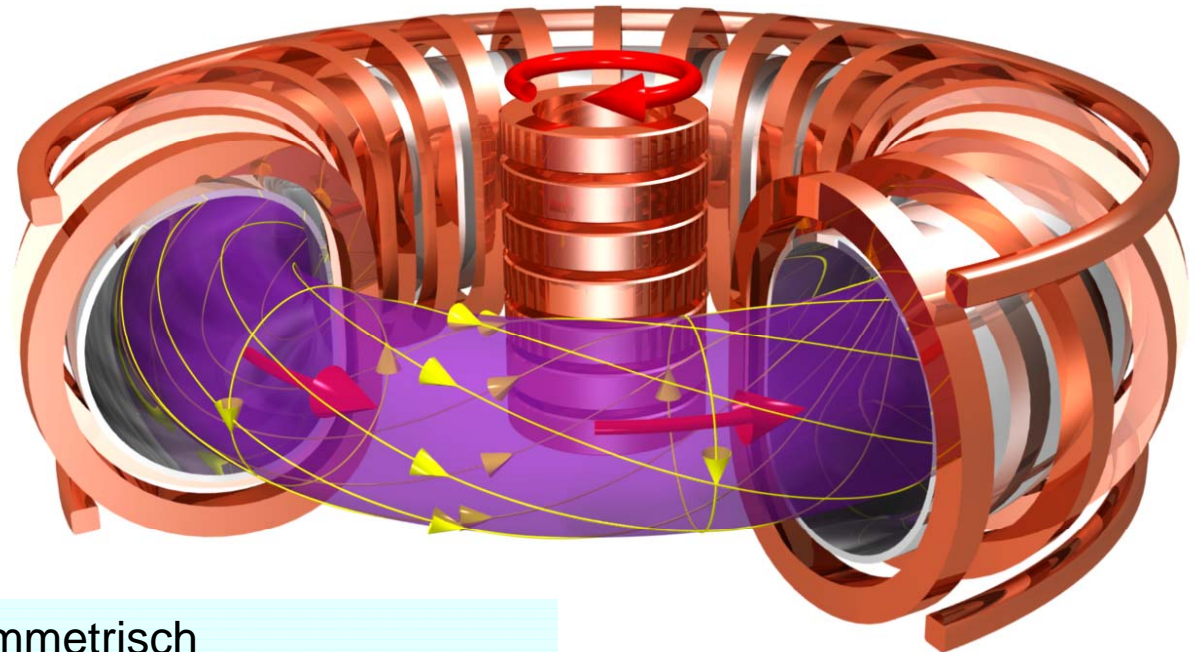
poloidale Komponente aus

- > Strom im Plasma
- > Strömen außerhalb

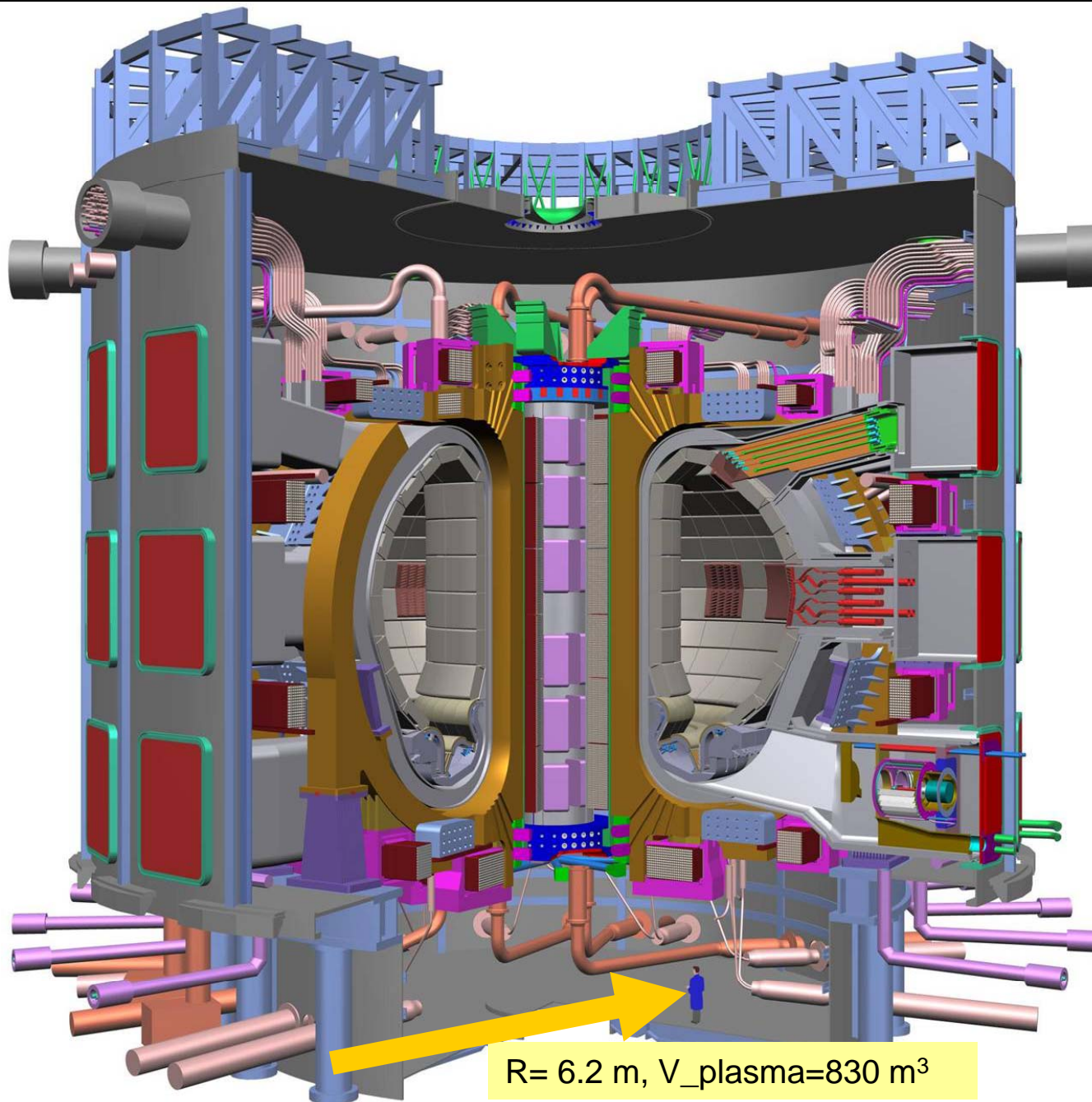
- > Tokamak
- > Stellarator

■ Einschluß im Tokamak: schraubenförmiges Feld durch einen im Plasma (zunächst "induktiv", wie im Trafo) getriebenen Strom

Plasma ist Sekundärwindung eines **Trafos**



- Vorteil: -> toroidal symmetrisch
- Schwierigkeit: -> Strom muß aufrecht erhalten werden
- > hohe Dynamik:
- Strom trieb Instabilitäten bis hin zum Stromabbruch
 - Lageregelung notwendig



Physik eines brennenden
aber noch geheizten Plasmas
mit schnellen He-Teilchen
(He-Transport und He-Abfuhr,
Instabilitäten, ... ?)

- > supraleitend
- > lange Pulse 15 Min.
- > 500 MW Fusionsleistung (DT), $Q=10$
- > Tritium Brüten (Li-test Blanket)

in Cadarache (FR), ~10 Mrd.EUR,
Betrieb startet 2025

Status: Fundamente fertig,
Fertigung von Komponenten

parallel dazu "broader approach":

- > Dauerbetrieb entwickeln
- > Materialforschung
- > Konzeptverbesserung

=> DEMO



status ~4/2013

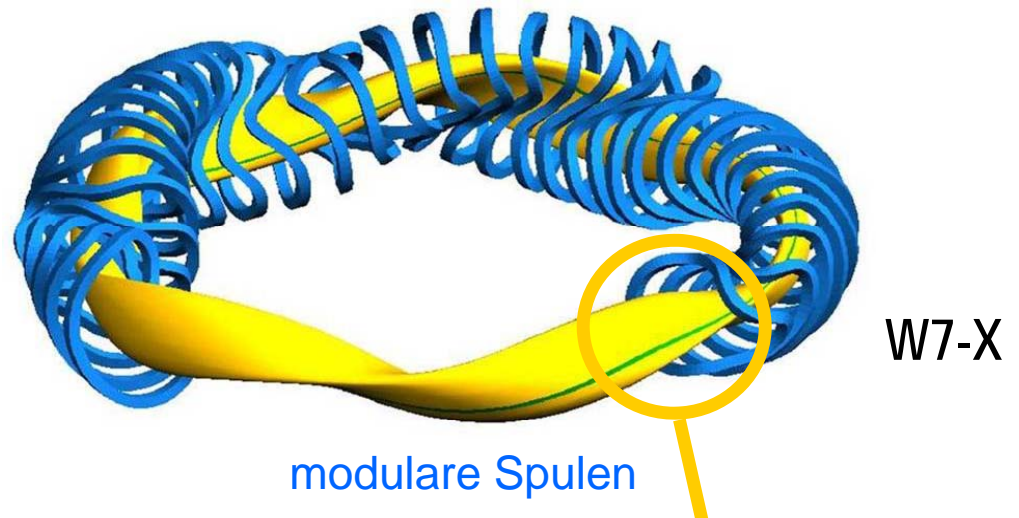
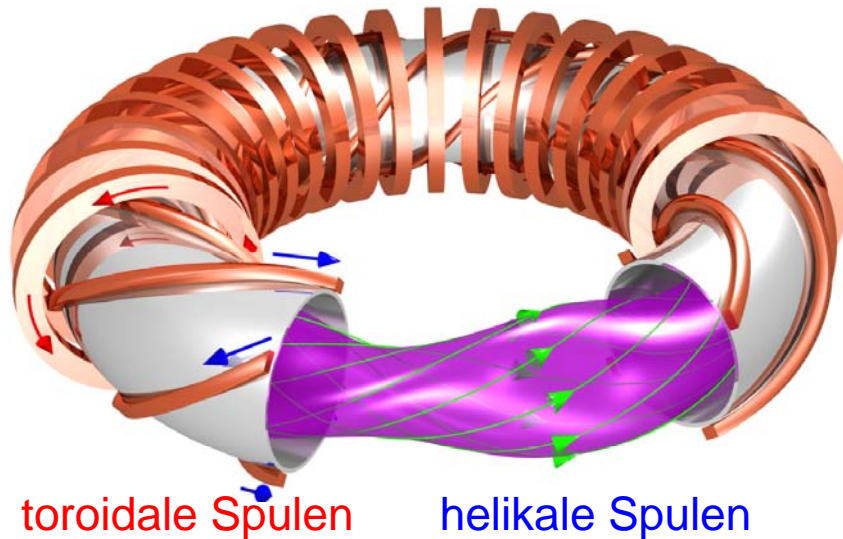
$R = 6.2 \text{ m}$, $V_{\text{plasma}} = 830 \text{ m}^3$

- > supraleitend
- > Plasmadauer: 15 Min.
- > 500 MW Wärmeleistung (DT)
(= noch nicht selbst brennend, $Q=10$)
- > Standort Cadarache (FR)
- > ~10 Mrd.EUR
- > erstes Plasma in 2020

Status: Bodenplatte fertig,
Fertigung von Komponenten

- + Entwicklung zum DEMO Reaktor :
- > hin zum Dauerbetrieb
 - > Materialforschung
 - > Konzeptverbesserung

Helikal (toridal & poloidal) gewundene Spulen erzeugen das verdrehte Magnetfeld von außen (**kein Strom im Plasma nötig**) aber erzeugen eine **3D Struktur** auch des Plasmas



-> **Dauerbetrieb**

-> aber **Nachteile der 3D Struktur:**

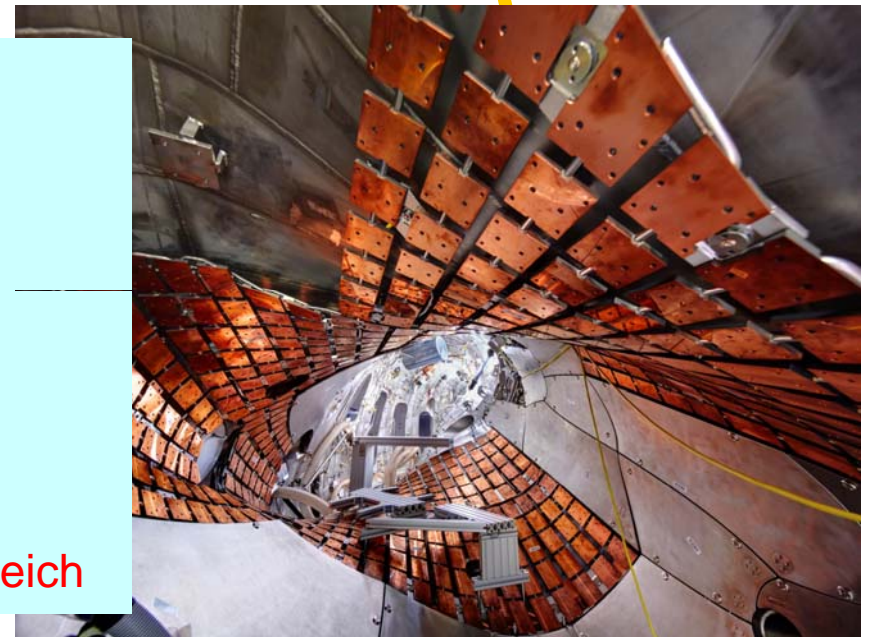
zusätzliche Energieverlust-Mechanismen, komplizierte mechanische Kräfte, komplexer Bau ...

aber durch modulare Spulen:

-> mechanische Kräfte innerhalb des Spulensystems können besser abgefangen werden

-> Magnetfelder können in weiten Grenzen **optimiert** werden

Vorversuche ("teilweise" Optimierung) waren **sehr erfolgreich**

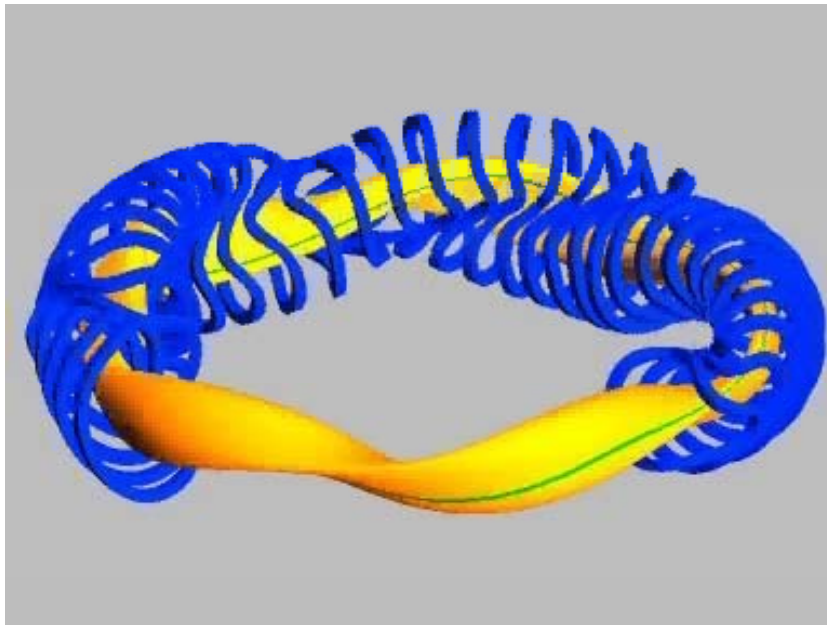


$R = 5.5\text{m}$, $a = 0.52\text{ m}$

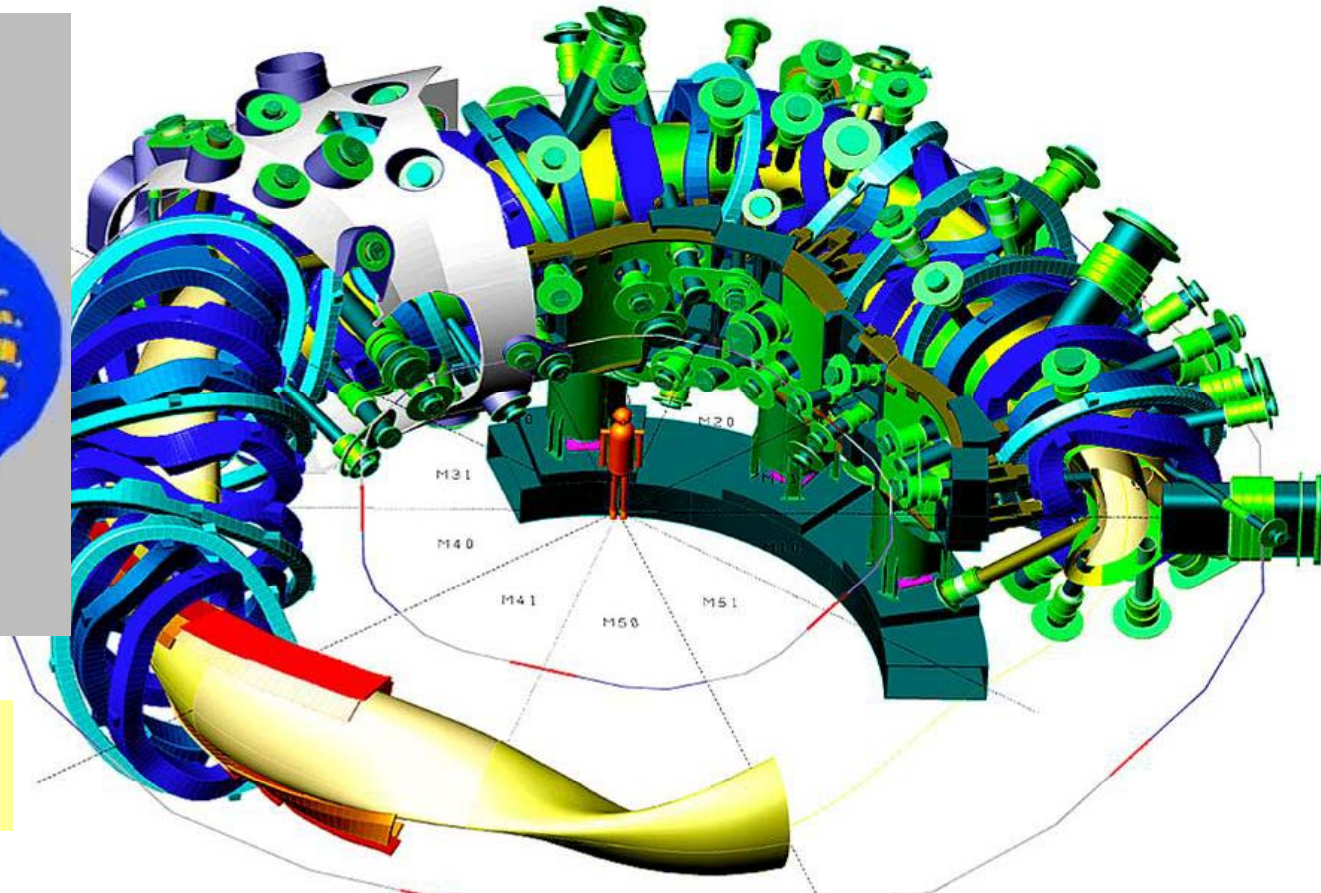
$V_{\text{plasma}} = 30\text{ m}^3$ (-> AUG: 14 m^3), max. 1/30 g Brennstoff

-> **optimiertes Magnetfeld** hinsichtlich Instabilitäten, Teilchen- und Energie-einschluß, minimierter Strom im Plasma ...)

-> **Dauerbetrieb** durch supraleitende Magnetspulen, dauerbetriebsfähige erste Wand, Divertor, Heizung, Diagnostik



kein Tritium, keine Fusion:
ein Experiment, kein Reaktor !



