

# Fusion von Wasserstoff Energie der Zukunft oder ewiger Traum?

Thomas Klinger

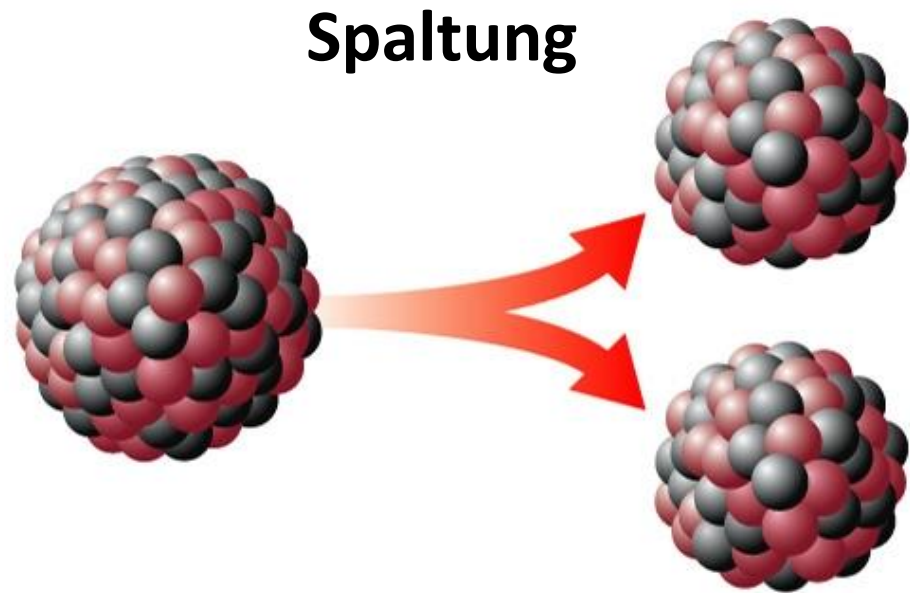
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik Greifswald und Universität Greifswald

**HELMHOLTZ**  
SPITZENFORSCHUNG FÜR  
GROSSE HERAUSFORDERUNGEN

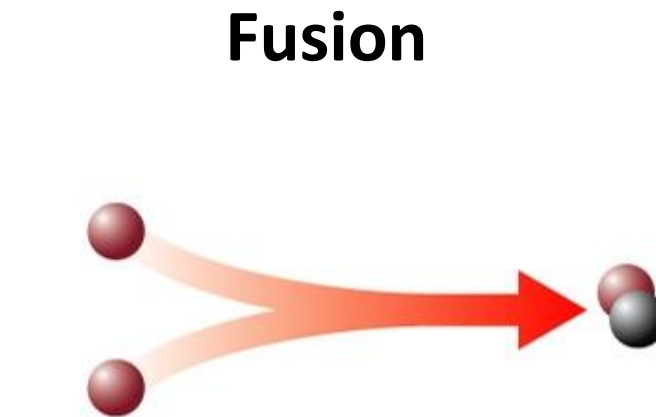


 **EUROfusion**





schwere Kerne spalten

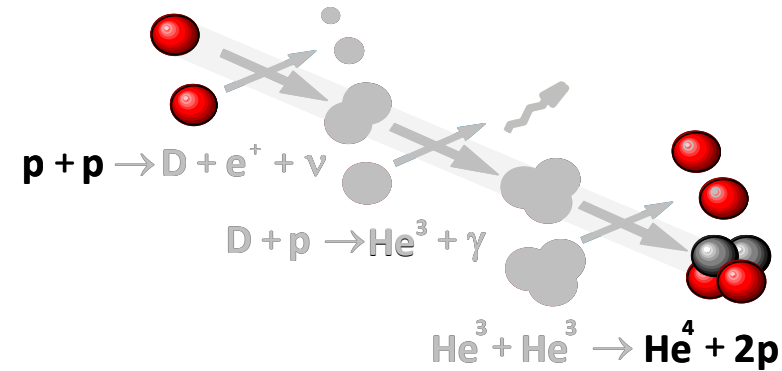


leichte Kerne verschmelzen

folgt dem gleichen Prinzip  $E = mc^2$

Masseunterschied  $\rightarrow$  Bewegung  $\rightarrow$  Wärme

# Die Sonne auf die Erde bringen?



## Bedingungen Sonnenzentrum

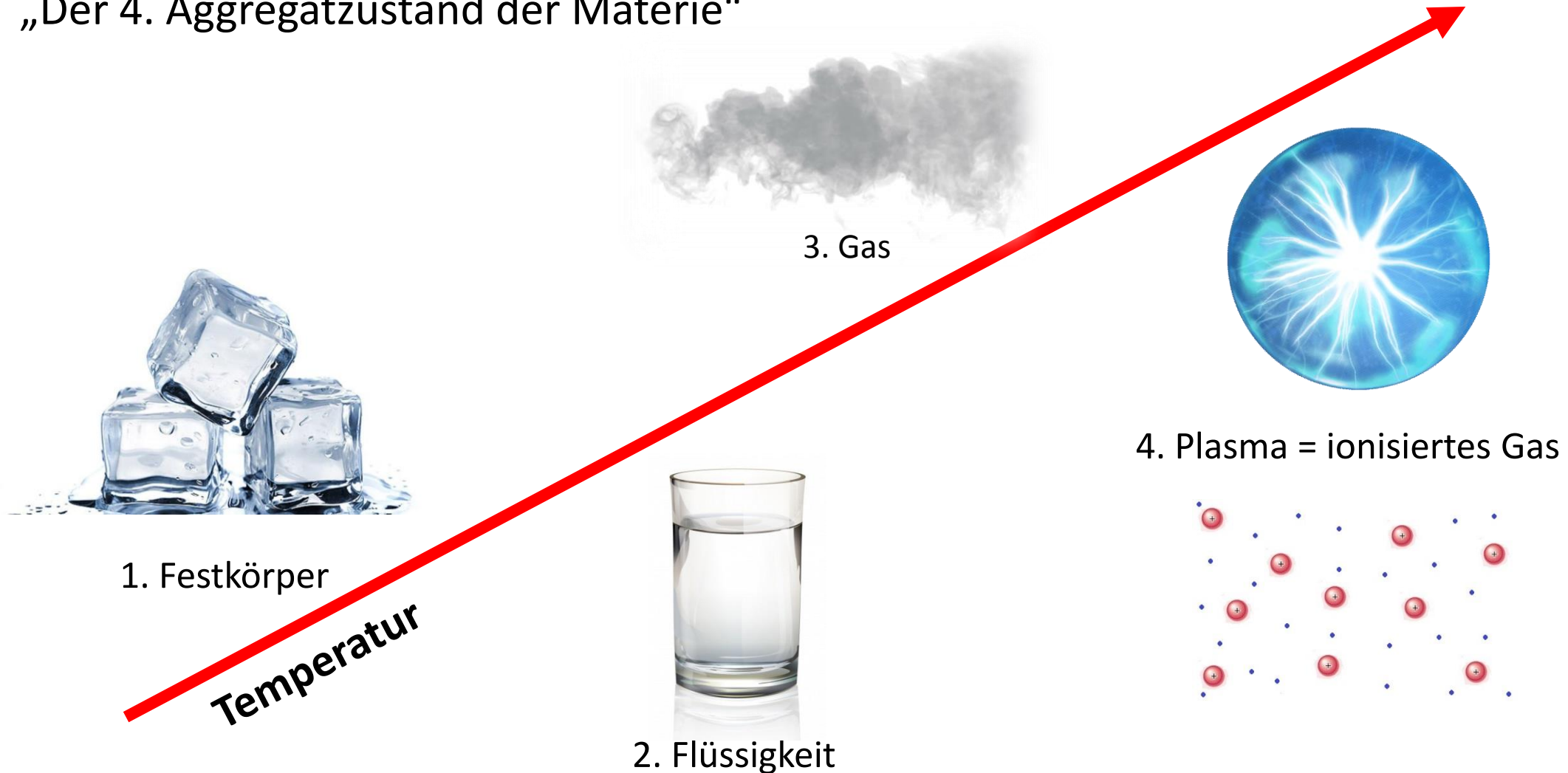
- $1000 \times$  Dichte Festkörper
- 15 Mio. °C Temperatur
- 100 Mrd. Bar Gasdruck