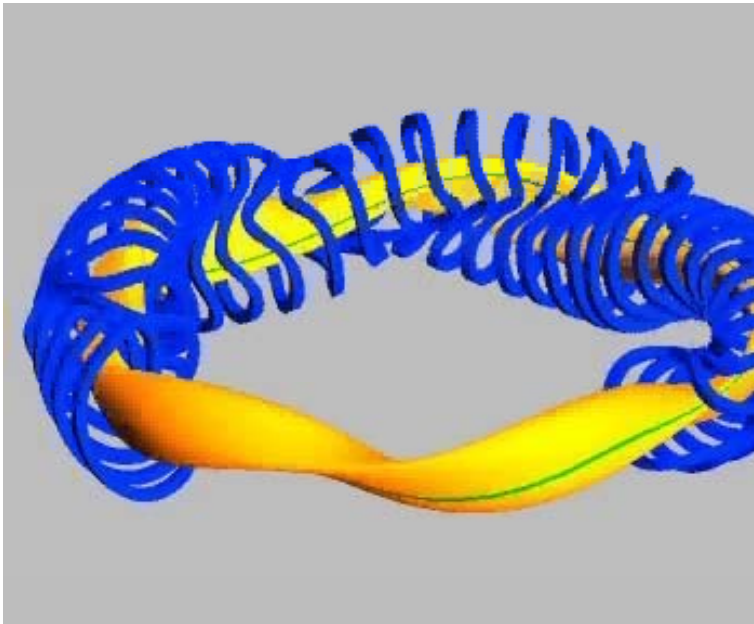
Außendurchmesser ~ 16 m

$R = 5.5\text{m}$, $a = 0.52\text{ m}$

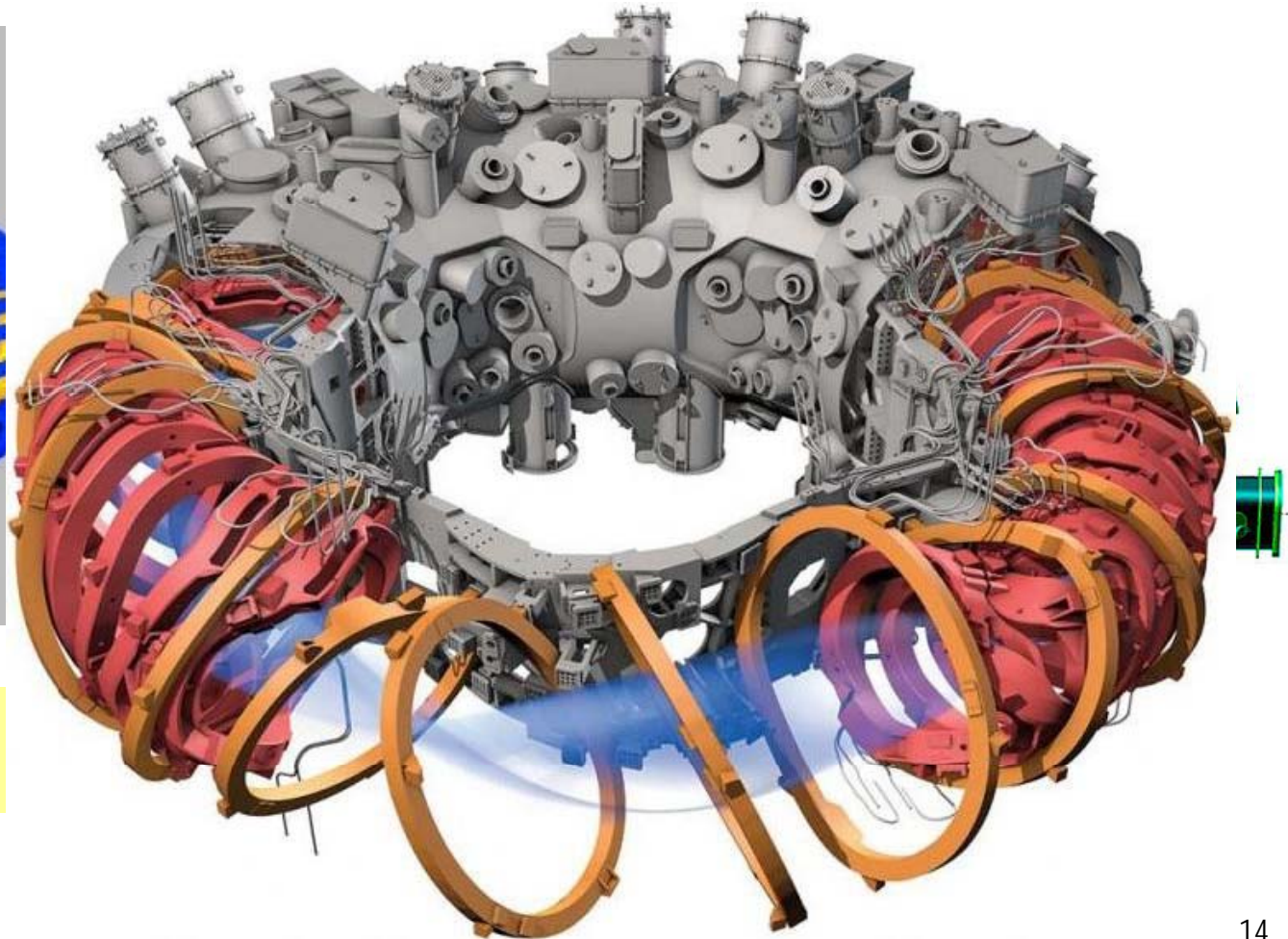
$V_{\text{plasma}} = 30\text{ m}^3$ (-> AUG: 14 m^3), max. 1/30 g Brennstoff

-> **optimiertes Magnetfeld** hinsichtlich Instabilitäten, Teilchen- und Energie-einschluß, minimierter Strom im Plasma ...)

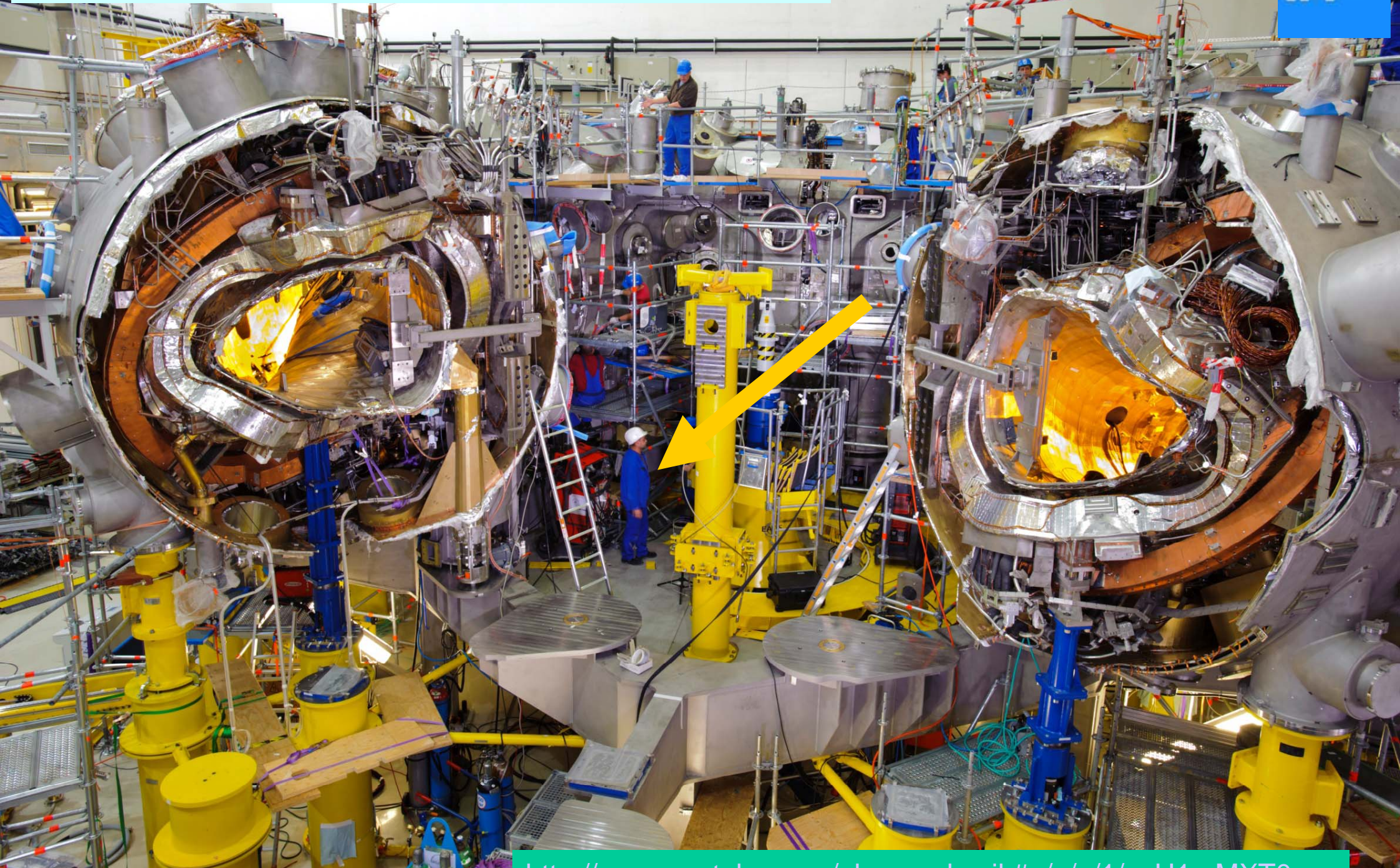
-> **Dauerbetrieb** durch supraleitende Magnetspulen, dauerbetriebsfähige erste Wand, Divertor, Heizung, Diagnostik



kein Tritium, keine Fusion:
ein Experiment, kein Reaktor !



Wendelstein 7-X: Status: Frühjahr 2011



<http://www.youtube.com/plasmaphysik#p/a/u/1/ecU1rvMXT0w>

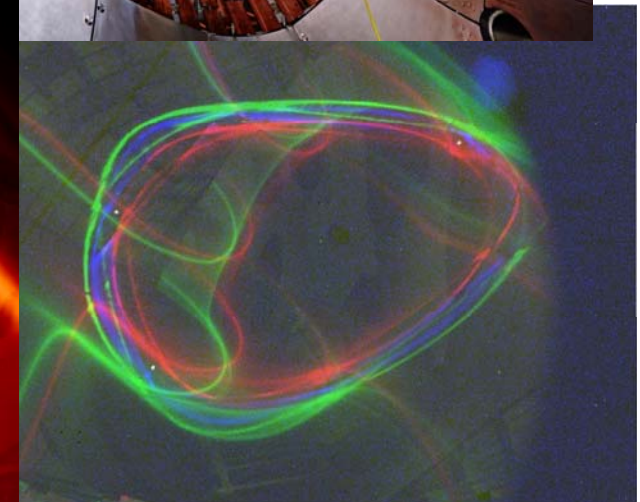
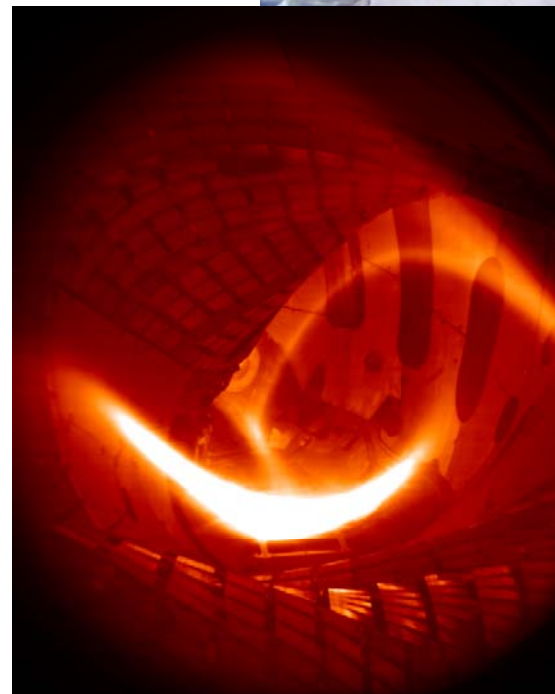
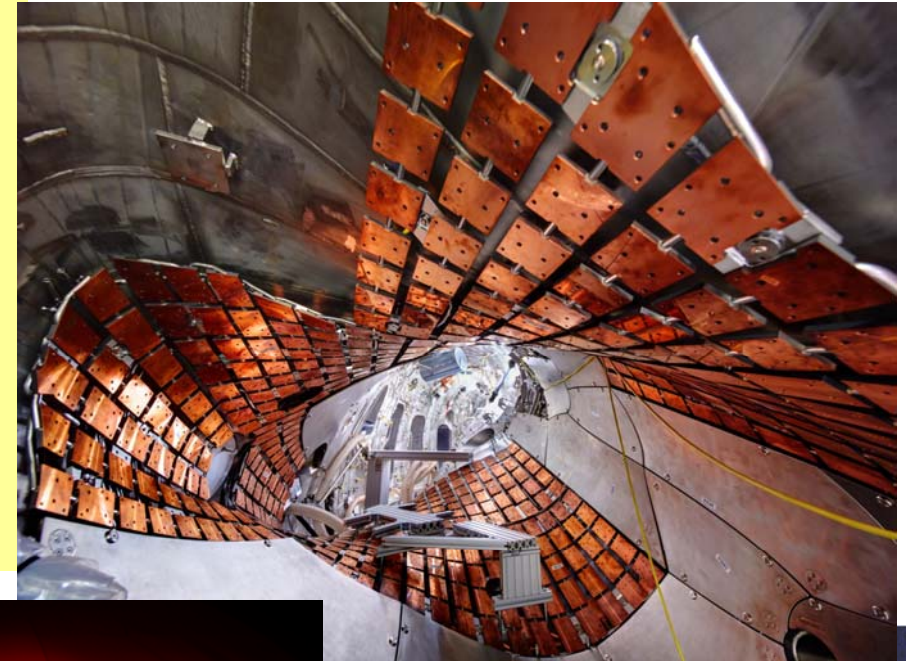
noch unvollständig ausgerüstete, ungekühlte erste Wand

integrale Inbetriebnahme, Konditionierung

10 Wochen:

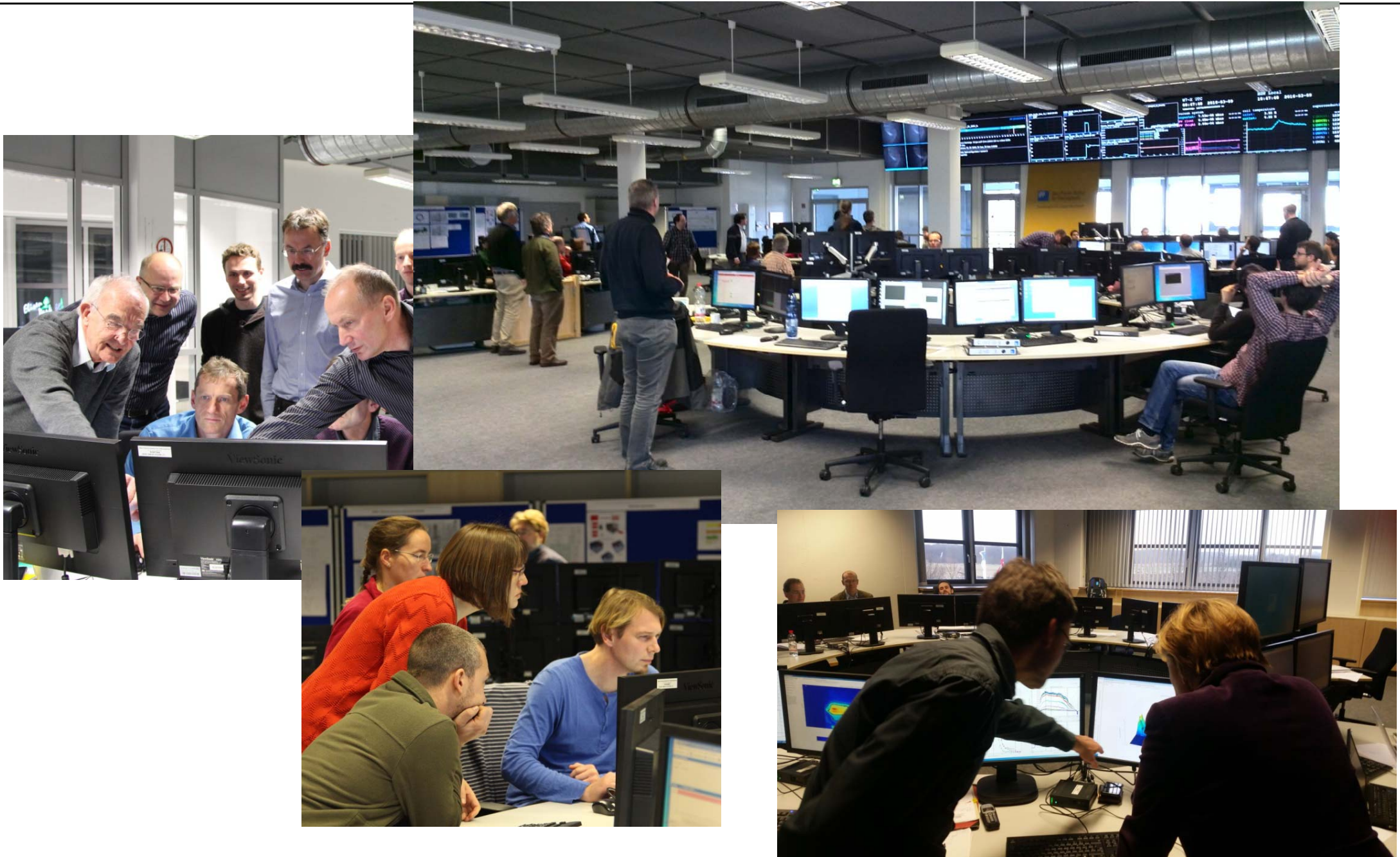
He-Plasmen (Reinigung)	10.12.2015
erstes Wasserstoff Plasma	03.02.2016
Experimente beendet	10.03.2016

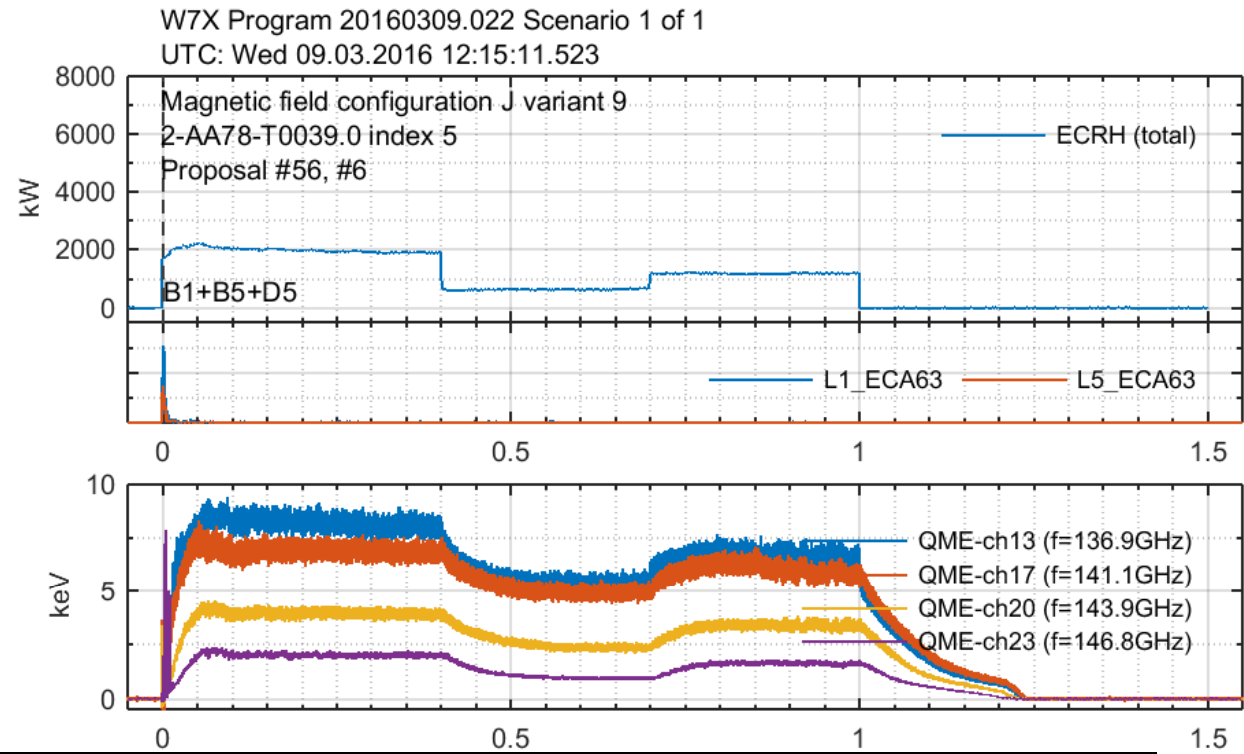
Plasmen begrenzt auf max. 2MJ (z.B. 4MW, 1.2s)



erstes H-Plasma
3.2.2016

Operational Phase 1.1: the team





noch unvollständig ausgerüstete, ungekühlte erste Wand

integrale Inbetriebnahme, Konditionierung

10 Wochen:

He-Plasmen (Reinigung)	10.12.2015
erstes Wasserstoff Plasma	03.02.2016
Experimente beendet	10.03.2016