Gravitation  $330.000 \times m_{\oplus}$

# Was ist ein Plasma?



„Der 4. Aggregatzustand der Materie“



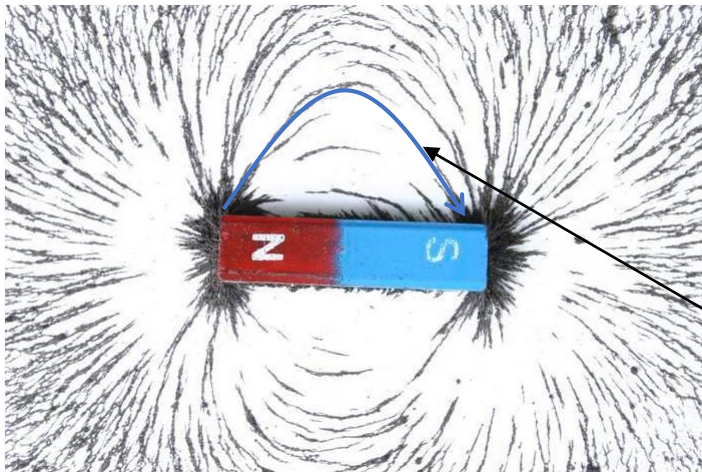
# Das Nordlicht – ein natürliches Plasma



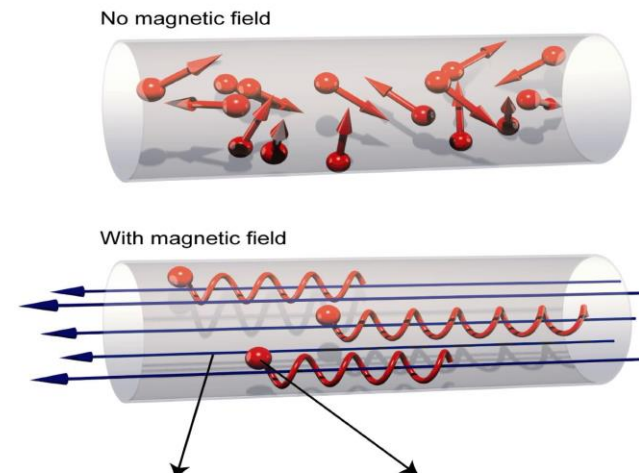
- wir brauchen 120 Mio Grad - aber sehr geringe Dichte (ca. 1/100.000 Atmosphäre)
- Wärmeisolierung muss 50 mal besser als Styropor sein

hohe Temperaturen - Plasma als Gas aus geladenen Teilchen  
kann in Käfigen aus Magnetfeldern eingeschlossen werden

## Magnetfeldlinien



[www.weltderphysik.de](http://www.weltderphysik.de)



ohne Magnetfeld

mit Magnetfeld

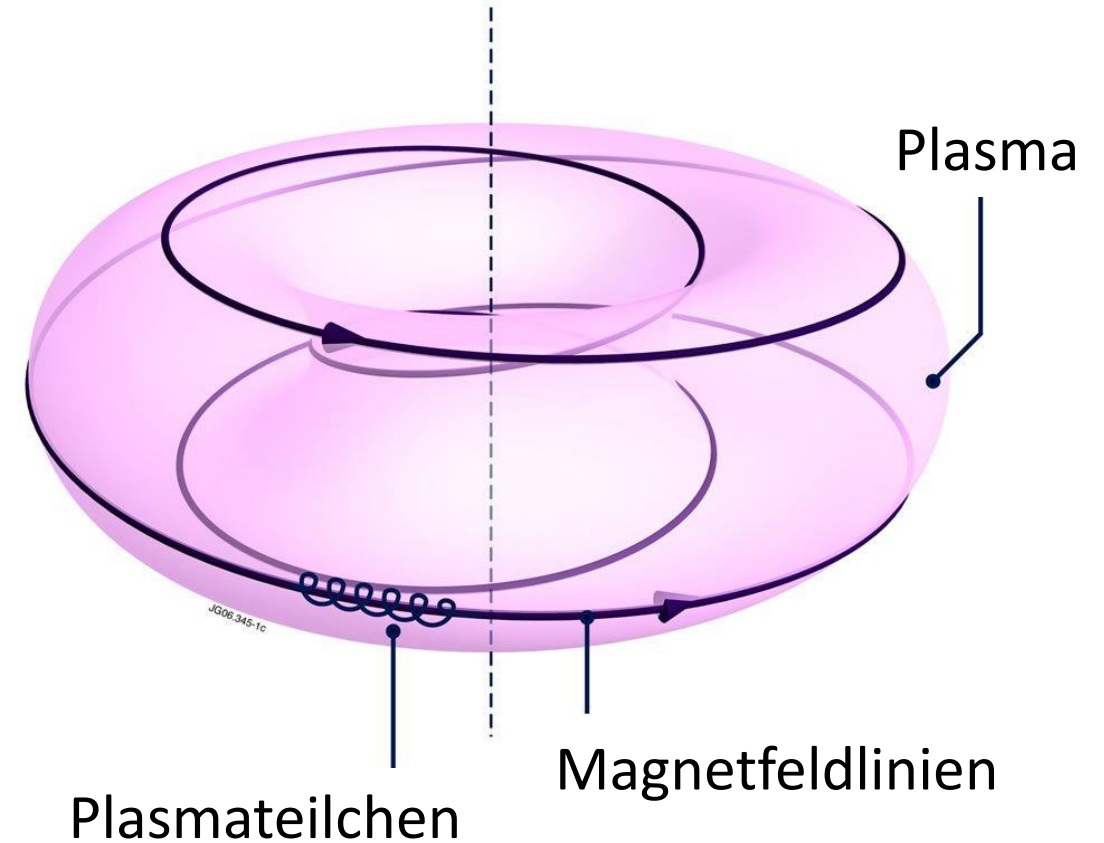
Magnetfeldlinie

geladenes Teilchen

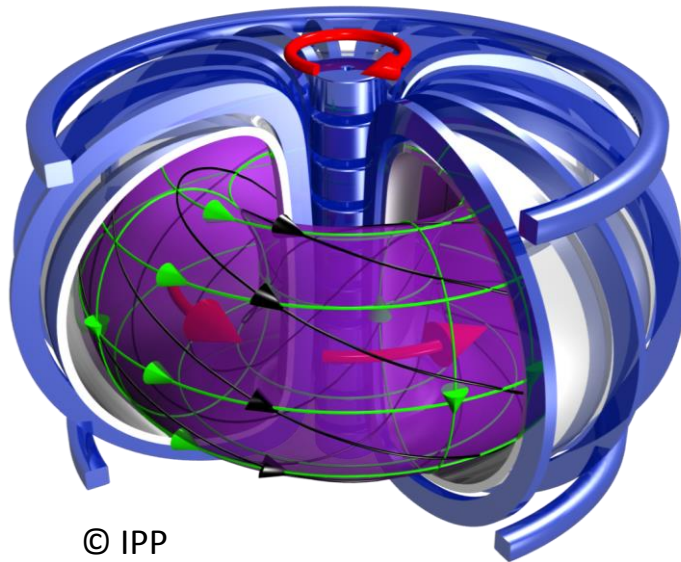
## Idee



Referenz: [www.pearlage.com](http://www.pearlage.com)



## Tokamak

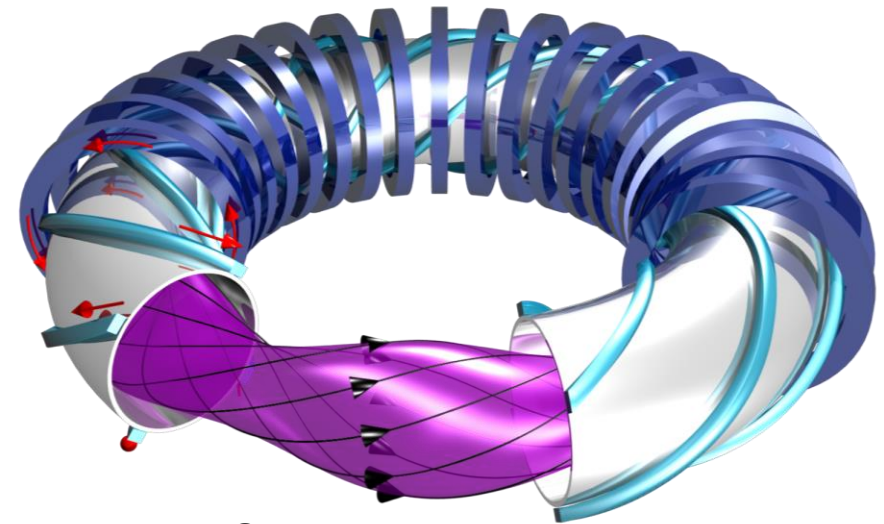


© IPP

einfache Symmetrie

Magnetfeld durch Spulen und Plasmastrom  
im Normalfall gepulster Betrieb

## Stellarator



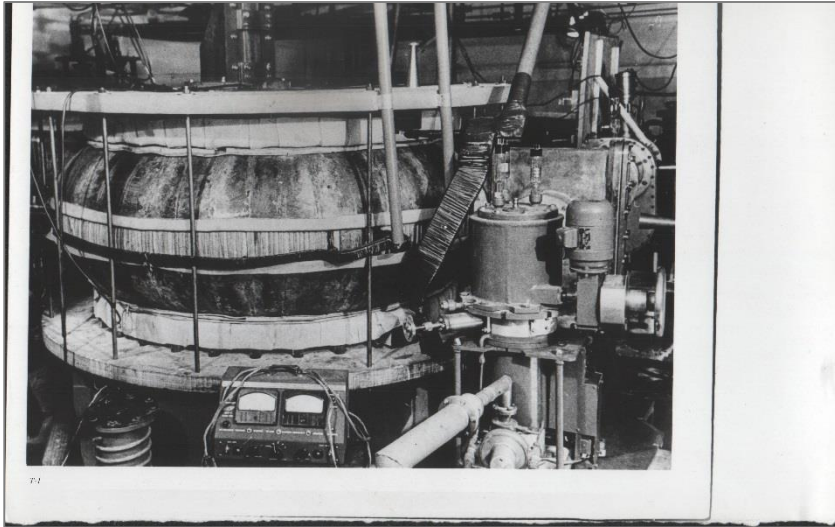
© IPP

anspruchsvolle Geometrie

Magnetfeld nur durch äußere Spulen  
stationärer Betrieb



# Die „Erfindung“



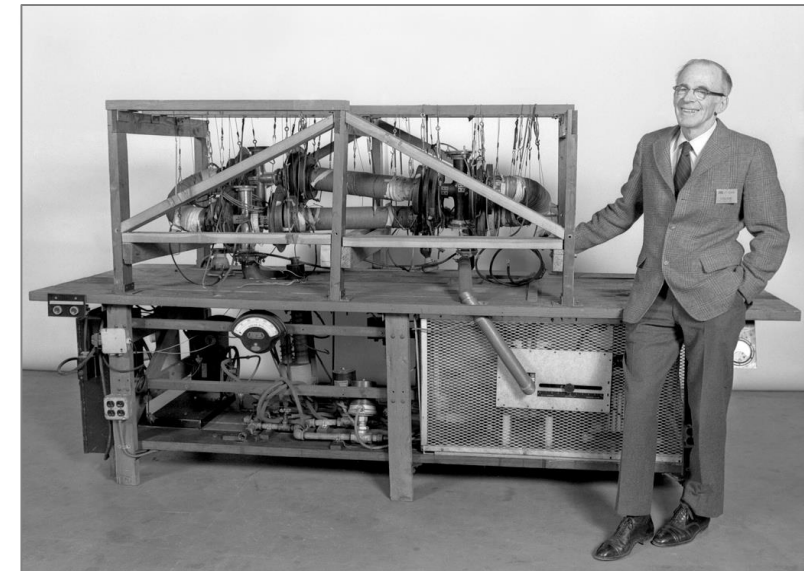
тороидальная камера в  
магнитных катушках

*toroidalnaja kamera w  
magnitnych katuschkach*

Tokamak T1  
Sacharov und Tamm  
Kurtschatow Institut 1952

Referenz: [alltheworldstokamaks.wordpress.com](http://alltheworldstokamaks.wordpress.com)

Stellarator Model A  
Spitzer  
Princeton University 1952

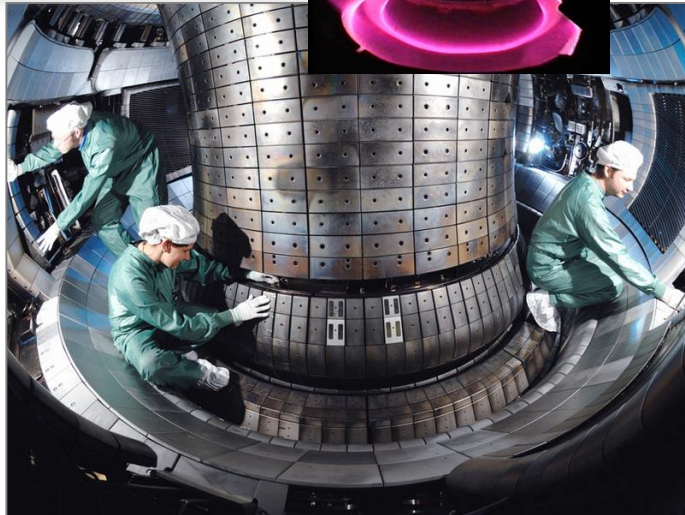


Referenz: [www.pppl.gov](http://www.pppl.gov)