Plasmen begrenzt auf max. 2MJ (z.B. 4MW, 1.2s)

-> schmale, sehr heiße Plasmen

Plasmaparameter z.T. besser als erwartet:

$$T_e = 10 \text{ keV}, T_i = 2 \text{ keV}, n_e = 3.5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$$

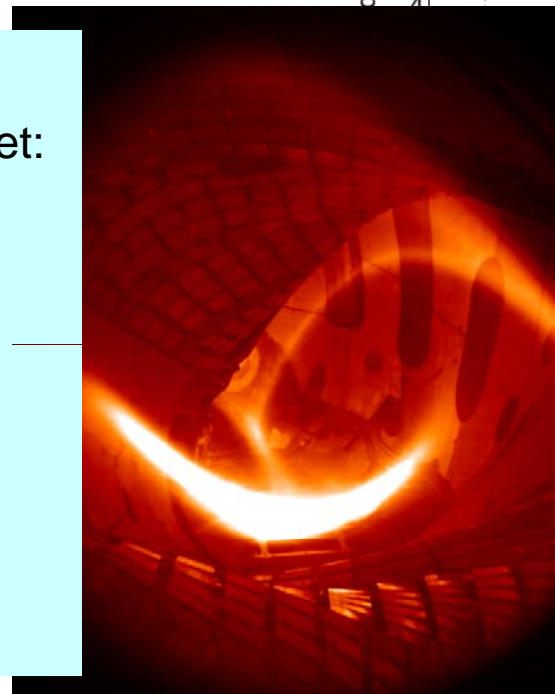
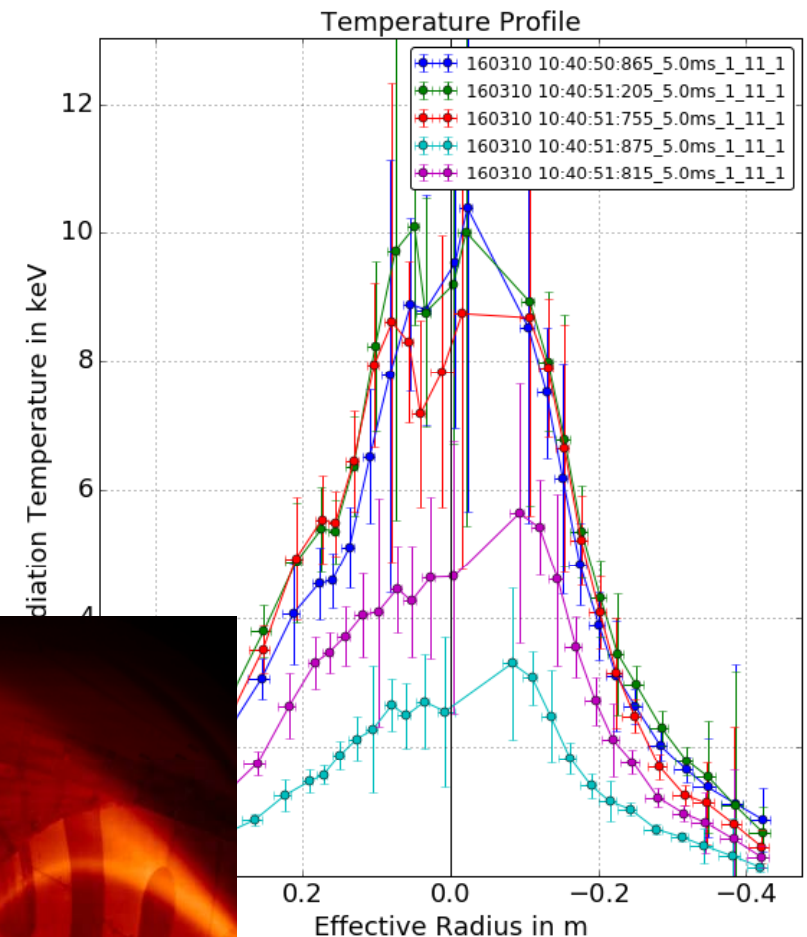
-> sehr gute Reproduzierbarkeit

-> dauerbetriebsfähige Heizszenarien !

-> mehr als 20 Diagnostiken im Einsatz

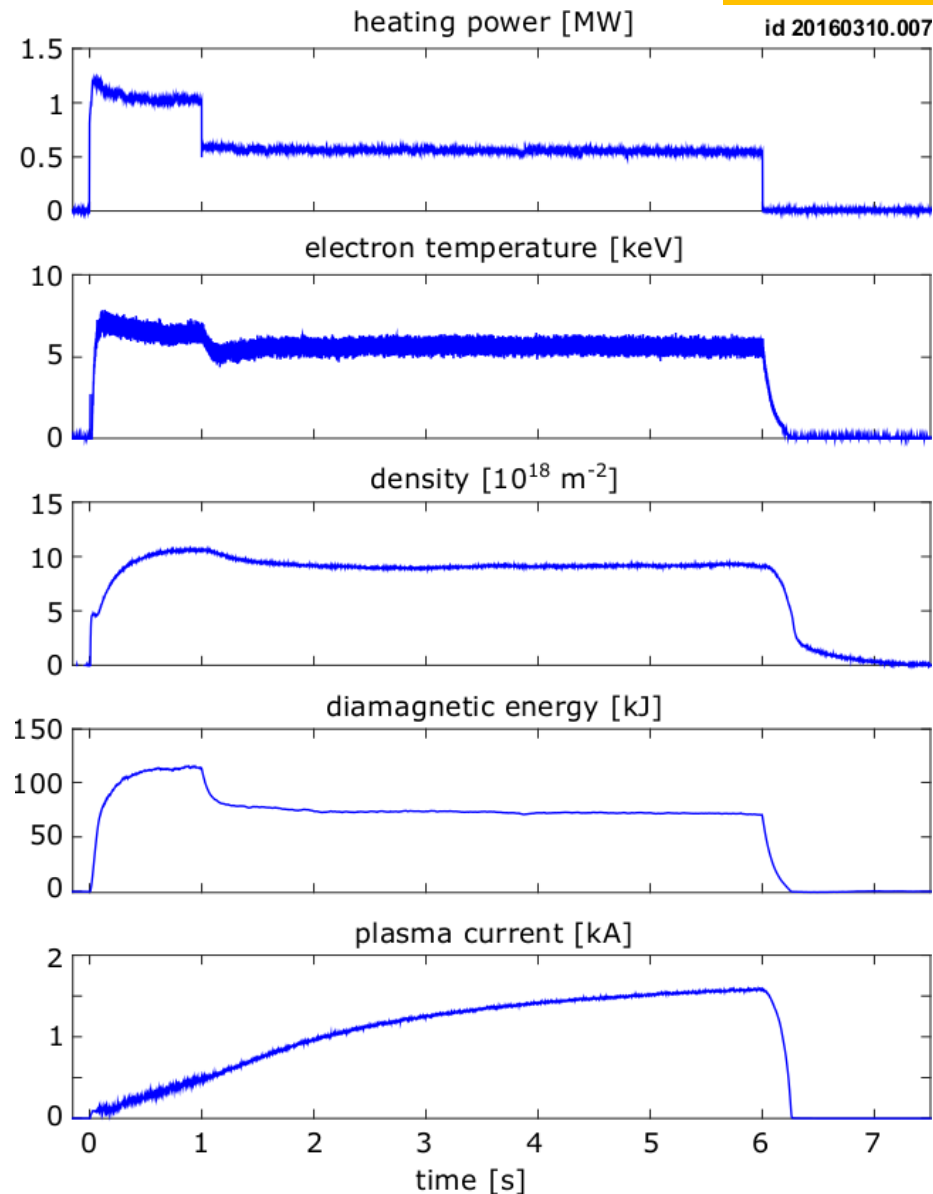
-> trotz Testbetrieb schon viele physikalische Ergebnisse

-> große (internationale) Beteiligung (video)

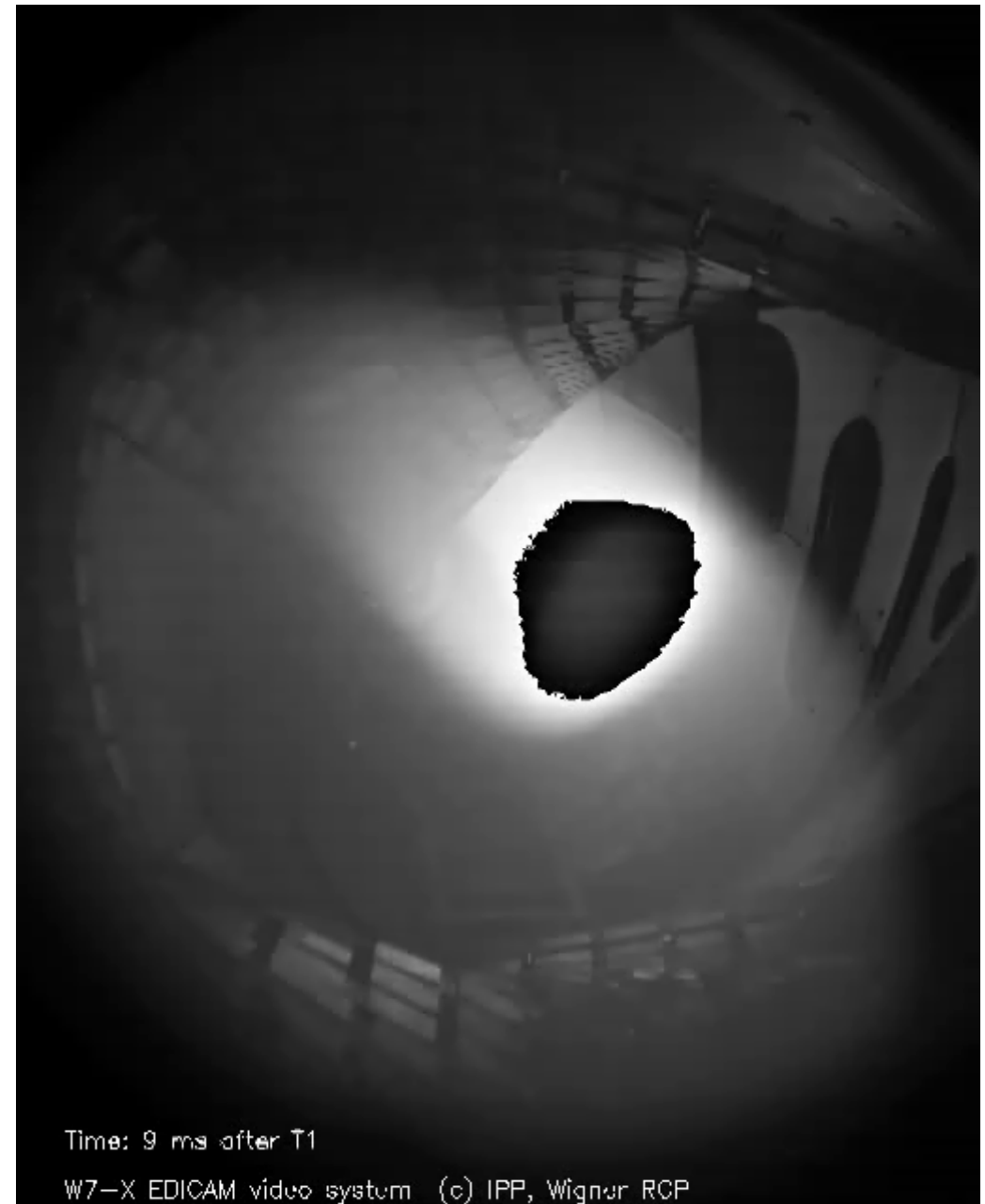


erstes H-Plasma
3.2.2016

6s-scenario

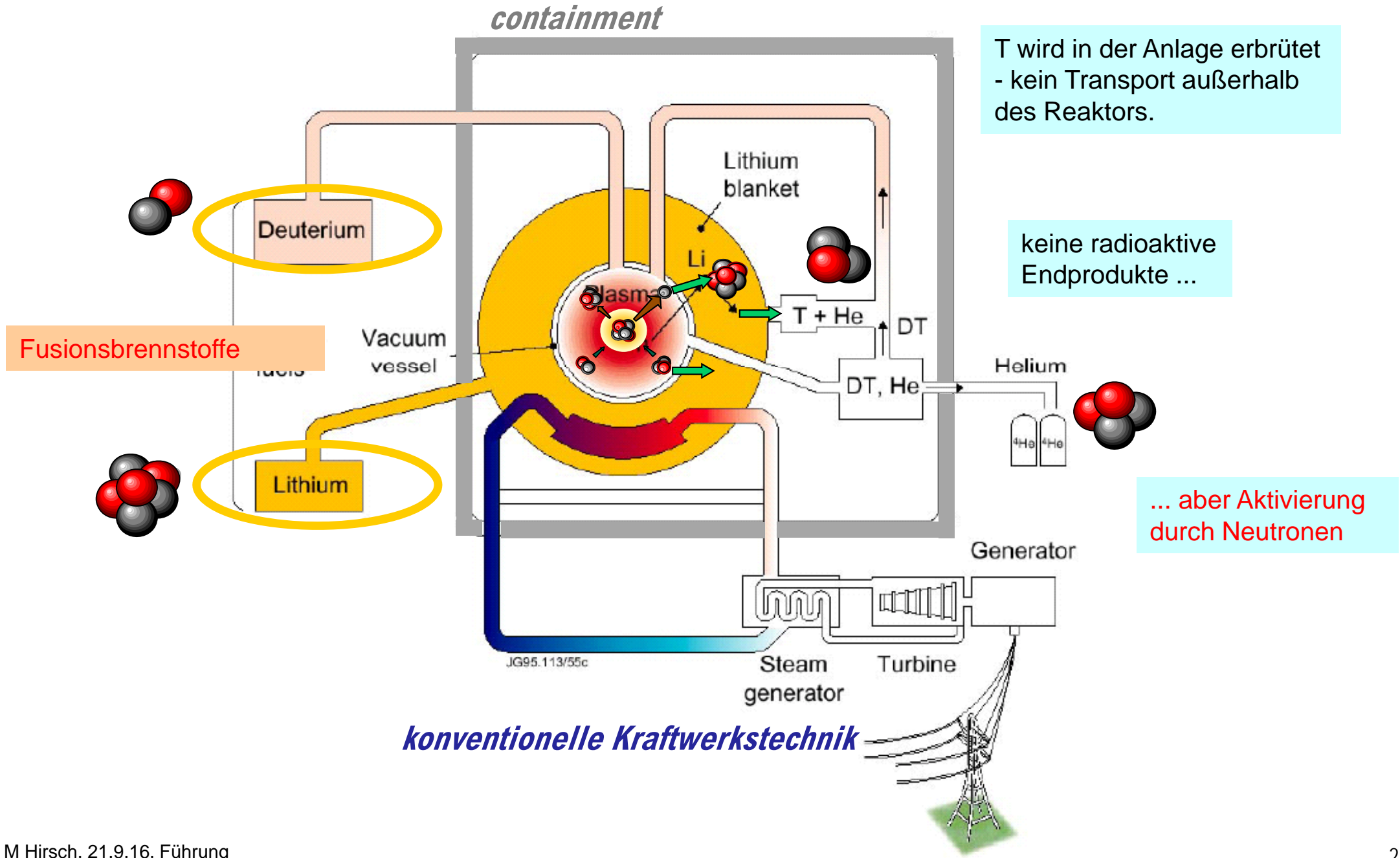


0.1 kA (counter ECCD) $< I_p < 2$ kA (with co-ECCD)

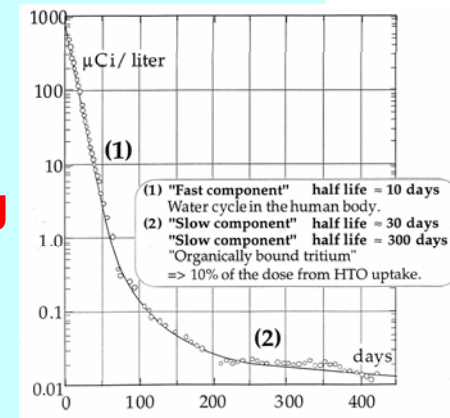




Ein Reaktor wäre etwa dreimal so groß wie W7-X



- > **thermischer Prozess:** **keine Kettenreaktion, kein plötzlicher Leistungsanstieg**
- > **Not-Abschalten:** Energieerzeugung bricht ab ~1min nachdem Gaszufuhr beendet, bzw. bei Überhitzung der ersten Wand durch Plasma-Verunreinigungen
keine Schnellabschaltung nötig in Fall eines Störfalls
- > **Nachwärme.** Leistungsdichte in Strukturmaterialien ~100mal kleiner als bei Spaltprodukten,
kein Schmelzen, selbst, wenn überhaupt keine Nachkühlung !
(ist auch ein Kriterium für Materialauswahl eines Reaktors)
aktivierte Materialien bleiben gebunden
- > **Brennstoff** im Plasma ~1g, Tritium im Reaktor ~1kg (Wand, Staub), auf dem Gelände ~5 kg
- > **maximal mögliche Freisetzung von Strahlung** (extreme Unfallszenarien)
erfordert **keine Evakuierung**
- > **Tritium:** **keine Anreicherung, keine langfristige Verstrahlung**
(Aufenthaltsdauer im Körper 10/30 Tage)
- > **Brüten findet im Reaktor statt -> kein Transport von strahlendem Material**
- > **geringes Proliferationsrisiko** (Technik schlecht zu verstecken und aufwendig für Waffenbau)



He („Fusionsasche“) ist ökologisch unbedenklich <-> Spaltreaktor, kein Treibhausgas

Aktivierung der Strukturmaterialien durch 14 MeV Neutronen: etwa gleiches Volumen wie aus Spaltreaktor,

aber durch die Wahl der Wandmaterialien kann die Abklingzeit klein gehalten werden

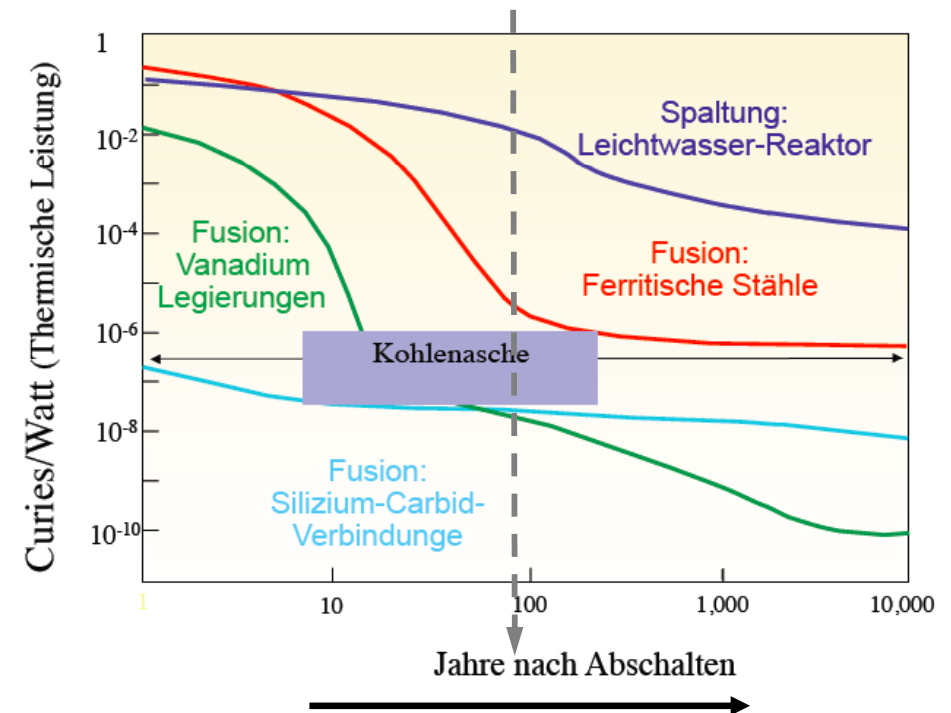
Zwischenlagerung < 100y und Recycling

thermischer Prozess, keine Kettenreaktion
-> kein plötzlicher Leistungsanstieg

Störfall: keine Schnellabschaltung notwendig
Energieerzeugung bricht ab ~1min nachdem Gaszufuhr beendet, bzw. bei Überhitzung der ersten Wand durch Plasma-Verunreinigungen.