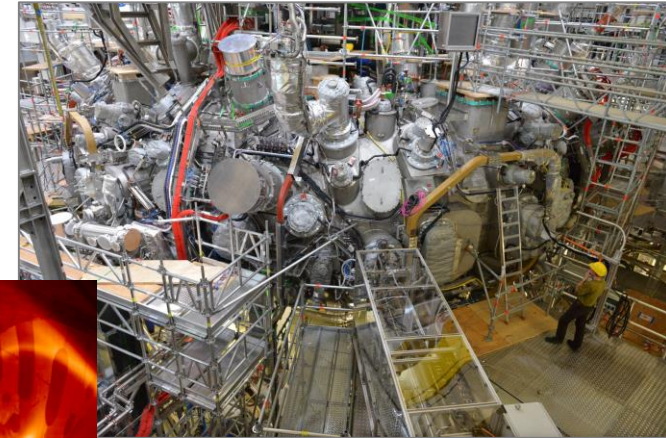
## ASDEX Upgrade Tokamak - Garching



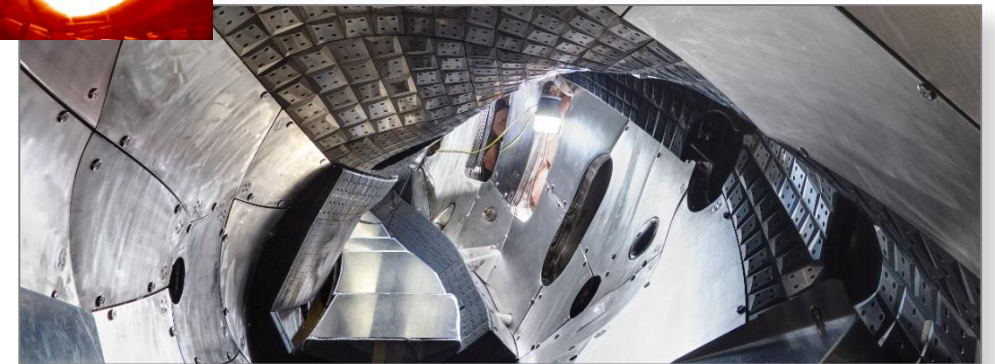
© IPP



## Wendelstein 7-X Stellarator - Greifswald



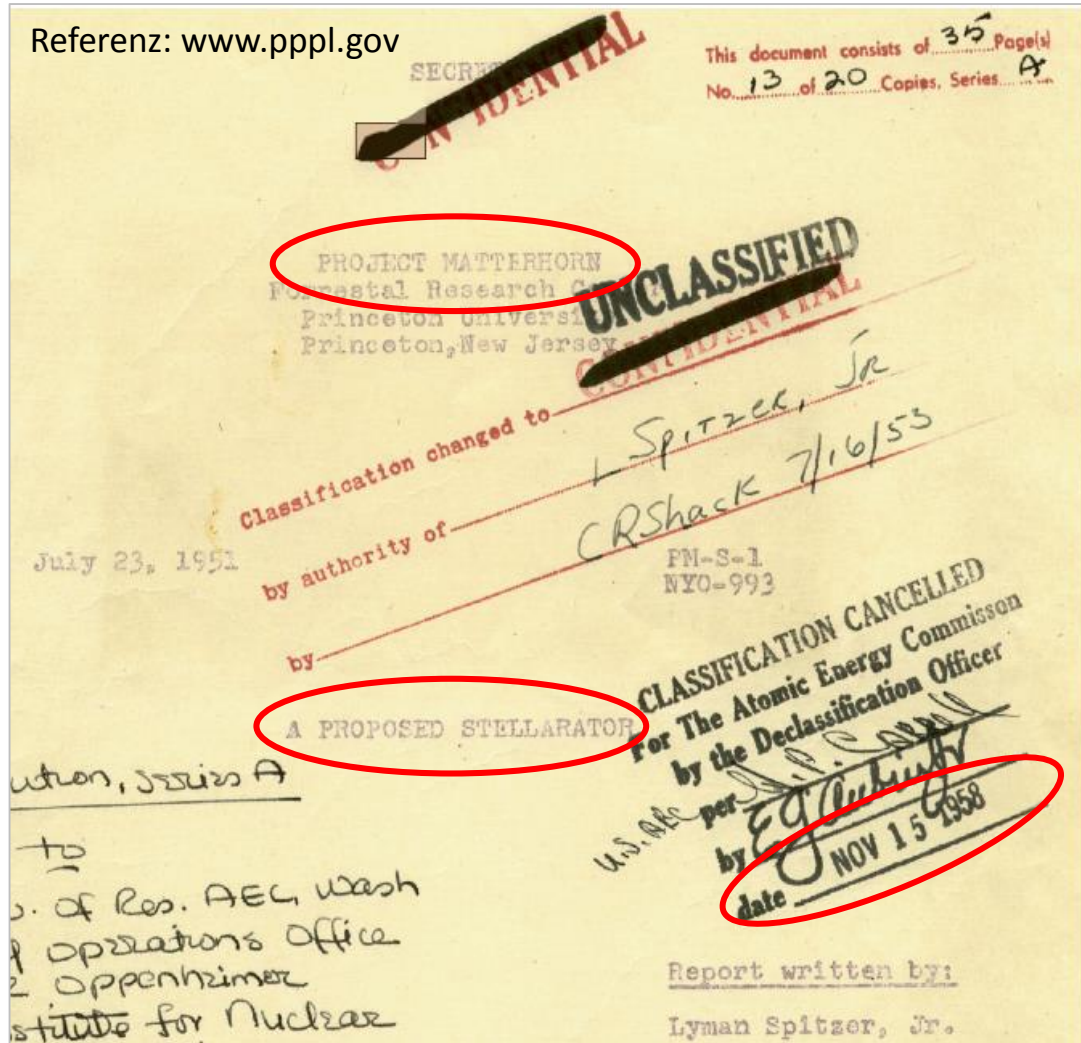
© IPP



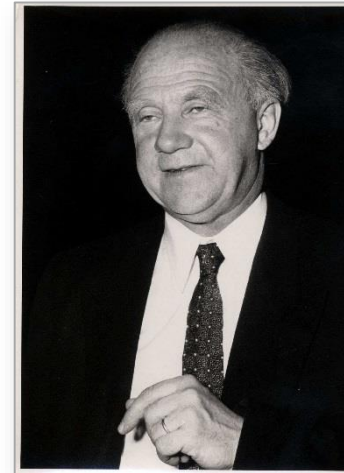
# Warum „Wendelstein“?



Referenz: [www.pppl.gov](http://www.pppl.gov)



<http://www.hdg.de/lemo/biografie/werner-heisenberg.html>



Heisenberg 1960  
Mitbegründer IPP GmbH

der Wendelstein in Bayern

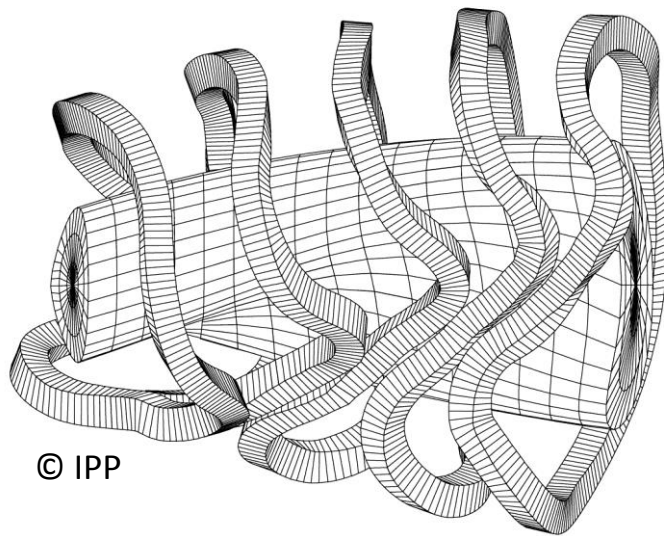


<http://www.wendelsteinbahn.de> (Thomas Kujat)

# Wendelstein 7-X – die Idee



- sieben physikalisch-technische Optimierungskriterien müssen erfüllt werden
- erst in den späten 80ern waren „Supercomputer“ schnell genug
- berechnet wurde die optimierte magnetische Feldgeometrie → speziell geformte Spulen



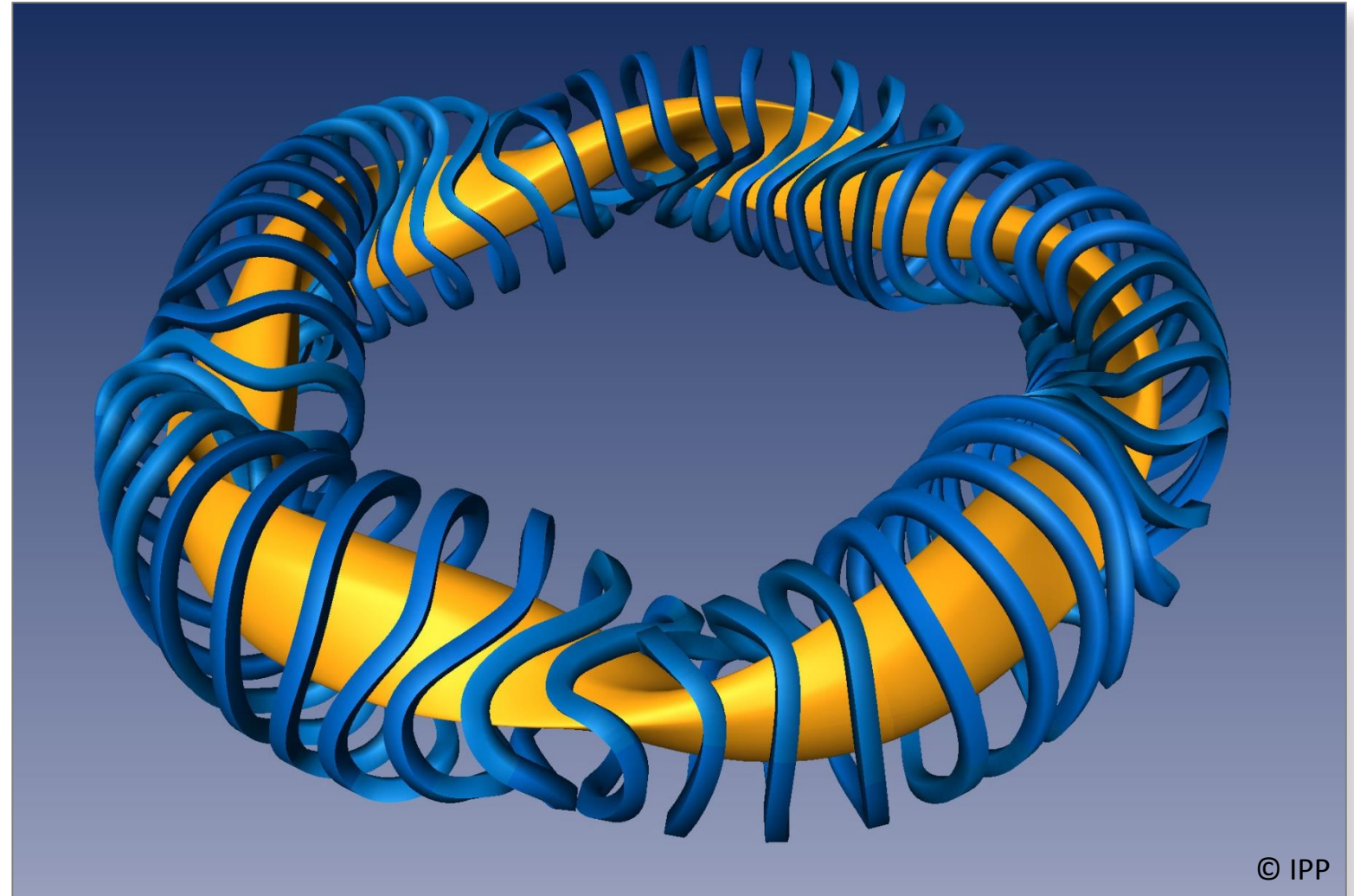
6 Jahre  
Bau und  
Test

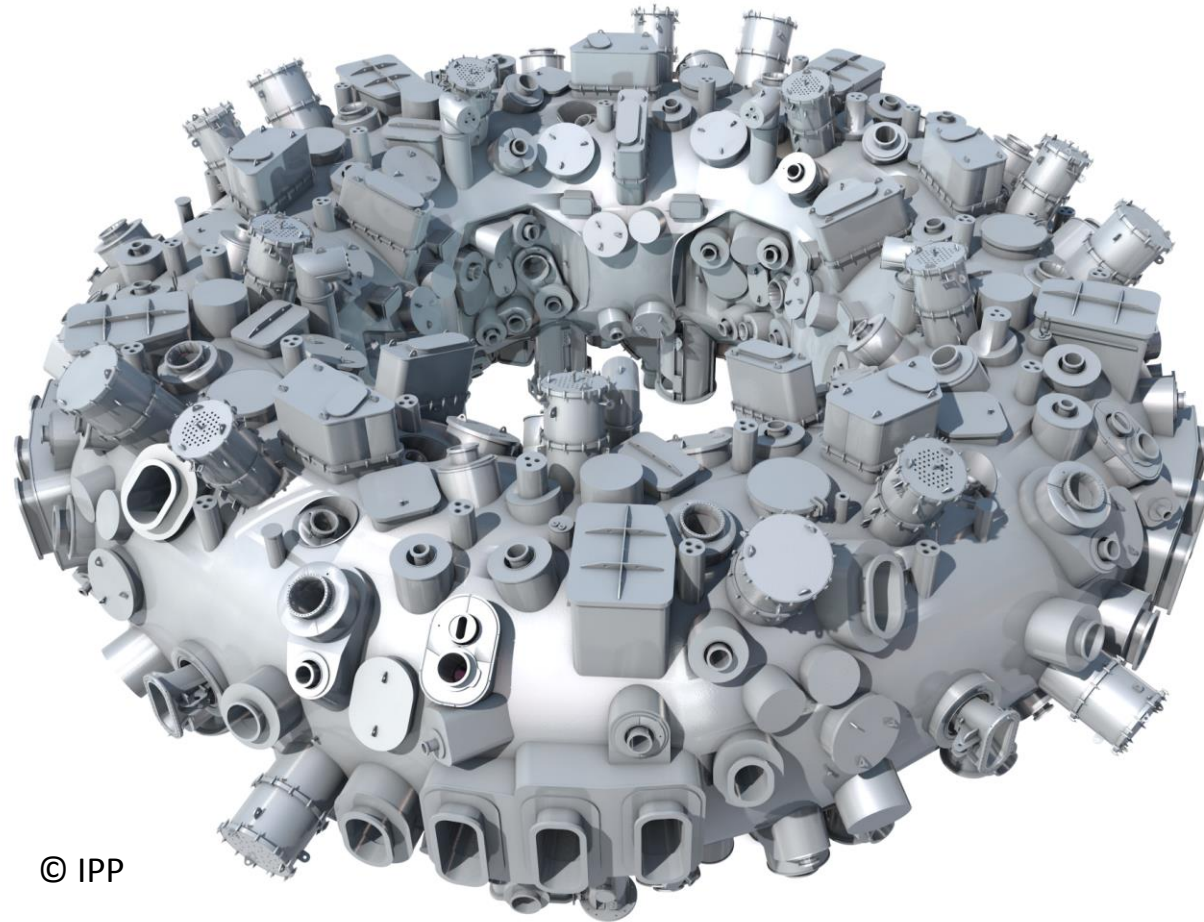


# Wendelstein 7-X – das gesamte Spulensystem



- fünf Spulenformen
- 10 Spulen → 1 Periode
- 5 Perioden → Spulenring
- optimiertes Magnetfeld



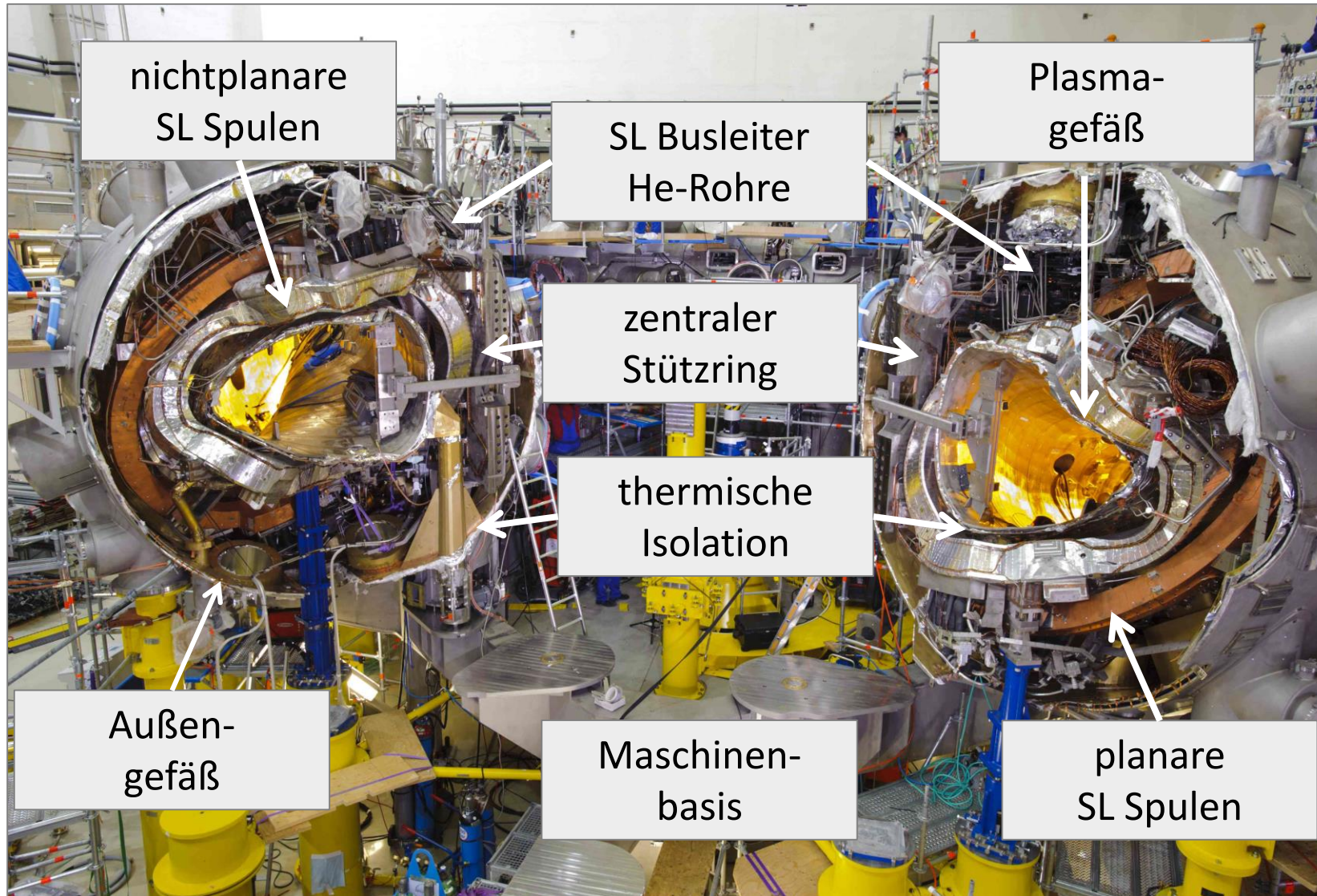


© IPP

ringförmiges verdrilltes Magnetfeld  
50 nichtplanare supraleitende Spulen  
20 planare supraleitende Spulen