Nachwärme ist akzeptabel

Tritium: im Plasma ~1g, im Reaktor ~1kg (Wand, Staub), auf dem Gelände ~5 kg



He („Fusionsasche“) ist ökologisch unbedenklich <-> Spaltreaktor, kein Treibhausgas

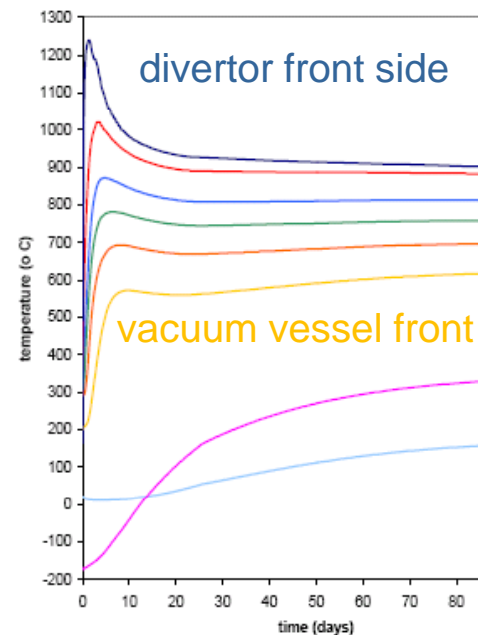
Aktivierung der Strukturmaterialien durch 14 MeV Neutronen: etwa gleiches Volumen wie aus Spaltreaktor,
aber durch die Wahl der Wandmaterialien kann die Abklingzeit klein gehalten werden
Zwischenlagerung < 100y und Recycling

thermischer Prozess, keine Kettenreaktion
-> kein plötzlicher Leistungsanstieg

Störfall: keine Schnellabschaltung notwendig
Energieerzeugung bricht ab ~1min nachdem Gaszufuhr beendet, bzw. bei Überhitzung der ersten Wand durch Plasma-Verunreinigungen.

Nachwärme ist akzeptabel

Tritium: im Plasma ~1g, im Reaktor ~1kg
(Wand, Staub), auf dem Gelände ~5 kg



PPCS-Studie: A "1.3*ITER"

peak results from rather large divertor and early decay heat (SS, W, Cu).

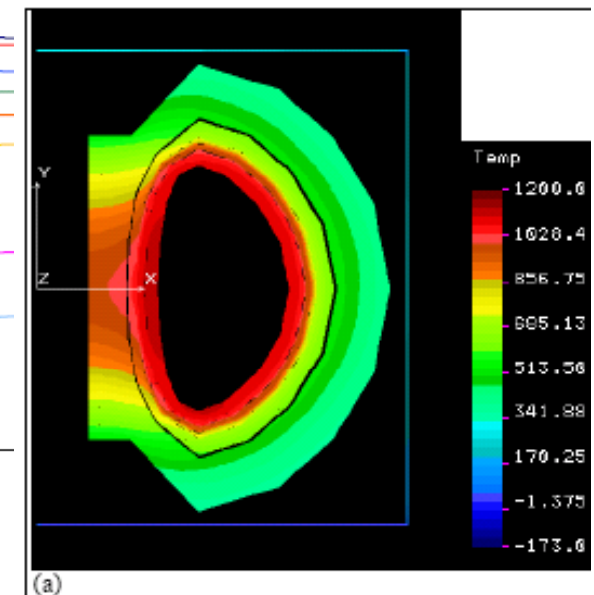


Figure 3.3 Temperature distribution (°C) in Plasma days after onset of bound

Normaler H-Betrieb:	Röntgenstrahlung : -> Halle ist Sperrbereich
D-D Betrieb:	$D + D \rightarrow 50\% : 3\text{He} + n + 3.3 \text{ MeV}$
	$D + D \rightarrow 50\% : T + p + 4.0 \text{ MeV}$
sekundär	$D+T \rightarrow \text{He} (3.5\text{MeV}) + n (14\text{MeV})$

Es gibt ein festgelegtes "Budget" an erzeugten 10^{19} Neutronen pro Jahr, man beginnt mit geringer D-Beimischung in H-Plasmen

Abschirmung durch 1.8 m Bor-Beton Wände:

Wasser- und Borgehalt. IPP Rechnungen: 100 l/m³ und 400ppm Bor würden reichen
gefordert in Absprache mit LAGUS: 120l/m³ und 1000 ppm Bor
erreicht würden von Bauunternehmer:

Beton-Hallentor: "betonärmere Stellen" (Radkästen) bei Bau durch Neutronenabsorber verstärkt.
Nachqualifizierung des Betons des Tores. **Wie ist das bei AUG ? Tritiumemissionen ?**

Risse beim Trocknen der Hallendecke:

Sicherstellen, daß es keine Schwachstelle in der Abschirmung gibt (Versorgungsleitungen etc.)

Tritium-Emissionen über Hallenabluft: seit Errichtungsgenehmigung wurde die Strahlenschutzverordnung geändert -> **Rainer fragen**

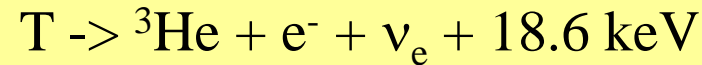
Entsorgung von aktivierten Anlagen Komponenten durch mittel-langlebige Aktivierungsprodukte: Co-60 -> Co-60 armer Stahl

=> Am Zaun ~80 µSv/y (Grenzwert 1mSv/y),
alles andere (Gamma, C¹⁴, Ar⁴¹, Tritium, Grundwasser ...) um Größenordnungen vernachlässigbar.

=> Auflagen vergleichbar einem normalen Krankenhaus/radiologischen Labor



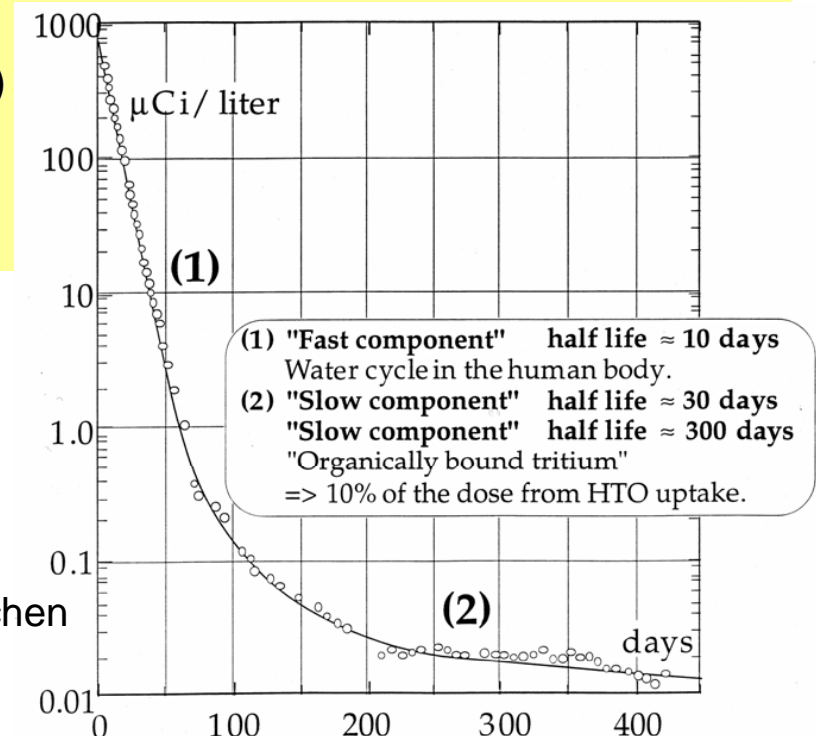
Tritium ist radioaktiv:



- > β -Strahler, Halbwertszeit 12.3 Jahre
- > geringe Radiotoxizität: Eindringtiefe in Haut 6 μm
- > sehr mobil, schwer zurückzuhalten: kann in Wasser leicht in den biologischen Kreislauf geraten !
- > keine Anreicherung, verteilt sich "wie Wasser"
 - = keine langfristige Evakuierung im Fall einer Freisetzung
- > Brennstoff im Plasma $\sim 1\text{g}$, im Reaktor $\sim 1\text{kg}$ (Wand, Staub)
auf dem Gelände $\sim 5\text{-}7 \text{ kg}$
- > Unfallszenarien: max. Freisetzung (Erdbeben, ..) $\sim 1\text{kg}$

Abklingen nach Inhalation:

- 1) Wasserkreislauf des Körpers $\sim 10\text{Tage}$
- 2) in Gewebe gespeichert vgl. auch mit ${}^{40}\text{K}$ im Knochen





Einige Zahlen zu Wendelstein 7-X



Gesamtkosten 1995-2014

Investitionen Wendelstein 7-X:	370 Mio. Euro
Gesamtausgaben Standort Greifswald:	1.060 Mio. Euro

Finanzierung bis 2011

Bund	573,5 Mio. Euro
Mecklenburg-Vorpommern	120,0 Mio. Euro
Euratom	<u>191,4 Mio. Euro</u>
	884,9 Mio. Euro

Umsatz in MV bis 2011

Aufträge in MV	74 Mio. Euro
Gehälter	<u>236 Mio. Euro</u>
	310 Mio. Euro

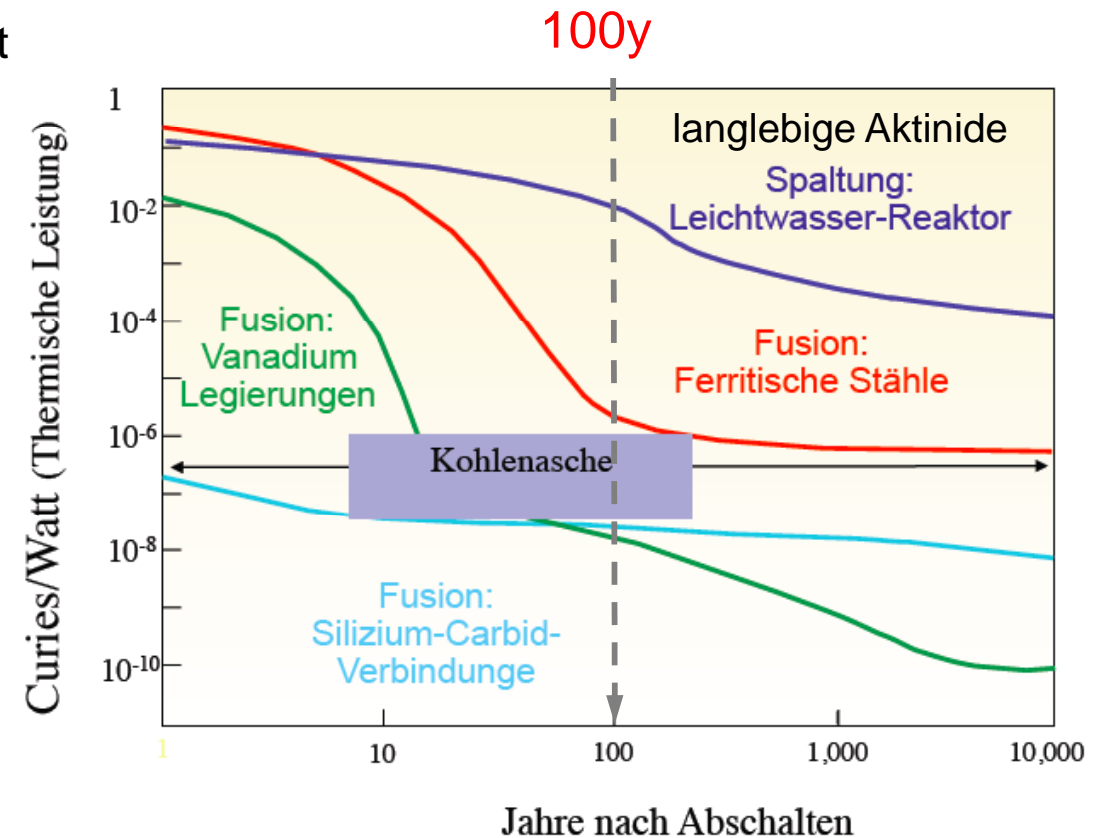
- He („Fusionsasche“) ist ökologisch unbedenklich <-> Spaltreaktor;
AUCH : kein CO₂ !

- Strukturmaterialien werden durch 14 MeV Neutronen aktiviert

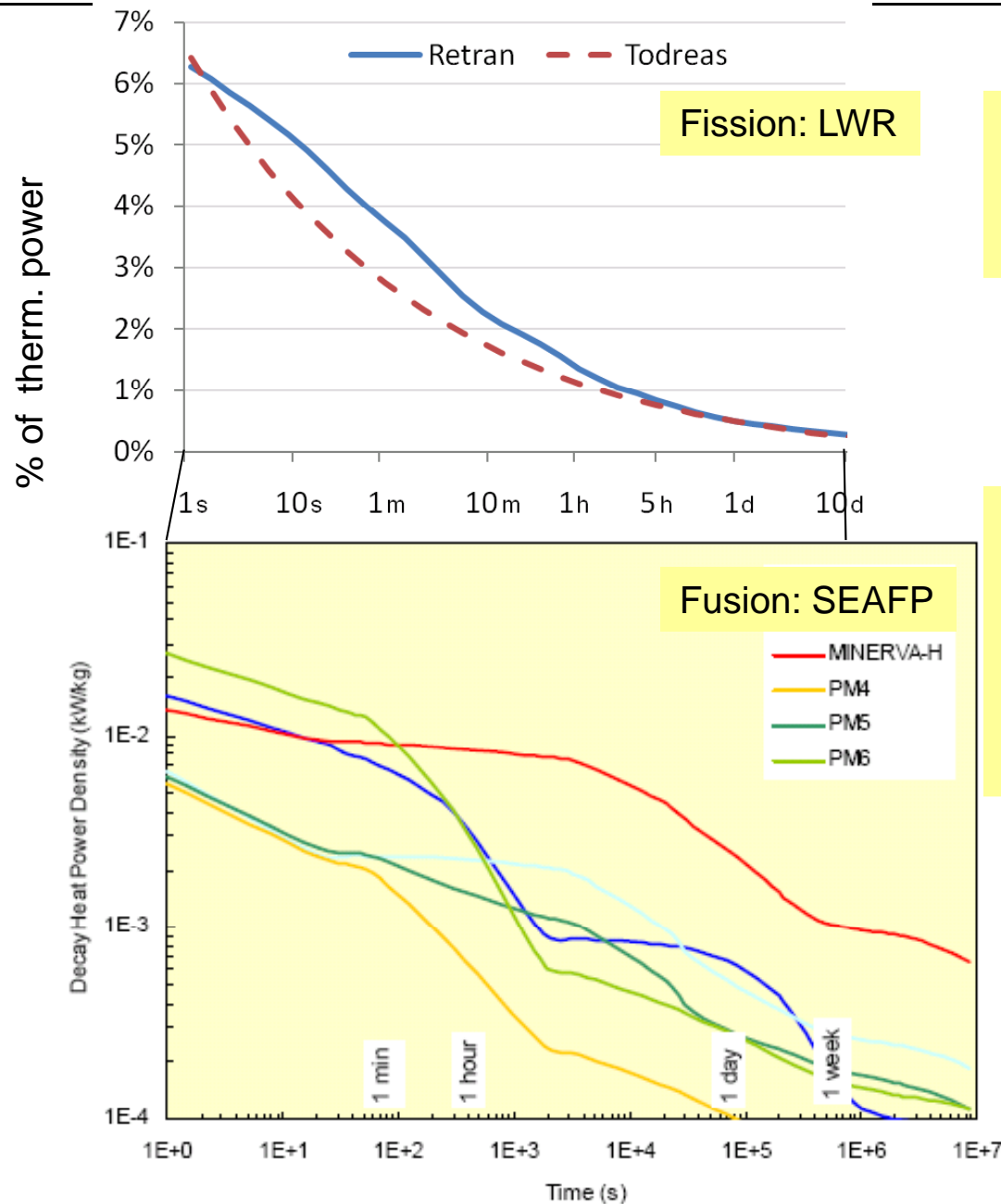
Gleiches Volumen wie Abfälle aus Spaltreaktor

aber durch die Wahl der Wandmaterialien kann die Abklingzeit klein gehalten werden:

Zwischenlagerung < 100y
und Recycling möglich



... die Menge der erzeugten Aktivität ist ähnlich wie bei der Spaltung,
aber ihre Konzentration und die Abklingzeiten sind um Größenordnungen kleiner ...



Fission (core): @1.2GWe, 3GWth, 100 t

decay heat (immediate): 6% of P_{th} -> **1.8 kW/kg**

decay heat @10d ~0.2% of P_{th} -> **60 W/kg**

Cook_2001_SEAFP

Fusion: @1.2GWe, 3GWth

decay heat (immediate): -> **10 W/kg**

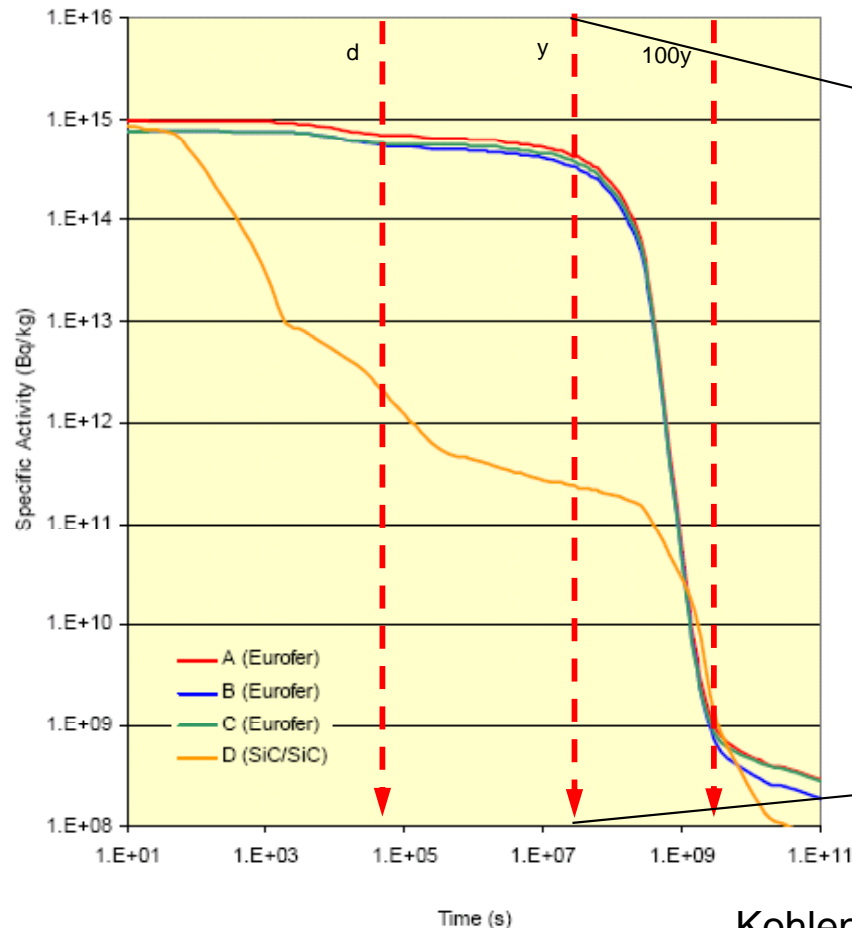
decay heat @10d ~ **0.3 W/kg**

Große Variation abhängig von Engineering !