Stützstruktur, Verbinder, Verrohrung  
Aussengefäß mit Domen und Stützen

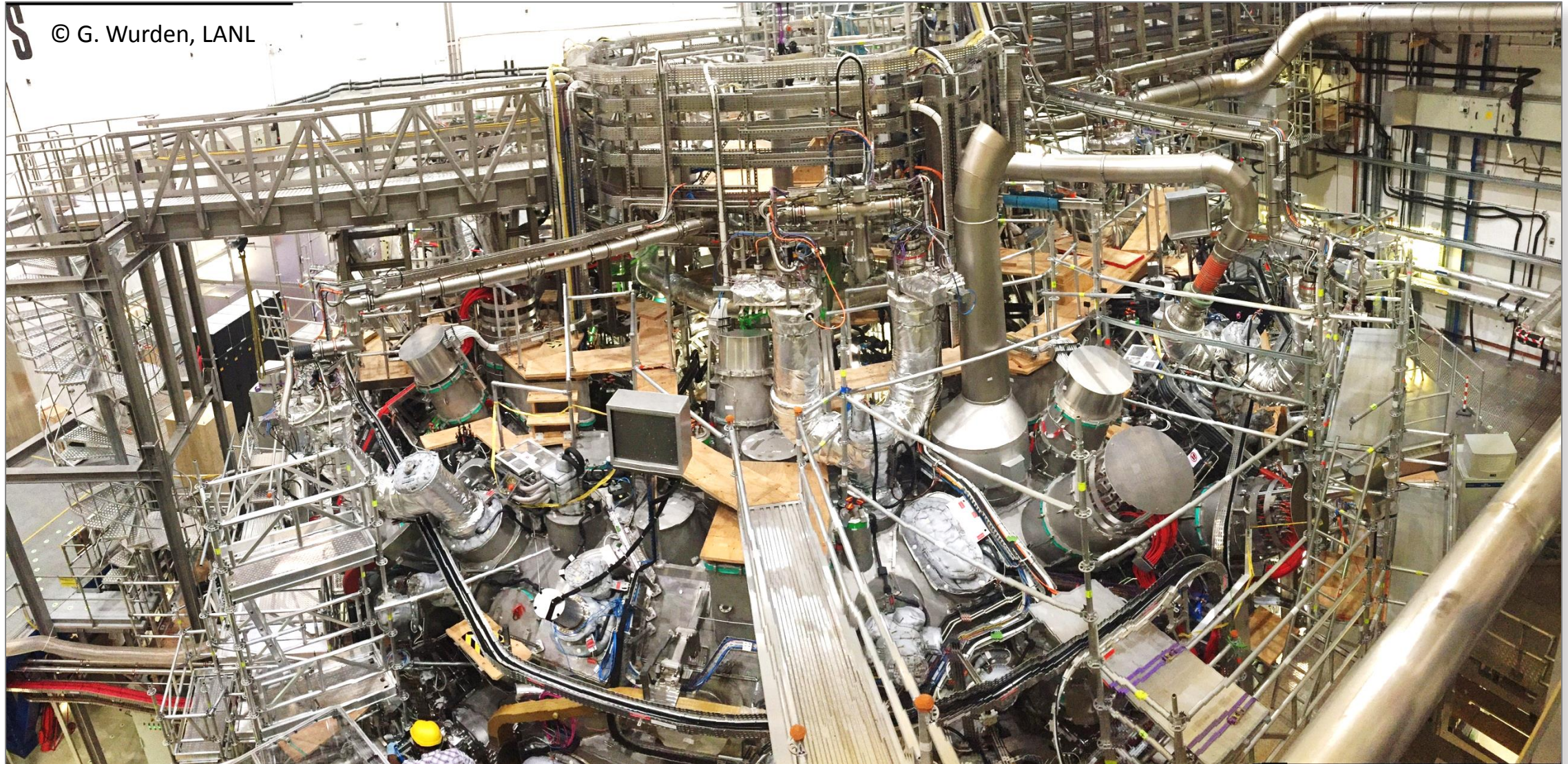
# Aufbau und Montage von Wendelstein 7-X



- Standort \*1994
- Projektbeginn 1996
- erste Bauteile 2004
- 10 Jahre Montage
- 1 Mio Montagestunden
- Forschung seit 2015

© IPP

# Wendelstein 7-X im Betrieb





# Wendelstein 7-X im Betrieb



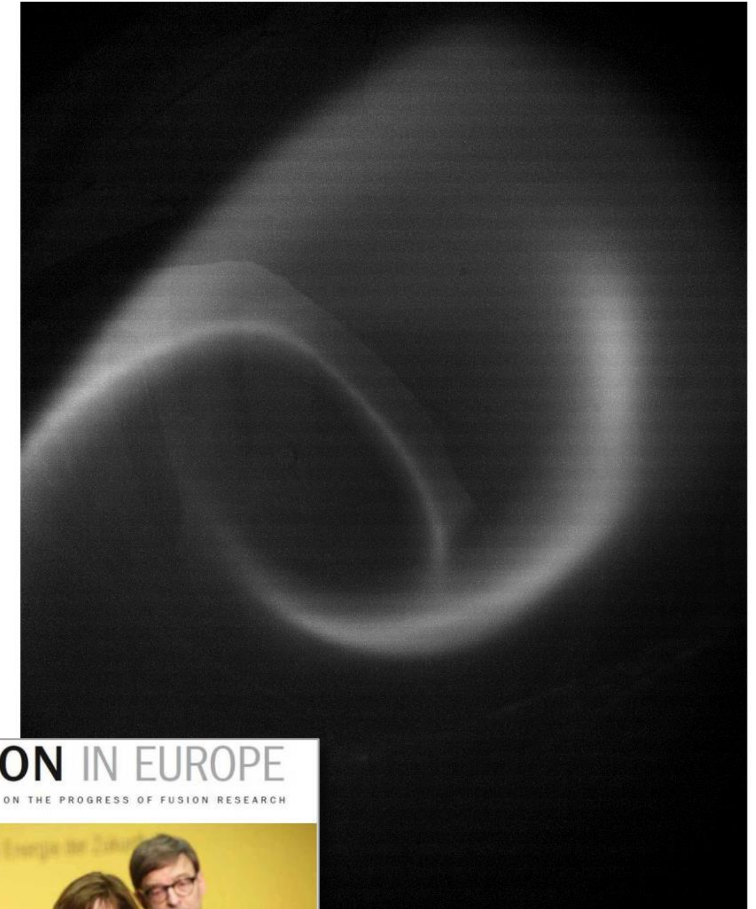
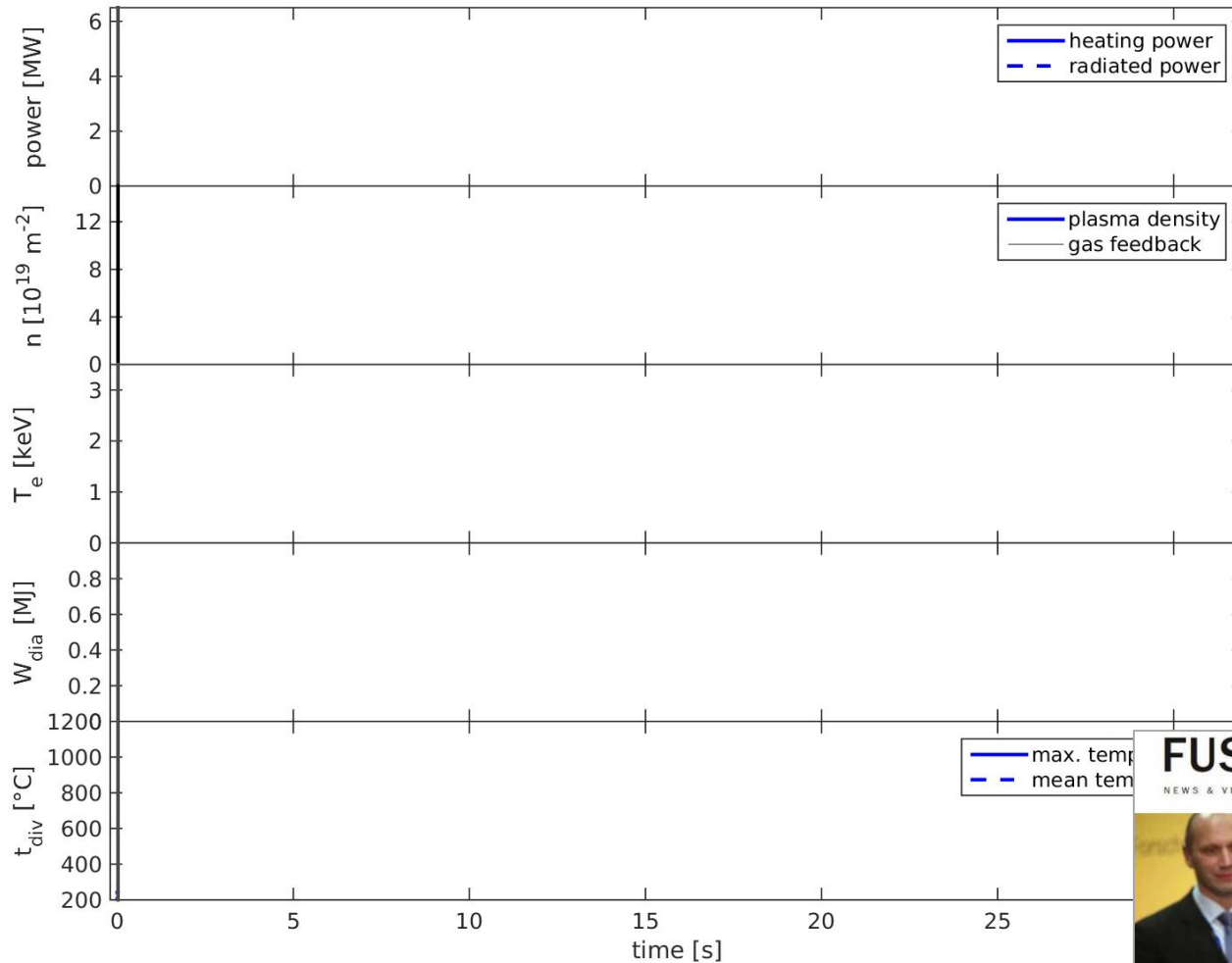
Plasma-Heizung

Plasma-Dichte

Temperatur Elektronen

Plasma-Energie

Divertor-Temperatur



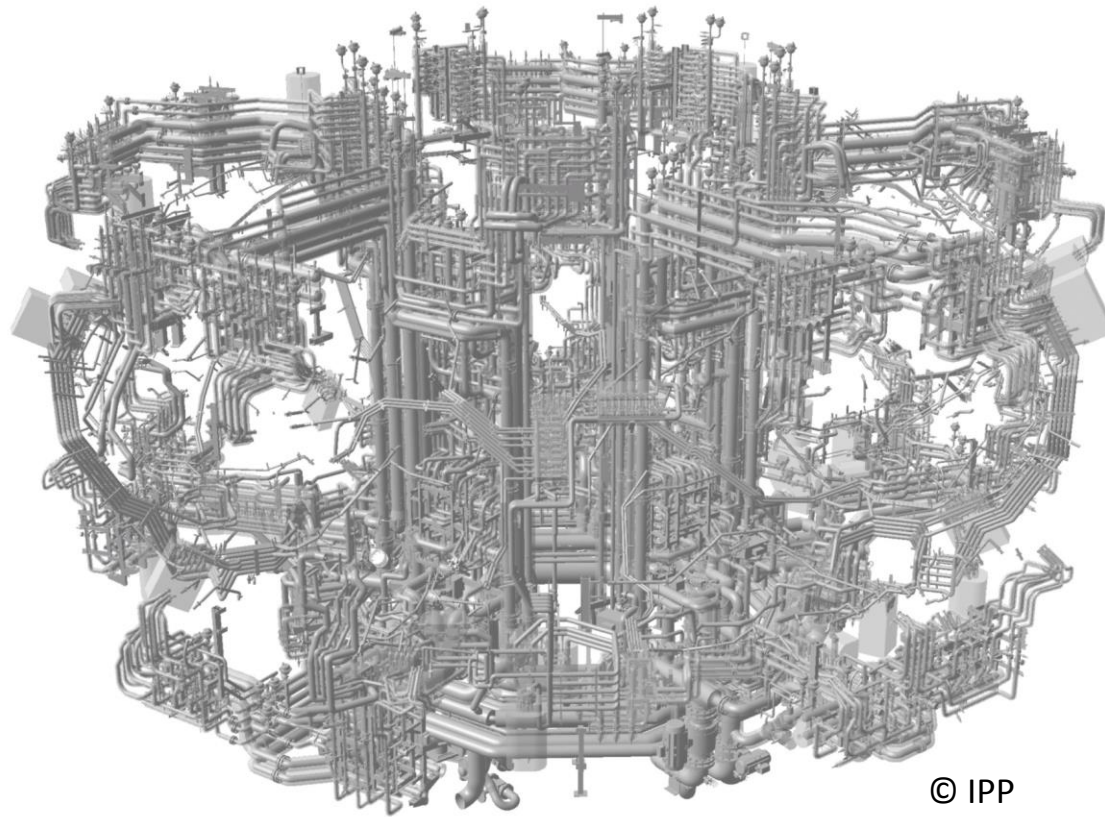
© IPP + Wigner Inst.

© EUROfusion

1. Einbau wassergekühlter Wandelemente
2. Komplettierung der Kältesysteme
3. Komplettierung der Kühlwasserverrohrung
4. Komplettierung der Plasma-Heizsysteme und -Diagnostiken



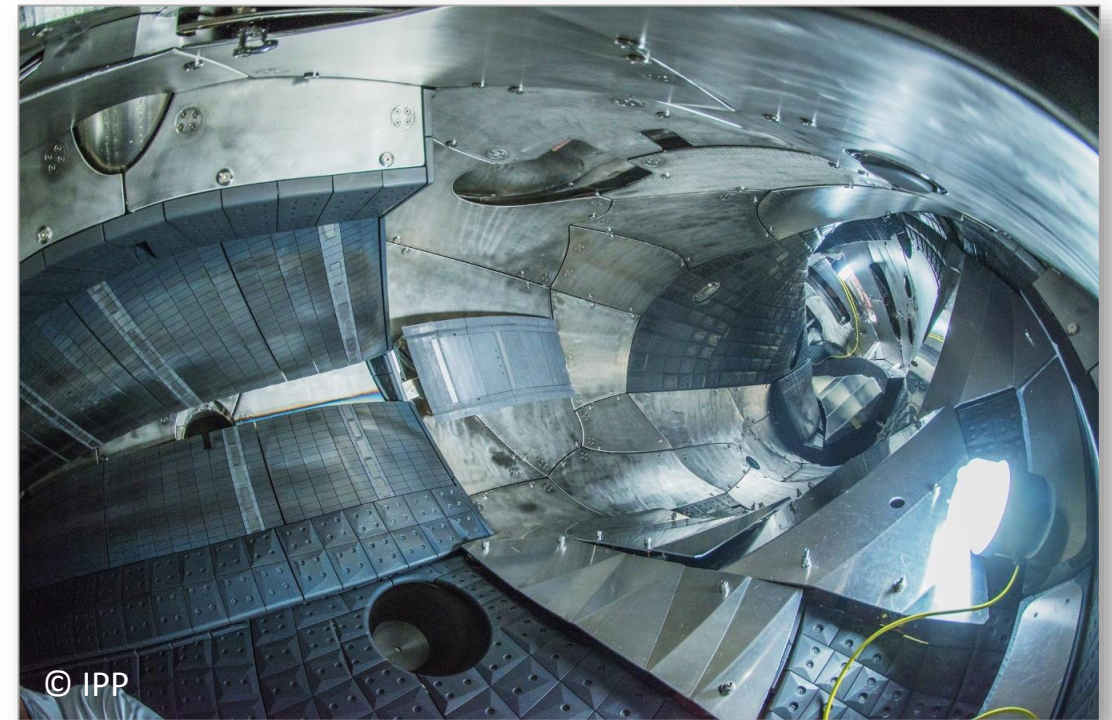
dauerbetriebsfähige Fusionsanlage Typ Stellarator – 30 Minuten Plasma  
weltweit erste solche Anlage mit relevanten Betriebsparametern



© IPP

über 500 Wasserkühlkreisläufe

umfangreiche Gefäßeinbauten



© IPP

# Prinzip des Fusionskraftwerkes



**Deuterium** (10 keV)

**Tritium** (10 keV)

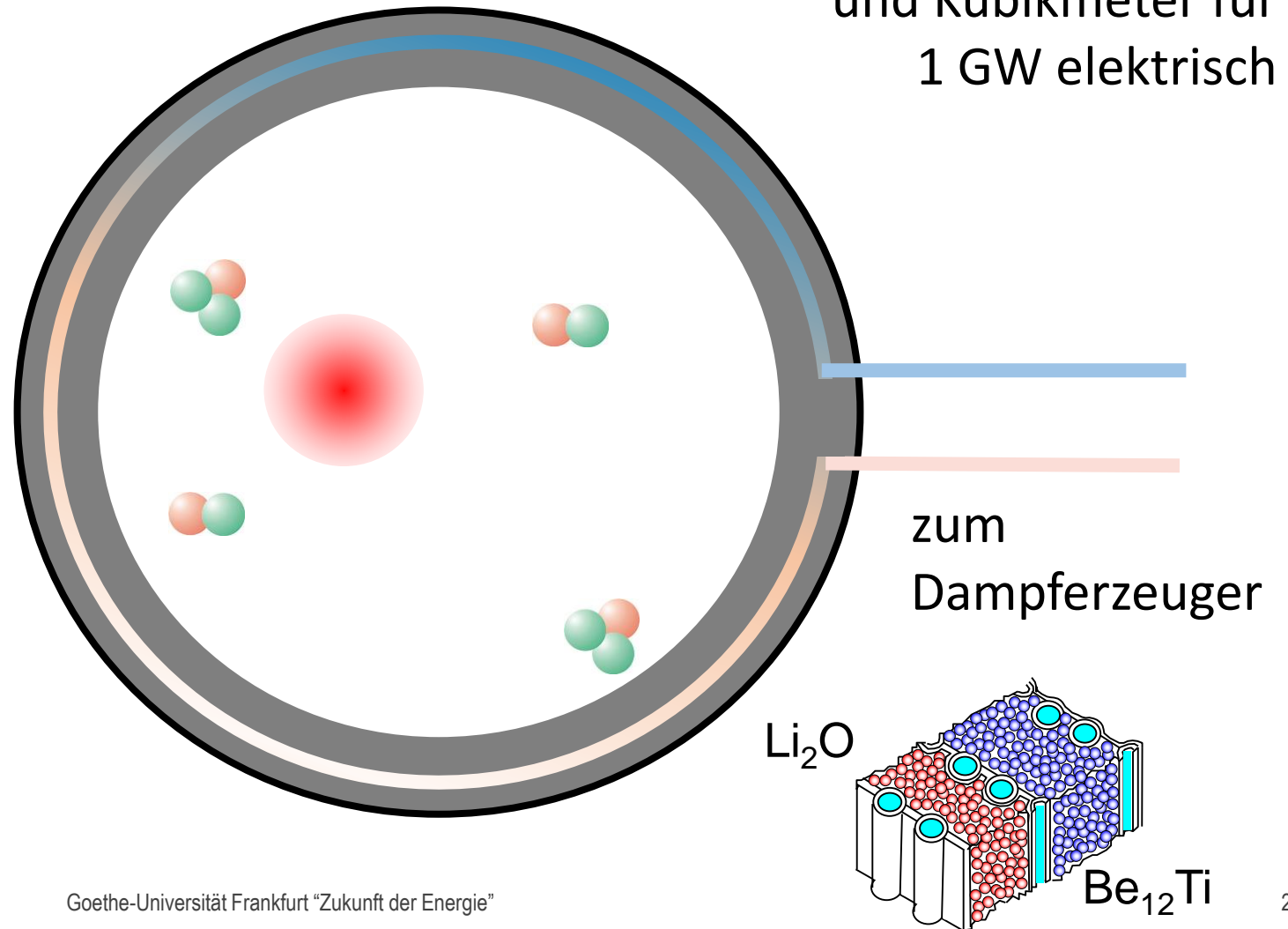
**Fusion** Beschleunigung  $\times 1000$