Mittel über alle Komponenten:
~100 fach geringere Restwärme / kg

Figure 5: Decay heat power density, averaged over the blanket, for the six SEAFP blankets.

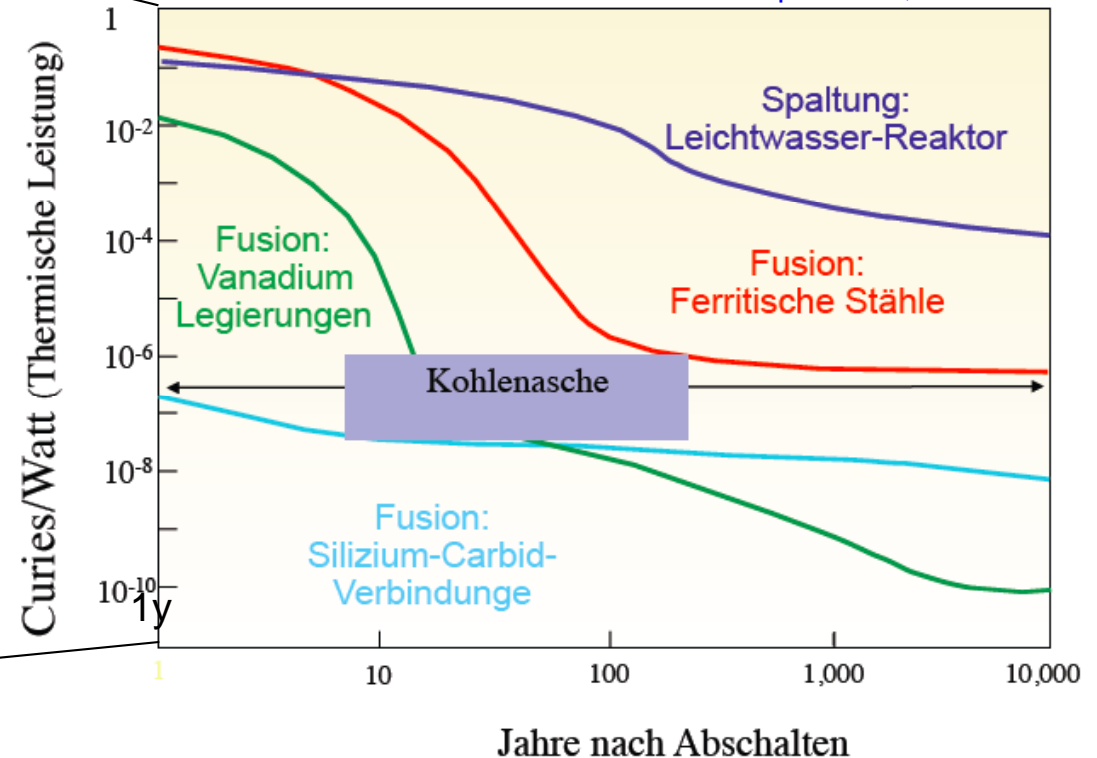
Reaktortypen: PPCS-A to -D



specific activity in first wall [PPCS]

Fusionsreaktor: Mittel über alle Komponenten:
~ 100 fach geringere Restwärme / kg

Graphik: IPP, S Günther



Kohlenasche

Die weltweit jährlich für die Stromerzeugung verwendete Kohle enthält etwa 10.000 t Uran und 25.000 t Thorium.. Aktivität von Kohleasche etwas höher als der Mittelwert in der Erdkruste. Allerdings nur 1-10% werden über Flugasche verteilt, der Rest endgelagert.

... nicht die Menge der als "Abfall" erzeugte Aktivität, sondern ihre Konzentration ist das Problem ...

- He („Fusionsasche“) ist ökologisch unbedenklich <-> Spaltreaktor;
AUCH : kein CO₂ !
- Strukturmaterialien
werden durch 14 MeV Neutronen aktiviert

Störfall: keine Schnellabschaltung notwendig
Energieerzeugung bricht ab ~1min nachdem Gaszufuhr beendet ,
bzw. bei Überhitzung der ersten Wand durch Plasma-
Verunreinigungen

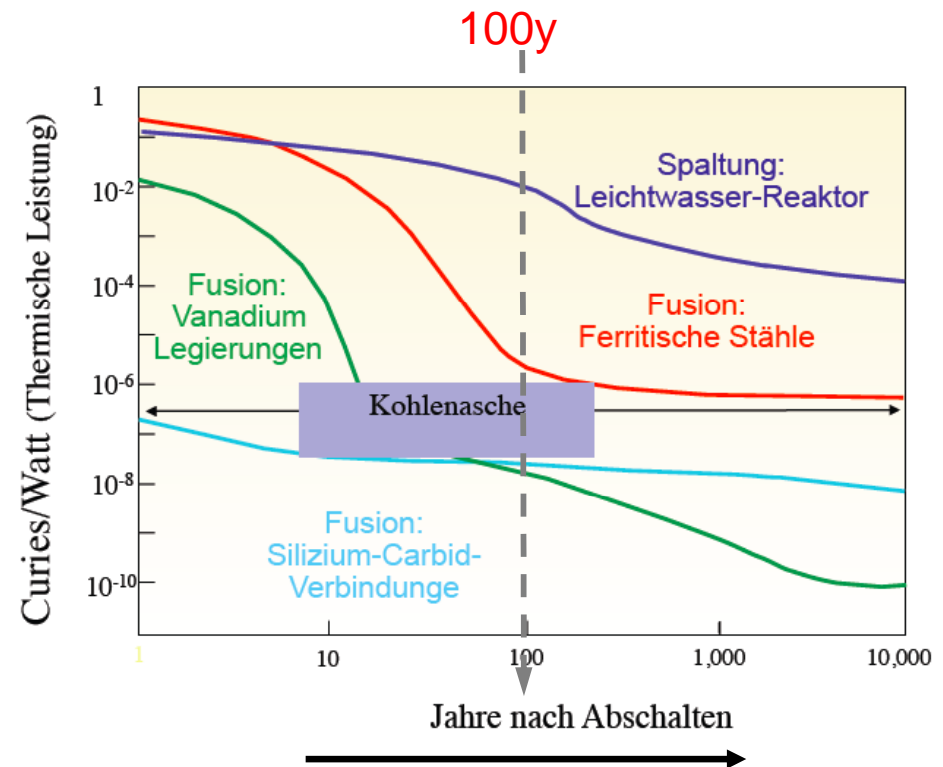
Nachwärme ist akzeptabel

Tritium: im Plasma ~1g, im Reaktor ~1kg (Wand,
Staub), auf dem Gelände ~5 kg

Abfälle: etwa gleiches Volumen wie aus
Spaltreaktor

aber durch die Wahl der Wandmaterialien kann
die **Abklingzeit** klein gehalten werden:

Zwischenlagerung < 100y und Recycling



... die nicht die anfänglich erzeugten Aktivität, sondern
ihre
Konzentration ist das technische Problem ...

natürlich:

kosmische Strahlung am Boden : 0.3 mSv/y

(Flug Frankfurt -Tokio etwa 0,05 mSv)

terrestrische Strahlung BRD im Mittel 0.3 mSv/y
(regional s. Bild)

Radon 1.1 mSv/y (deutlich höher in Gebäuden)

innere Strahlung (Kalium 40) 0.4 mSv/y

=> (BRD): ~2.4 mSv/y (1 und 5 mSv/y)

vom Menschen:

-> Medizin (BRD) 1.9 mSv/y

-> KKW (BRD, Normalbetrieb): 0.01 mSv/y

-> Kernwaffentests (2010): 0,005 mSv/y

"erlaubt" strahlenexponierte Personen bis 20mSv/y

(nicht schwangere Frauen!), Einzelfälle 50 mSv/y

-> Tschernobyl < 0.016 mSv/y

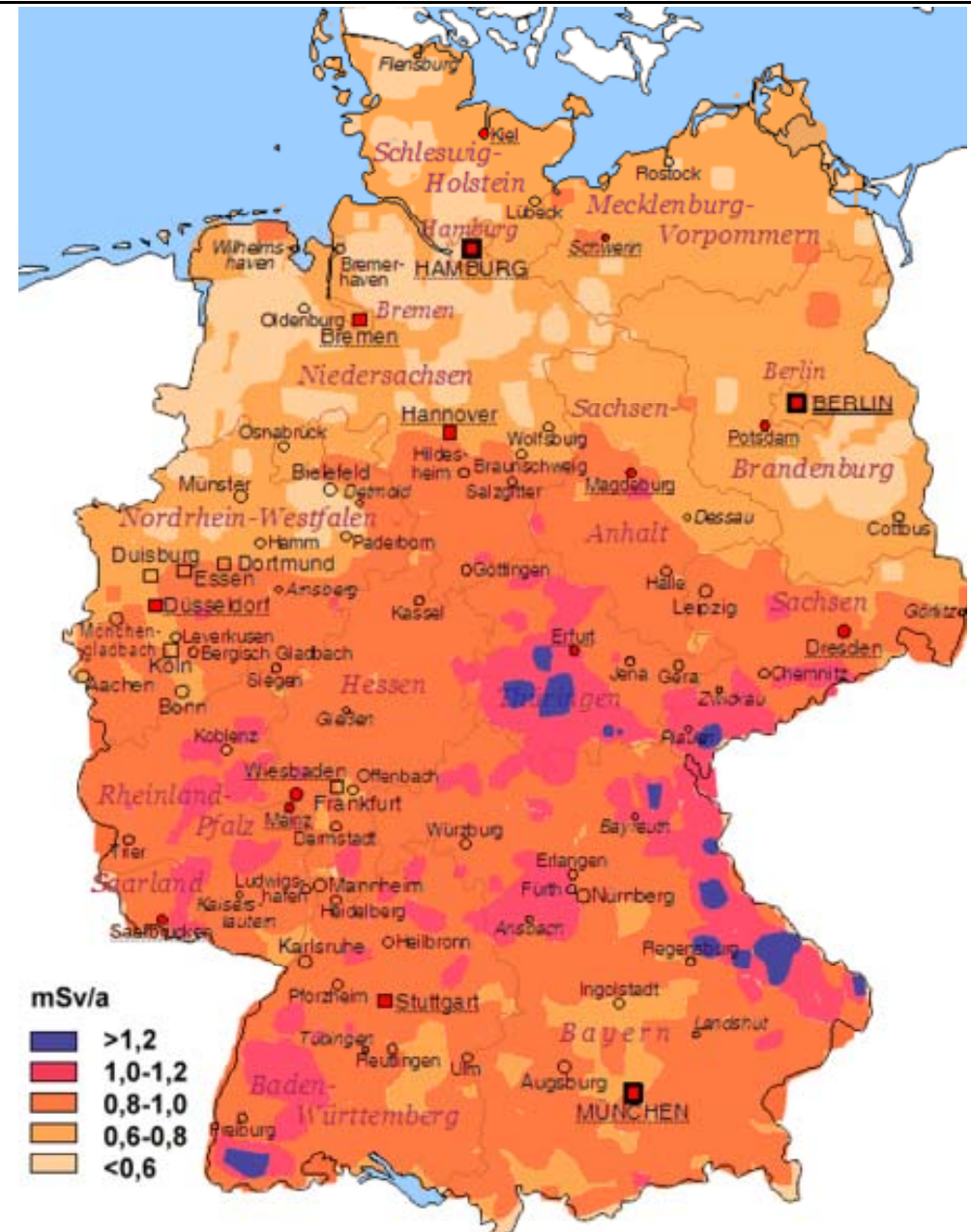
=> BRD im Mittel ~ 2 mSv/y

Grenzwerte für zusätzliche Strahlung:

betrieblicher Überwachungsbereich: > 1 mSv/y (Warnschild)

Kontrollbereich: > 6 mSv/y (Dosimeter)

Sperrbereich: >3mSv/h ~ 26000mSv/y



Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:
Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung + Wikipedia (Bild)



www.ipp.mpg.de

IPP

Kernfusion als Option zur Energiegewinnung - das Projekt WENDELSTEIN 7-X

Dr. Matthias Hirsch

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik,
Greifswald, EURATOM-Ass.

matthias.hirsch@ipp.mpg.de

Führung, 21.6.2016

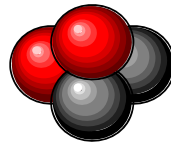
Kernverschmelzung

Kernspaltung

thermonukleares Brennen:
-> hohe Temperatur

Kettenreaktion:
-> Neutronen

Helium



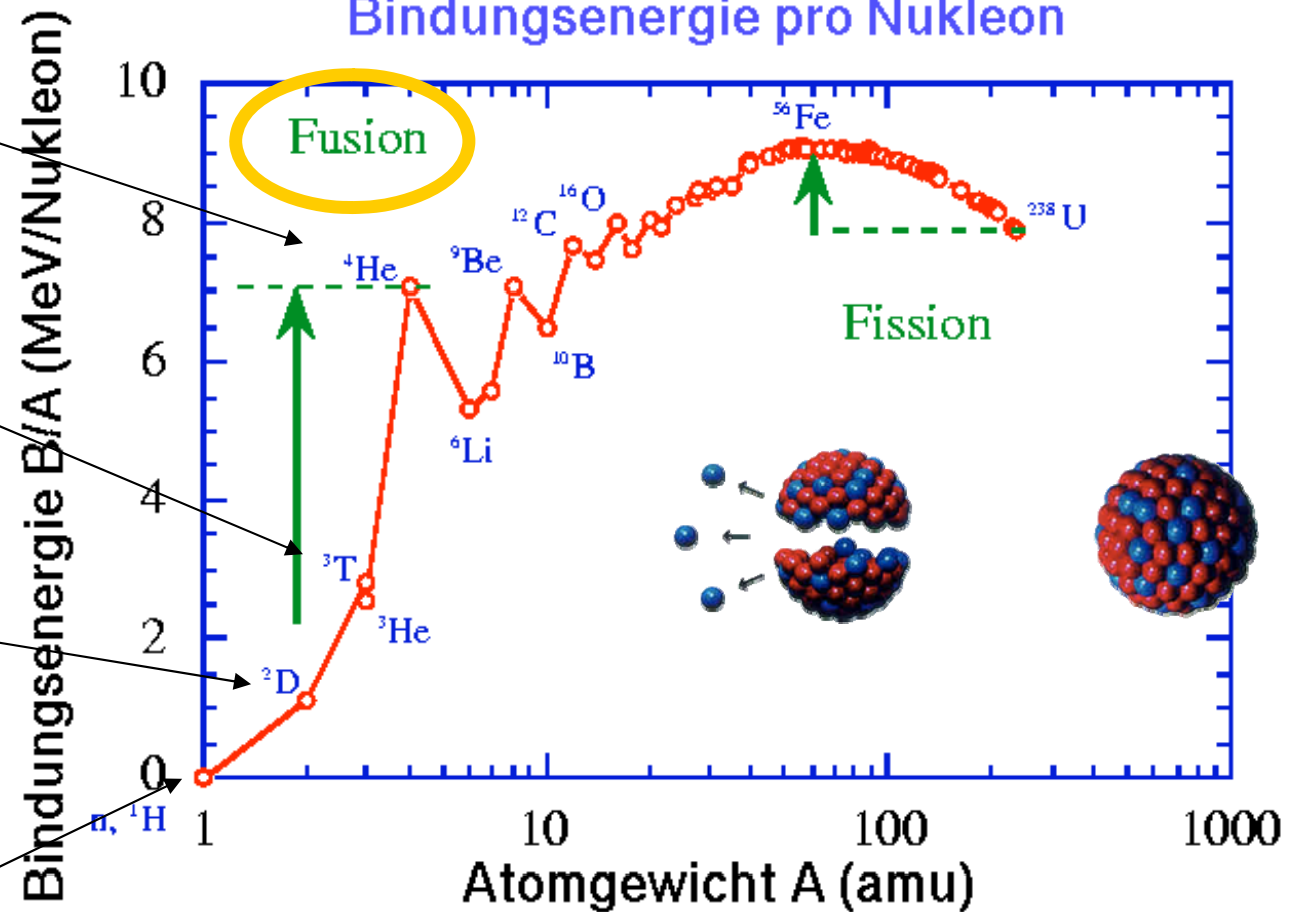
über-schwerer Wasserstoff
(Tritium)



schwerer Wasserstoff
(Deuterium)

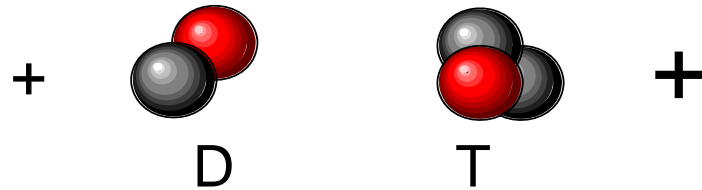


Wasserstoff (Proton)



Reaktionswahrscheinlichkeit
= Wirkungsquerschnitt 10^{-27}

den höchsten Wirkungsquerschnitt
hat die Fusion aus DT



schwache W W (s. Sonne) zu uneffizient

Es gäbe aber auch Alternativen ...

-> Thriller: B. Schätzing: "LIMIT"

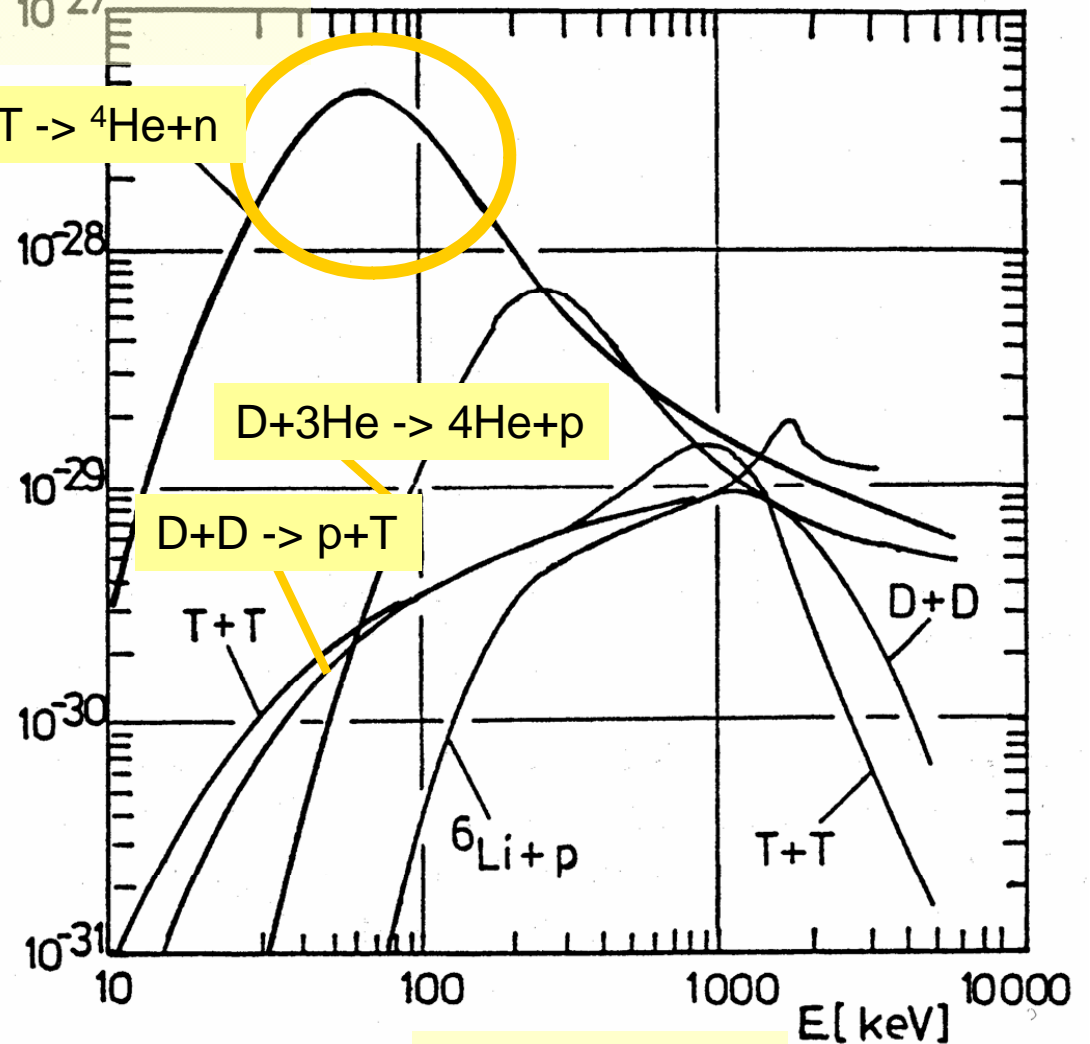
(reine He3-Fusion: keine Neutronen,
daher praktisch keine Radioaktivität)

aber: höhere Coulomb-Abstoßung ...

D+T \rightarrow $^4\text{He}+n$

D+3He \rightarrow $4\text{He}+p$

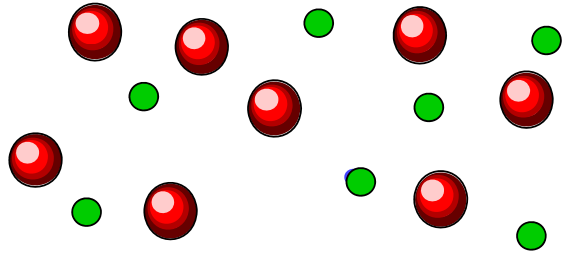
D+D \rightarrow p+T



100 Mio. K

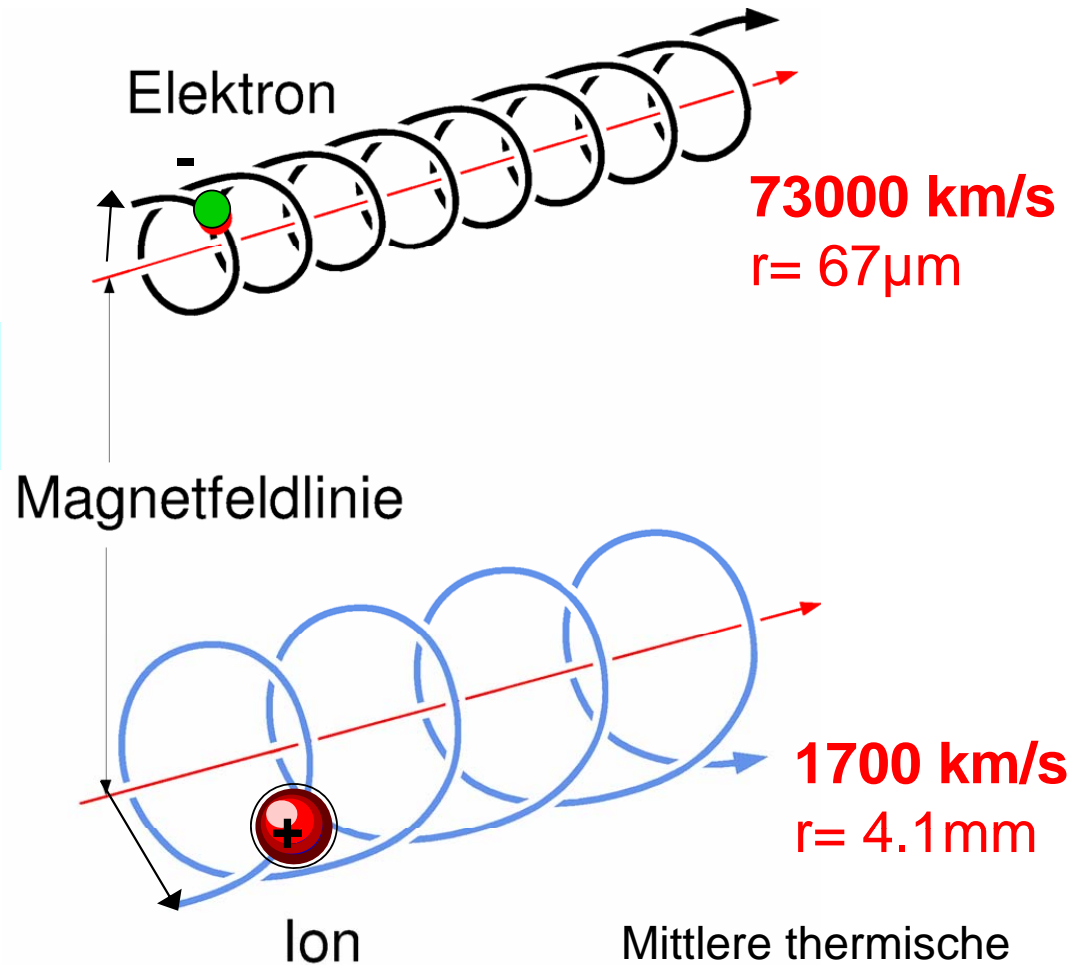
Temperatur

Ein Plasma ist ein sehr heißes Gas und leitfähig

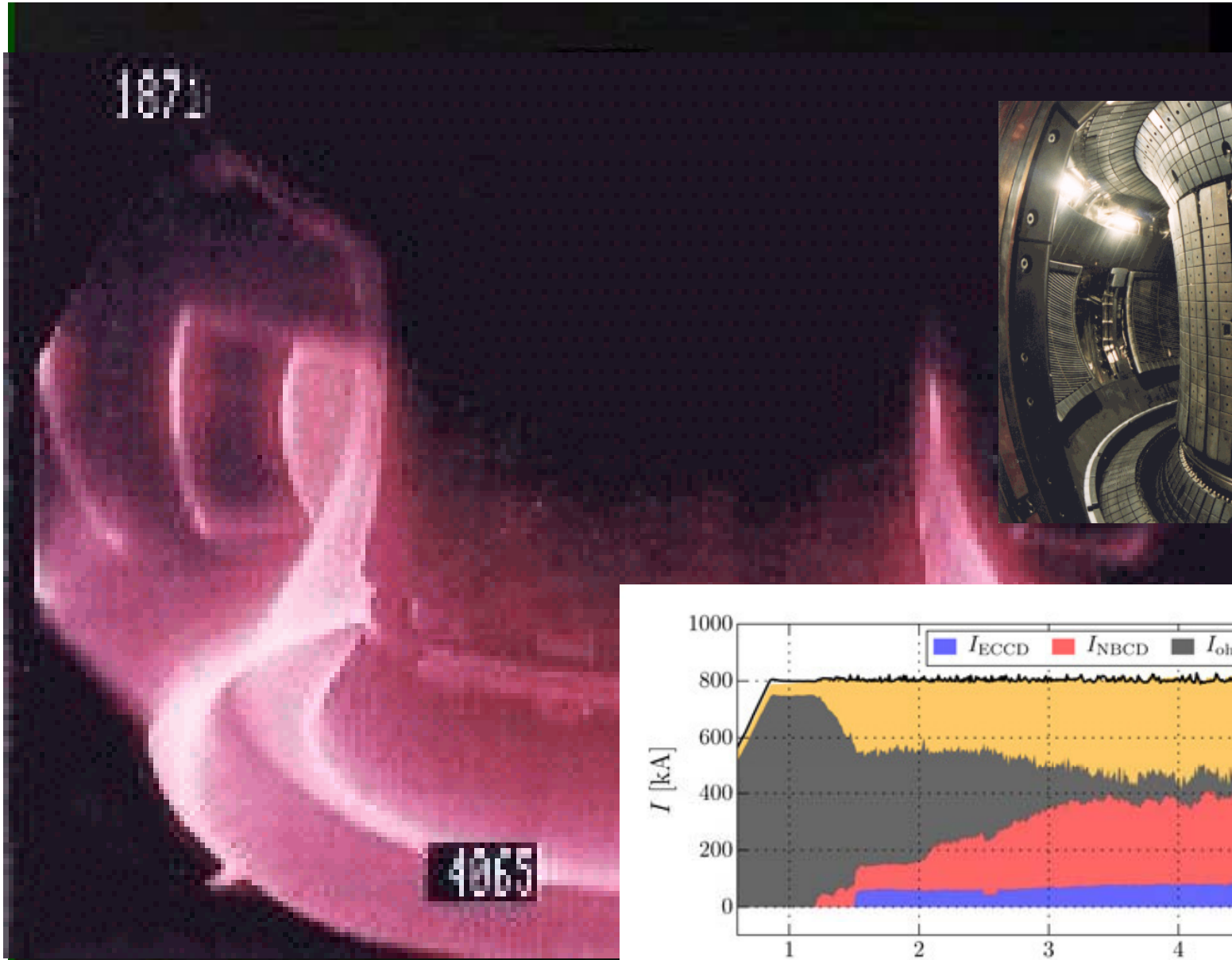


Magnetfelder zwingen geladene Teilchen auf Kreis- bzw. Spiralbahnen

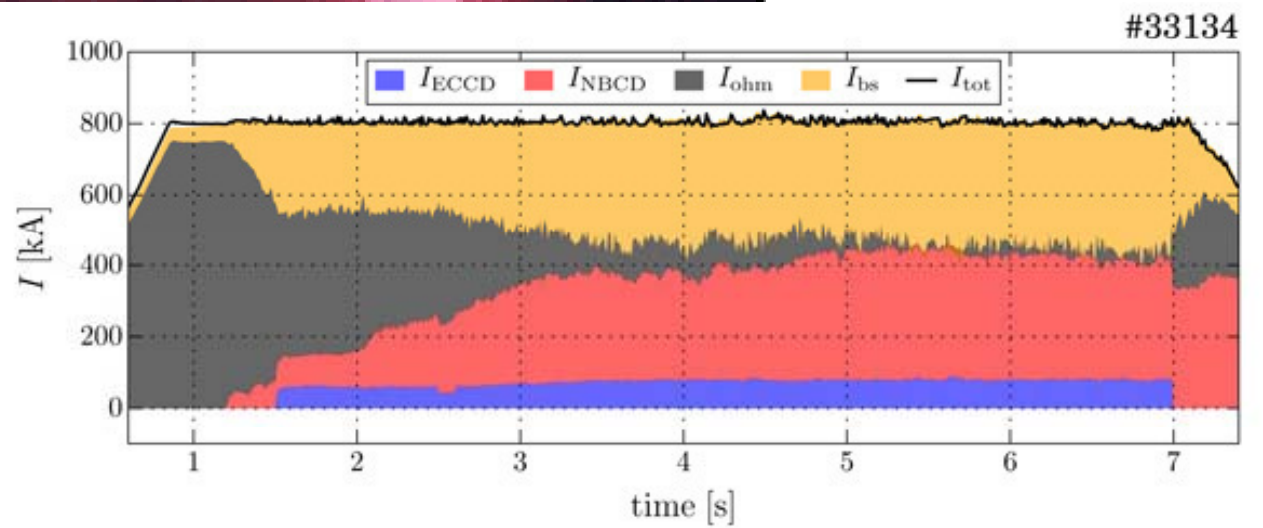
Stärke des Magnetfelds, Teilchenmasse und Teilchengeschwindigkeit bestimmen den **Gyrationsradius**



Mittlere thermische
Geschwindigkeit und
Radius bei
100 Mio. K (10keV):



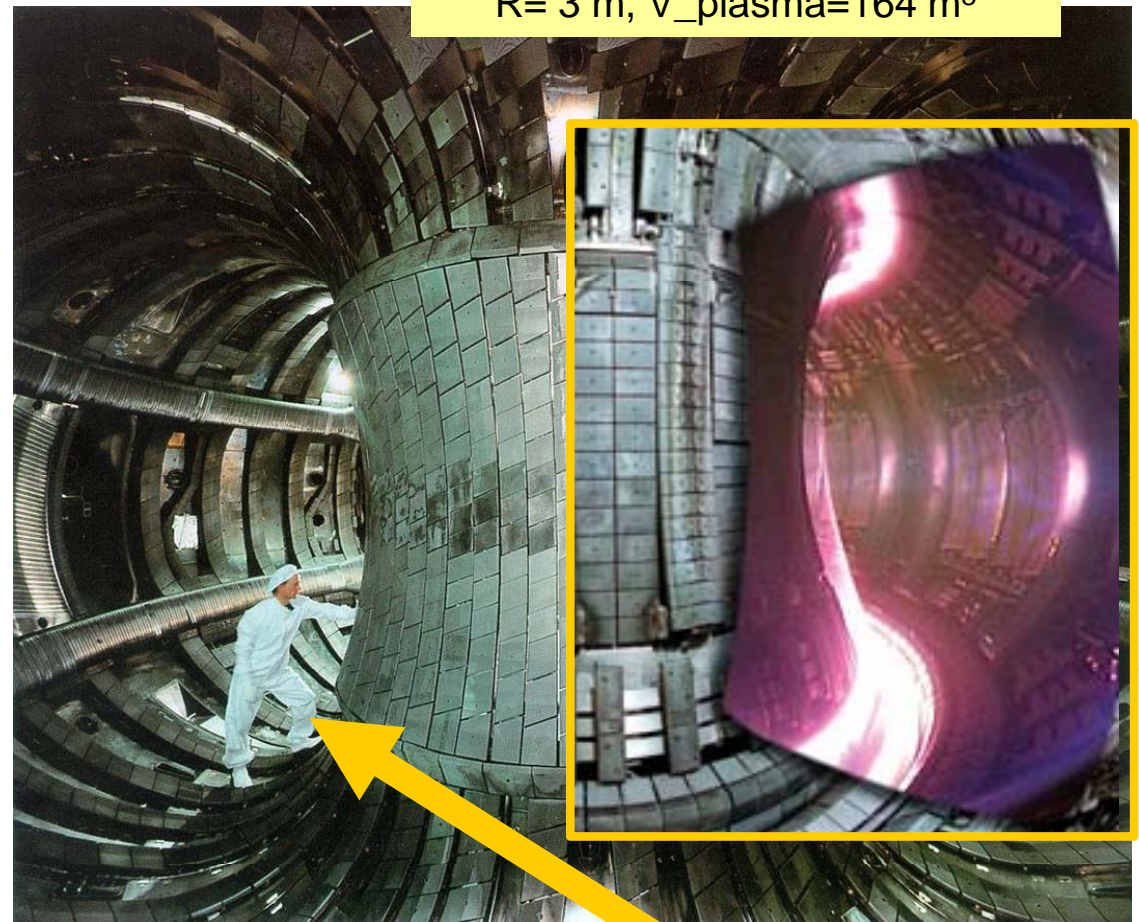
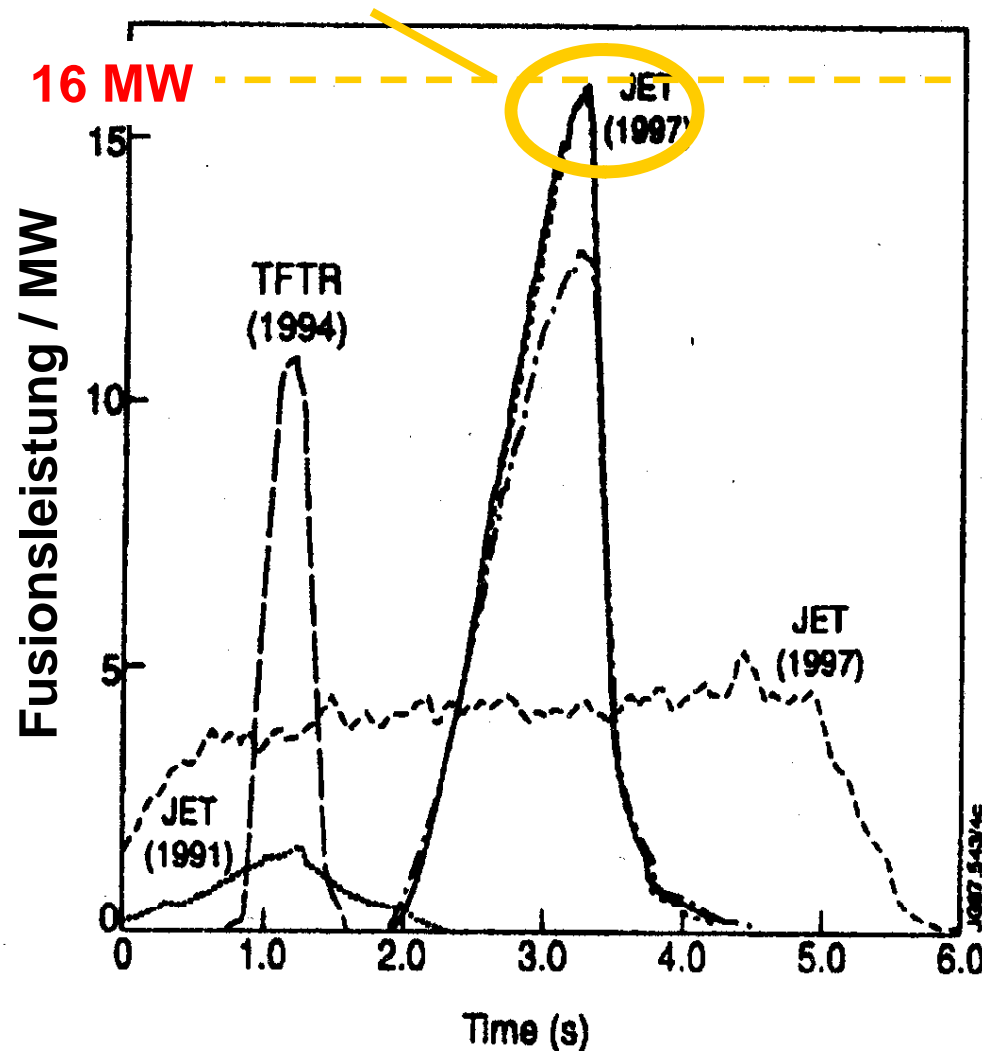
$R=1.65\text{m}$, $V_{\text{plasma}}=14\text{ m}^3$



Was hat man erreicht ?

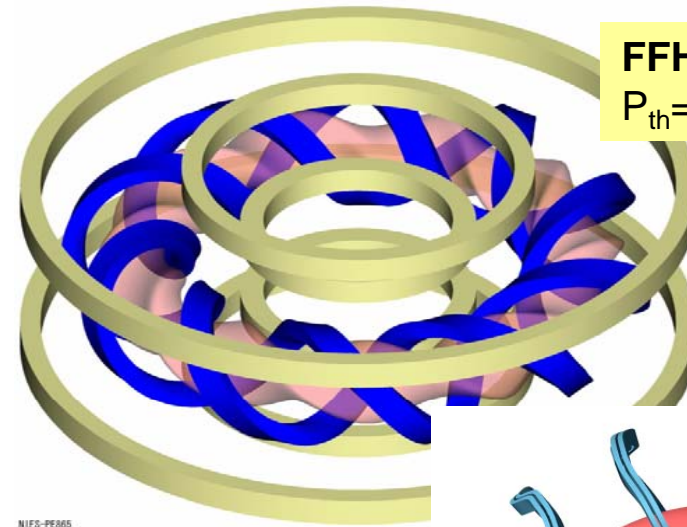
Temperatur ~40 keV (etwa Doppelte des Benötigten)
Dichte ~10fache des Benötigten
Energieeinschluß: Faktor 4 fehlt !

■ Joint European Torus (JET), Gemeinschaftsprojekt seit 1978, Culham, UK
scientific "breakeven" nahezu erreicht (Fusionsleistung = 0.65 * Heizleistung)



Stellarator specific reactor issues:

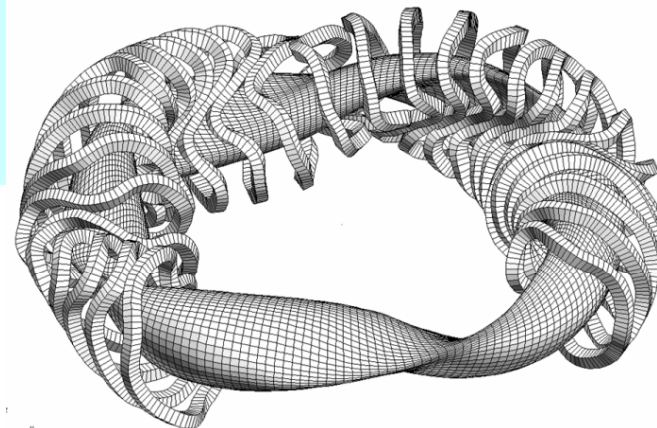
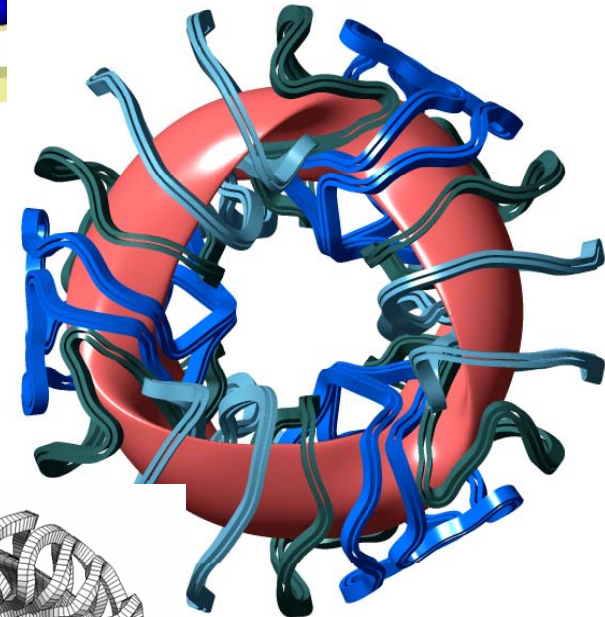
- > steady state -> reduced fatigue effects
- > no current drive -> low recirculating power
- > **mechanical forces** between toroidal and helical windings and resulting space requirements for support structures
- > **space** between plasma edge and coil at locations with strong on inboard side required for blanket and shielding
- > therefrom and from minimization of Shafranov shift tendency to **larger R**
- > allows for reduced neutron wallload, inboard launch (heating)



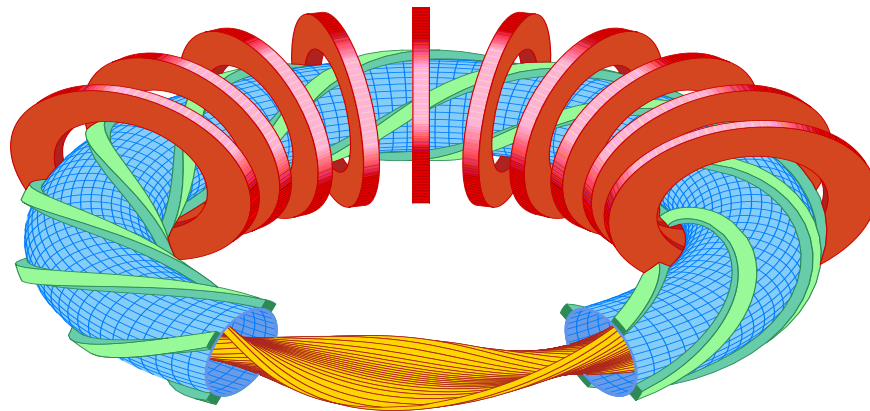
FFHR, R=20m
 $P_{th}=3$ GW

NIFS-PR885

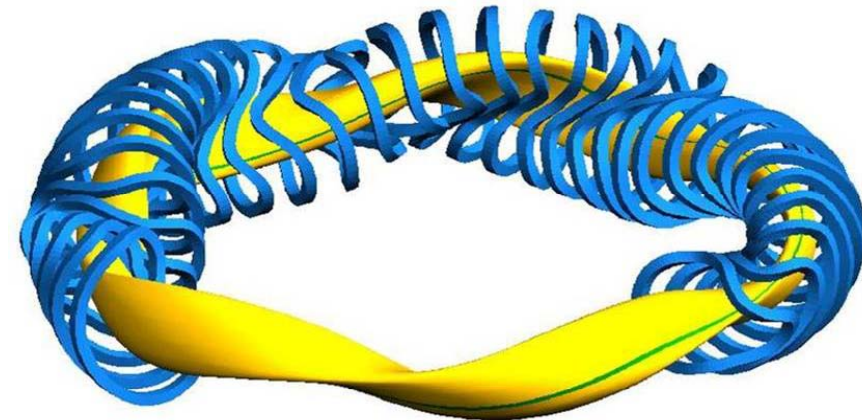
ARIES-CS, R=8m
 $P_{th}=4$ GW



HSR4, R=18m
 $P_{th}=3$ GW



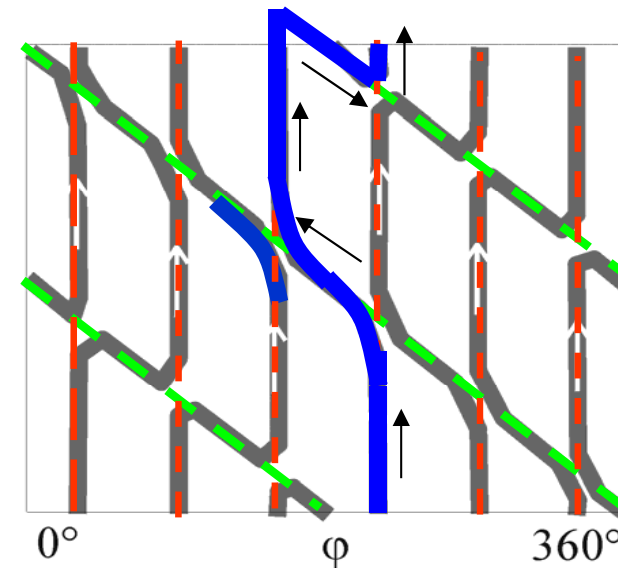
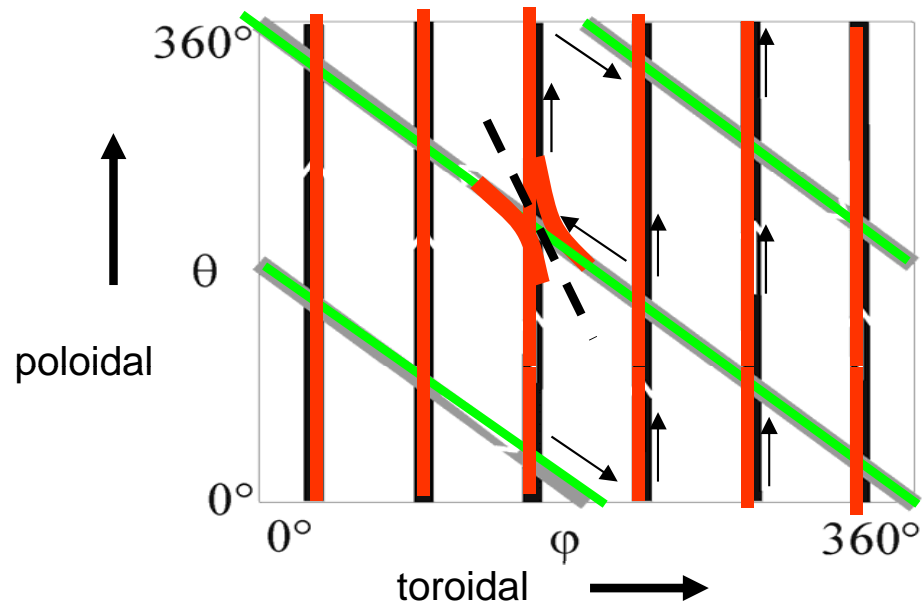
toroidale Spulen helikale Spulen



W7-X

modulare Spulen

“abgerollte” Torus Oberfläche:



-> keine riesigen helikalen Spulen
-> beliebige Magnetfelder erzeugbar -> **Optimierung**

das Konzept funktioniert: der teil-optimierte Stellarator Wendelstein 7-AS

(Garching , Experiment beendet Juli 2002)

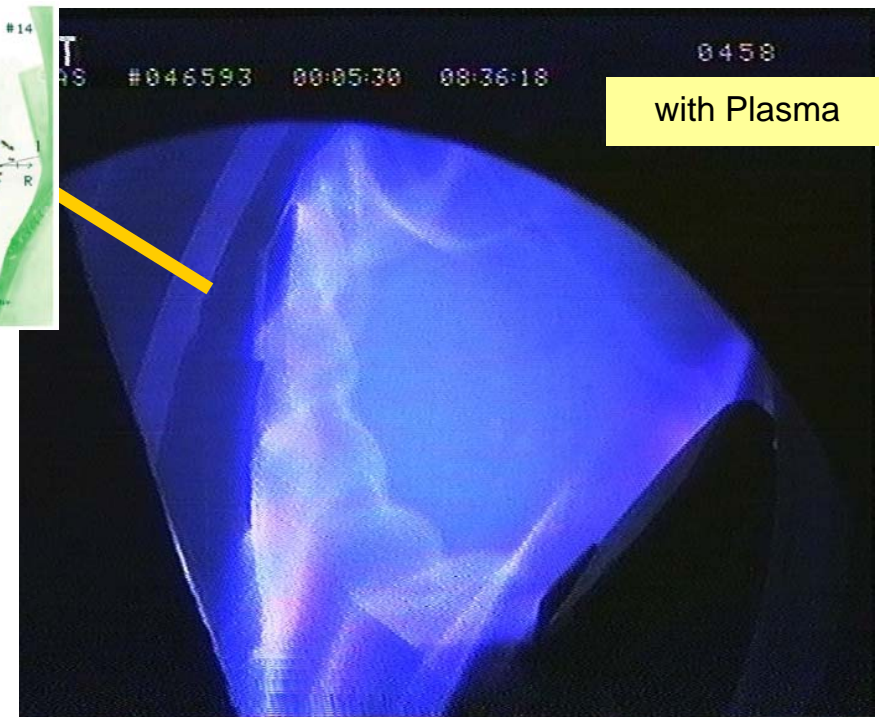
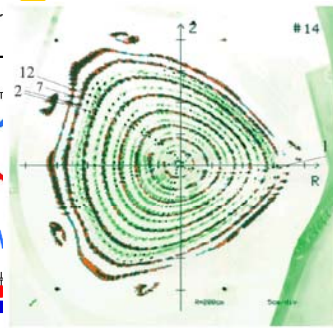
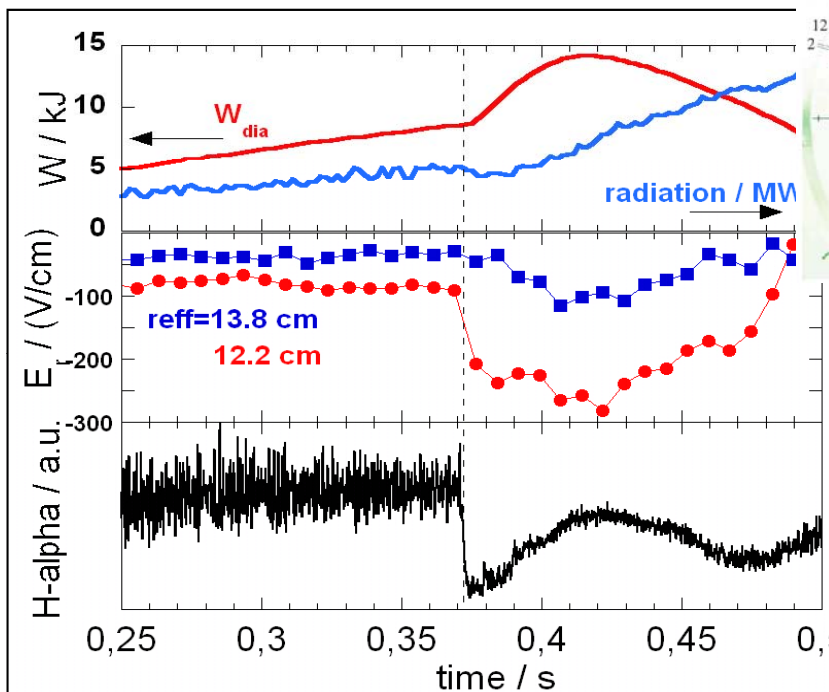
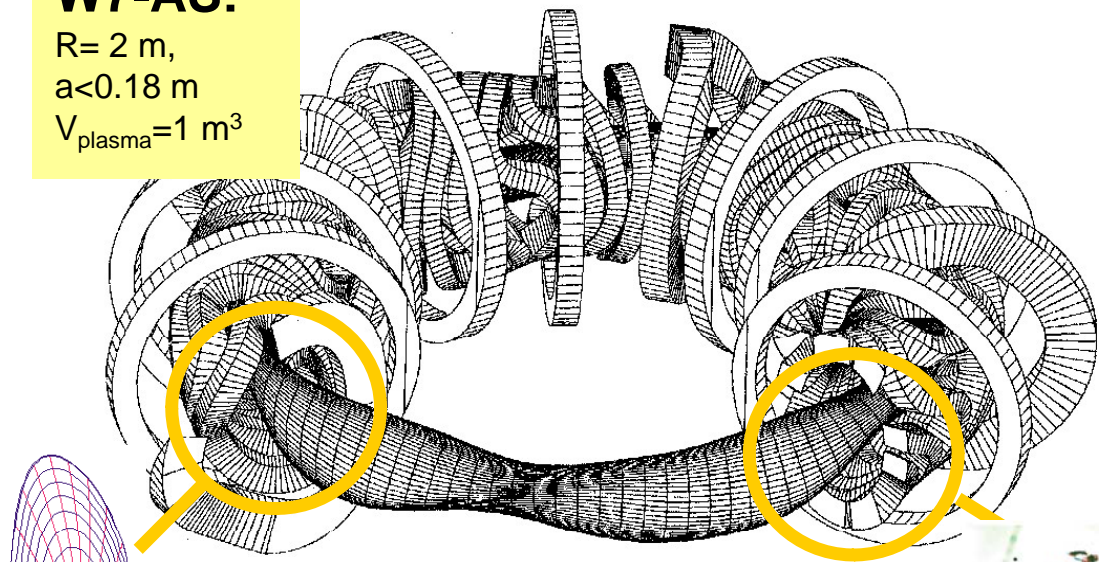
summary review :

Hirsch et al, Plasma Phys Control Fusion 50 (2008)

W7-AS:

$R = 2 \text{ m}$,
 $a < 0.18 \text{ m}$
 $V_{\text{plasma}} = 1 \text{ m}^3$

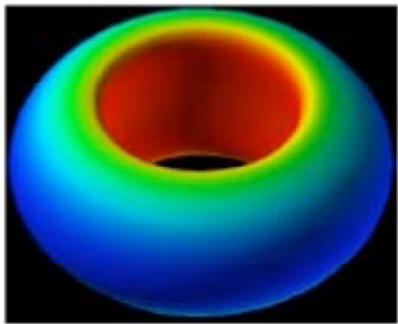
- > Gleichgewicht und Instabilitäten bei **hohem Druck**
- > sehr **sauberes Plasma** bei hoher Dichte
- > **verbesserte Einschluß-Regimes** :
ähnlich wie im Tokamak: H-mode, ...
- > Inseldivertor am Plasmarand, erlaubt **kontrollierten Kontakt zur ersten Wand**



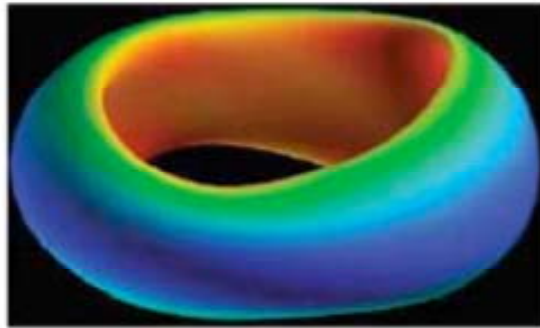
How much Stellarator is needed for a Tokamak - and how much Tokamak is allowed for a Stellarator

A. Boozer, EPS 2008

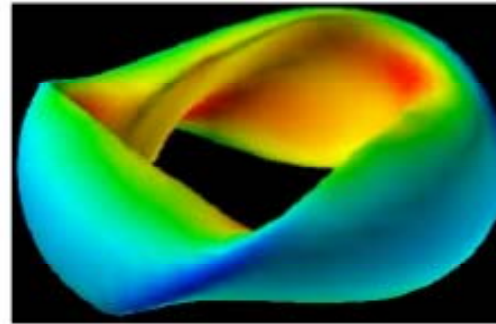
non-axisymmetric shaping can be applied at any level
from zero, in tokamaks, to large, in stellarators.



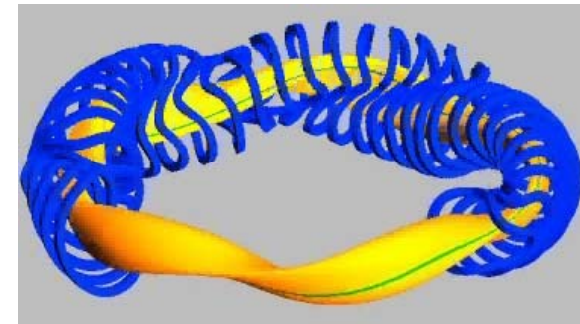
Tokamak $\iota_{vac}=0$



ARIES-RS but $\iota_{vac}/\iota=20\%$



NCSX $\iota_{vac}/\iota=75\%$



W7-X : $\iota_{vac}/\iota=1$

For energy gain in a reactor it
is required : $I_{BS} / I_{driven} > 4$
(ITER: $I_{BS} / I_{driven} = 1$)

small helicity helps:

- > ELM mitigation
- > control field errors
(avoiding mode locking)

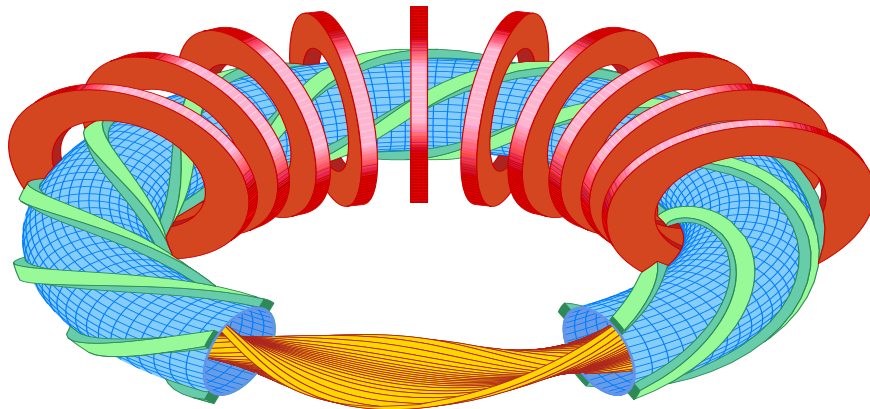
helicity (how much is required ?):

- > removes restriction for upper density
- > avoids current disruptions
- > allow more robust operation near beta limit

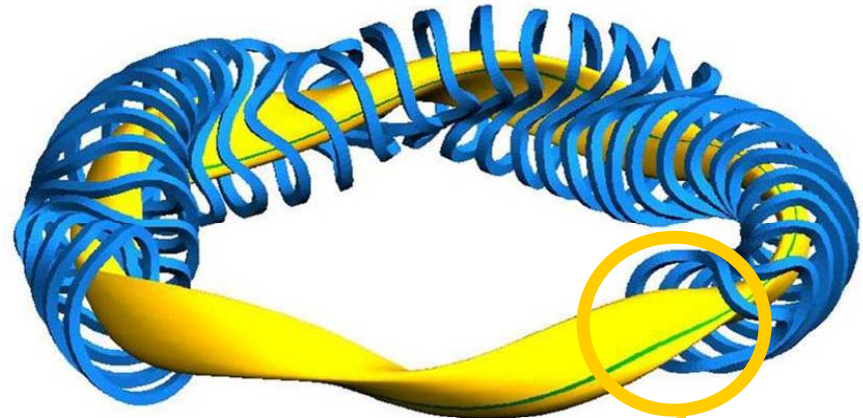
but engineering feasibility:

- > construction tolerances must be increased-
- > construction must be simplified

- **Helikal** (toridal & poloidal) gewundene Spulen erzeugen das verdrehte Magnetfeld von außen (**kein Strom im Plasma nötig**) aber erzeugen eine **3D Struktur** auch des Plasmas



toroidale Spulen helikale Spulen



modulare Spulen

W7-X

-> **Dauerbetrieb**

-> aber **Nachteile der 3D Struktur:**

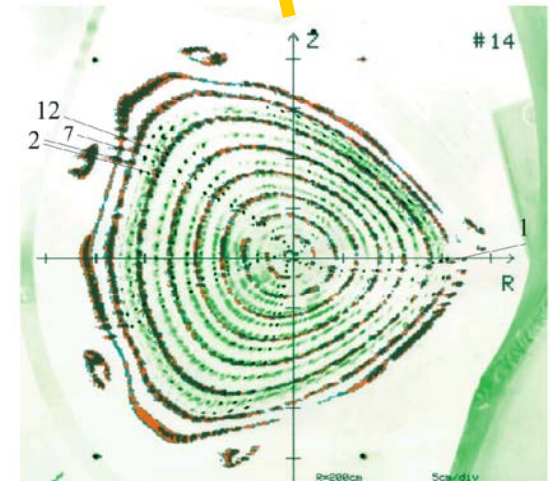
zusätzliche Energieverlust-Mechanismen, komplizierte mechanische Kräfte, komplexer Bau ...

aber durch modulare Spulen:

-> mechanische Kräfte innerhalb des Spulensystems können besser abgefangen werden

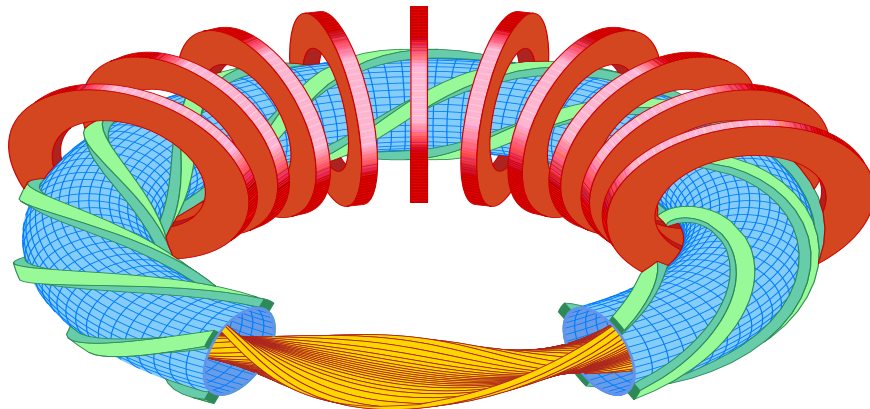
-> Magnetfelder können in weiten Grenzen **optimiert** werden

Vorversuche ("teilweise" Optimierung) waren **sehr erfolgreich**

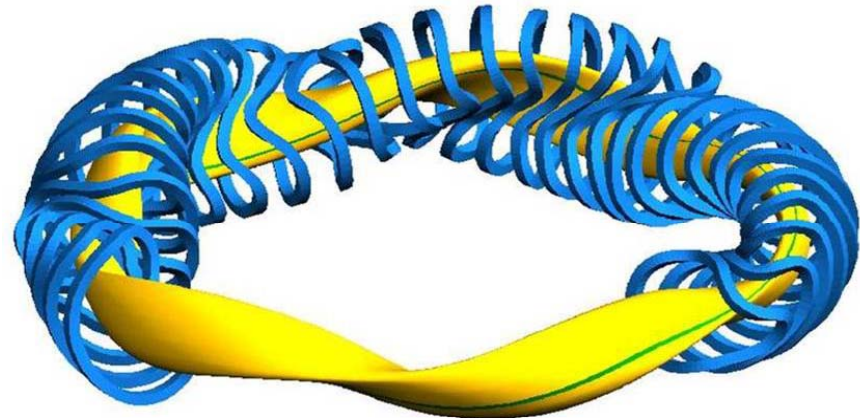


W7-AS: Flussflächen gemessen mit dem Elektronenstrahl
vorund nach 56000 Entladungen (grün)

- **Helikal** (toridal & poloidal) gewundene Spulen erzeugen das gesamte verdrehte Magnetfeld von außen aber erzeugen eine **3D Struktur** auch des Plasmas



toroidale Spulen helikale Spulen



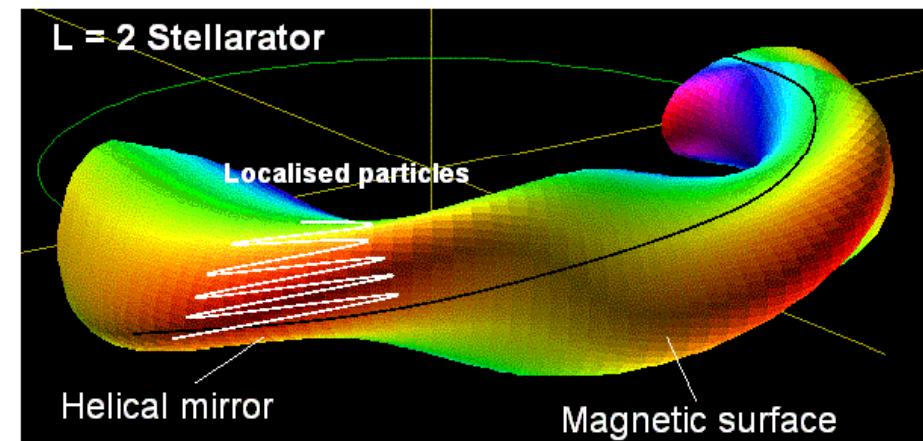
W7-X

- > **Dauerbetrieb** unmittelbar möglich
- > aber **Nachteile der 3D Struktur**:
 - zusätzliche Energieverlust-Mechanismen, komplizierte mechanische Kräfte, komplexer Bau ...

aber durch modulare Spulen:

- > mechanische Kräfte innerhalb des Spulensystems können besser abgefangen werden
- > Magnetfelder können in weiten Grenzen **optimiert** wer

Vorversuche ("teilweise" Optimierung) waren **sehr erfolgreich**



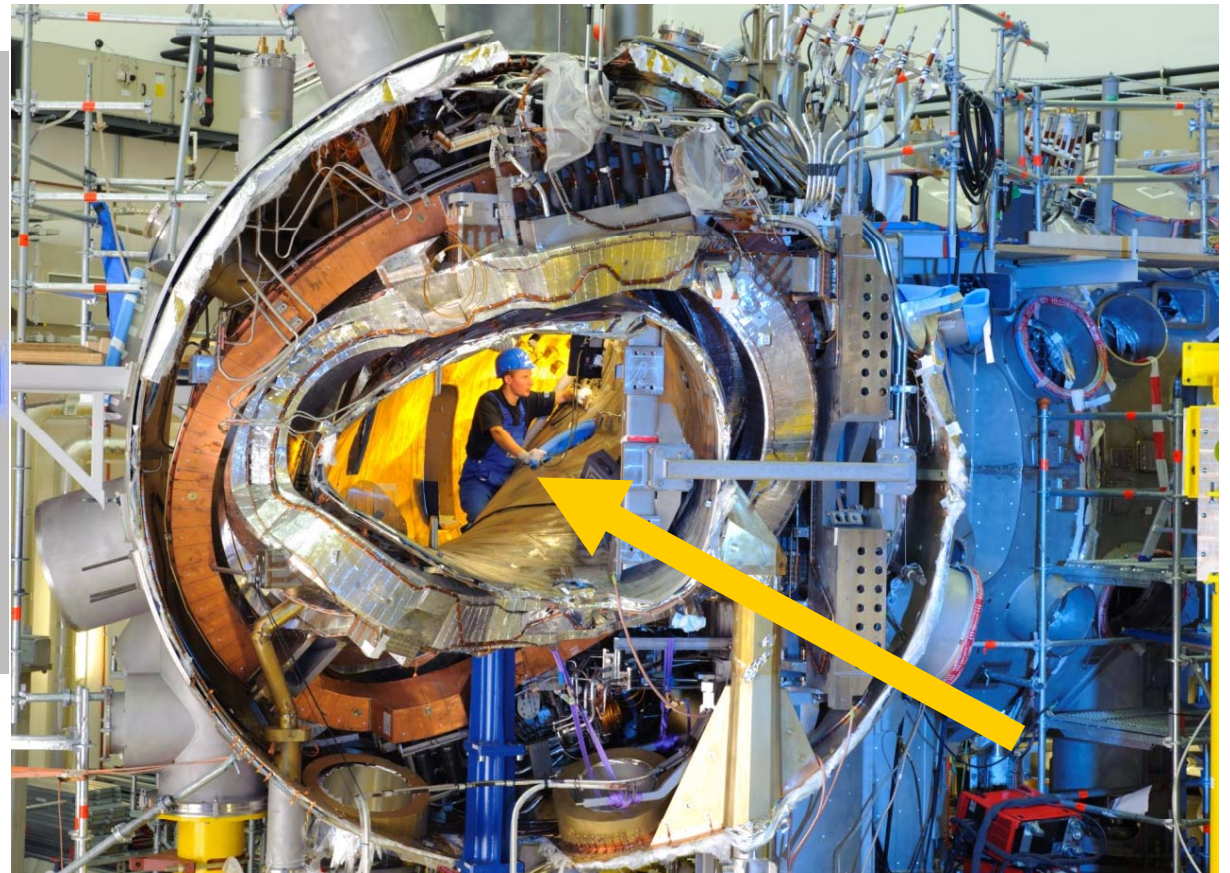
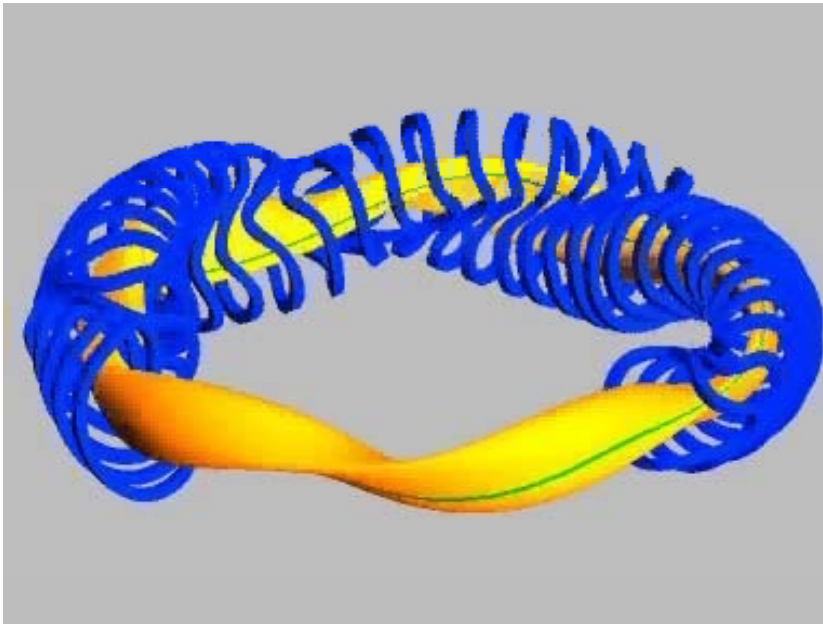
Magnetfeldstärke auf einer Flussfläche:
rot schwach, blau: stark
-> **Teilchendrift**

$R = 5.5\text{m}$, $a = 0.52\text{ m}$

$V_{\text{plasma}} = 30\text{ m}^3$ (-> AUG: 14 m^3), max. 1/30 g Brennstoff

-> **optimiertes Magnetfeld** hinsichtlich Instabilitäten, Teilchen- und Energie-einschluß, minimierter Strom im Plasma ...)

-> **Dauerbetrieb** durch supraleitende Magnetspulen, dauerbetriebsfähige erste Wand, Divertor, Heizung, Diagnostik



Technologie-Entwicklung für den Dauerbetrieb

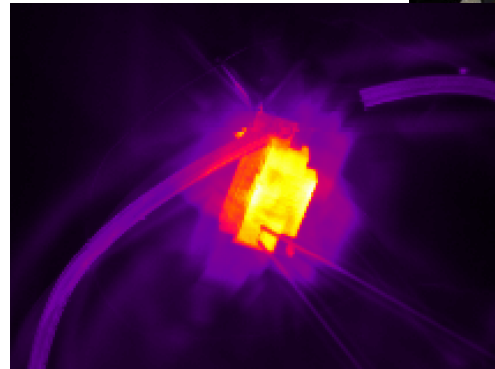


Mikrowellensender:
1 MW cw (2mm) Gyrotron

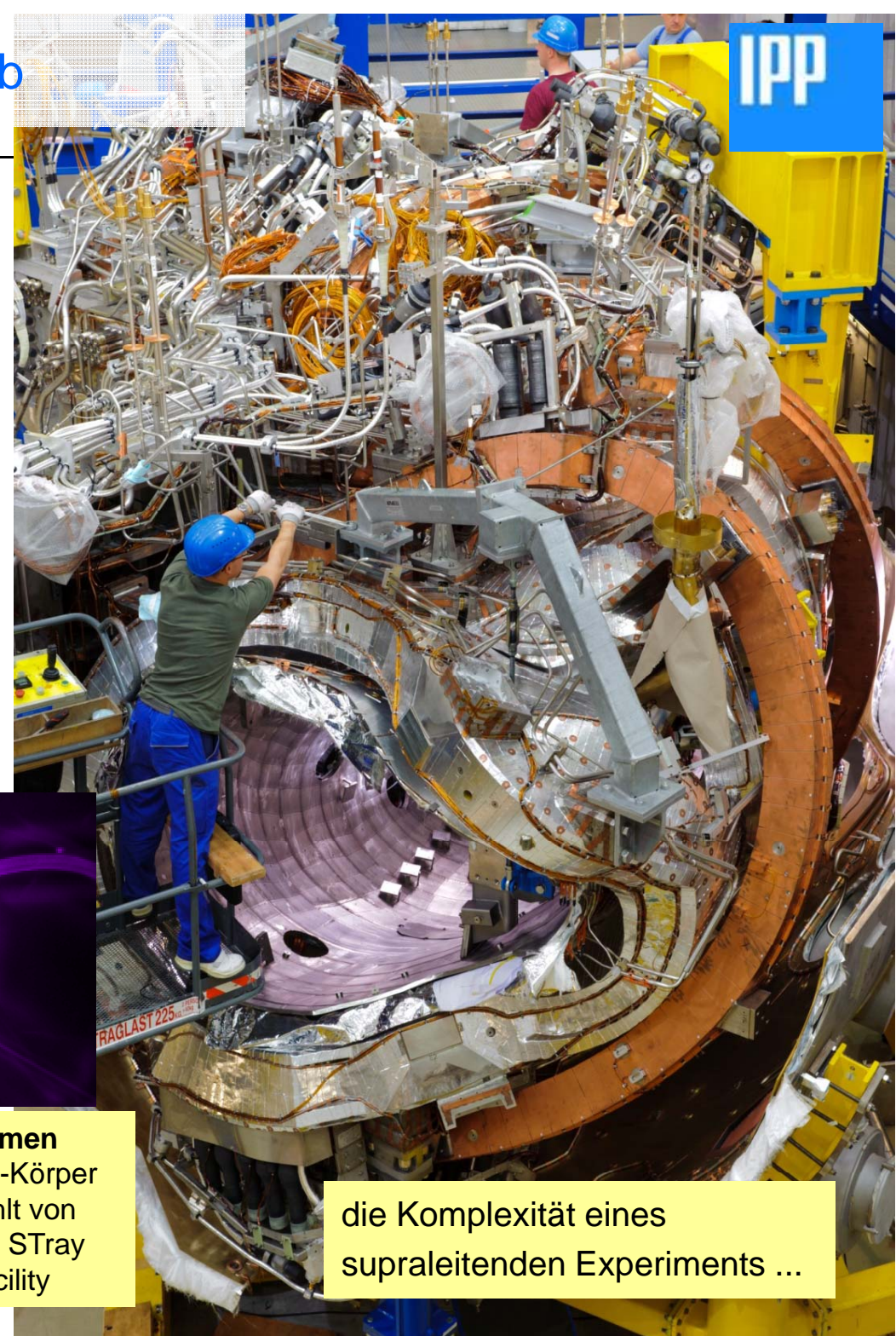


gekühlte **Sendespiegel** für
Mikrowellen Heizstrahlen

stationär **gekühlte Wandelemente**
Wärmetauscher für **10 MW/m²**



Diagnostik unter extremen Bedingungen: Keramik-Körper einer Messspule bestrahlt von Mikrowellen. Microwave Stray Radiation Launch facility



die Komplexität eines
supraleitenden Experiments ...

**IPP Summer University
for graduate students:**

One week in late September
next: 2013 in Greifswald
application until end Mai

www.ipp-summeruni.info

Vorlesungen, z.B. TU-Berlin:

Prof. R. Wolf

WS 12/13: Heiße Plasmen im Universum

SS 13: Kontrollierte Kernfusion

- von den Sternen ins Labor

**International Helmholtz Graduate
School for Plasma Physics**

~50 PhD students

3.9 Millionen Euro over six years

IPP + EMAU + TU-München



IPP Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik
Garching/Germany
EURATOM Association

Summer University for Plasma Physics and Fusion Research

Garching, 17 - 21 September 2012

Programme

The course will cover the main aspects of plasma physics with emphasis on nuclear fusion: basics of plasma physics and of nuclear fusion – kinetic and magneto-hydrodynamic description of a plasma – concepts, experimental results and optimisation of tokamaks and stellarators – heating and diagnostics of a fusion device – plasma wall interaction and wall material research – safety and environmental aspects of fusion – inertial fusion – astrophysical plasmas – ITER and the next steps towards a reactor. The course will include a tour to the tokamak experiment ASDEX Upgrade and its periphery at IPP. One goal of the Summer University is to promote an exchange of views among the coming generation of European scientists. Opportunities for discussions with lecturers and students will be provided between the sessions, in the evening reception and during an excursion.

Offers

The course (max. 70 participants) is being held for European physics students who have passed their undergraduate / bachelor courses and have not yet decided on the subject of their PhD thesis. The lectures will be presented in English. Lecture notes will be provided to all students. For students registered at European Universities the cost of accommodation and food will be covered by IPP. Limited funds are available for travel expenses. Students coming from ITER-Partner-Countries outside Europe are welcome to take part.

Contact

Christina Stahlberg/Jutta Koser
Max Planck Institute for Plasma Physics
Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching near Munich
phone: +49 89 3299-2232/1375
summeruni@ipp.mpg.de

Requirements

Your application via internet must include a high school leaving certificate, evidence of undergraduate physics or engineering diploma / bachelor degree and a short curriculum vitae.

Deadline

31 May 2012

Application

 www.ipp-summeruni.info