**Helium** (3.5 MeV)

**Neutron** (14.1 MeV)

**Neutron + Lithium**  $\rightarrow$  **Tritium**  
+ **Helium**

$10^{18}$  Prozesse pro Sekunde  
und Kubikmeter für  
1 GW elektrisch



# Ein hocheffizienter Brennstoff



Gartenpool

200 g D



Referenz: [www.pools.shop](http://www.pools.shop)

13000 l Wasser

Tesla-Akku

700 g  ${}^6\text{Li}$



Referenz: [www.mobilegeeks.de](http://www.mobilegeeks.de)

10 kg Lithium

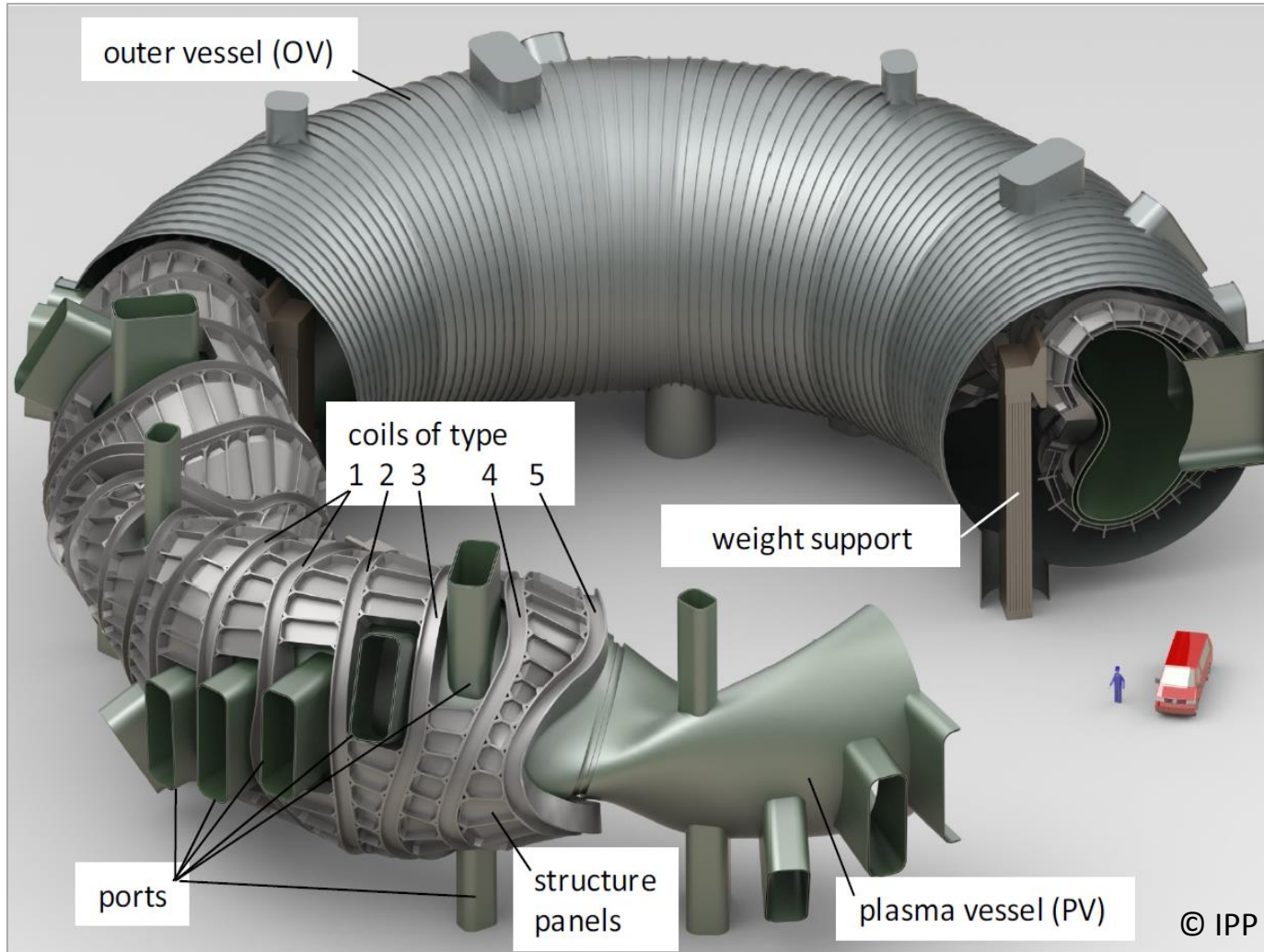


Energie für unsere ca. 1000  
Mitarbeiter für 1 Jahr



© IPP

**... weltweit verfügbar!**



## technische Parameter

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| Volumen             | 1400 m <sup>3</sup> |
| Spulenzahl          | 50                  |
| Radius              | 22 m                |
| Magnetfeld          | 5.9 T               |
| Leistung thermisch  | 3 GW                |
| Leistung elektrisch | 1.5 GW              |

Geht es auch kleiner? Nein!



CC BY-SA 3.0

1. Plasma im Dauerbetrieb
2. langlebige Materialien
3. preisgünstige Magenttechnologie
4. effiziente Tritiumerzeugung in der Wand



ökonomisch sinnvolles Fusionskraftwerk

# Eine künstlerische Ansicht eines Fusionskraftwerkes

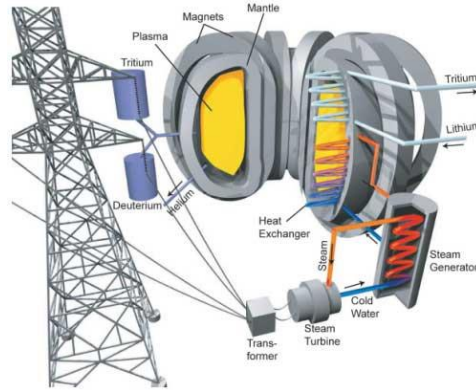


EU DEMO – Start 2050?

ITER Cadarache – Start 2025



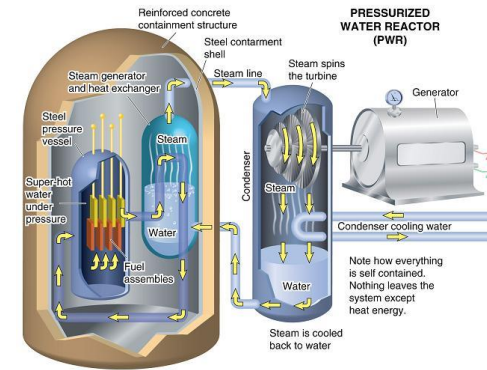




© EUROfusion

## Fusionskraftwerk

nukleare Technologie → Strahlenschutz  
Aktivierung Metallstrukturen ~ 100a  
nuklearer Brennpzess → passiv sicher  
kein hochradioaktiver Abfall → keine Endlagerung  
1-2 g Brennstoff im Kessel

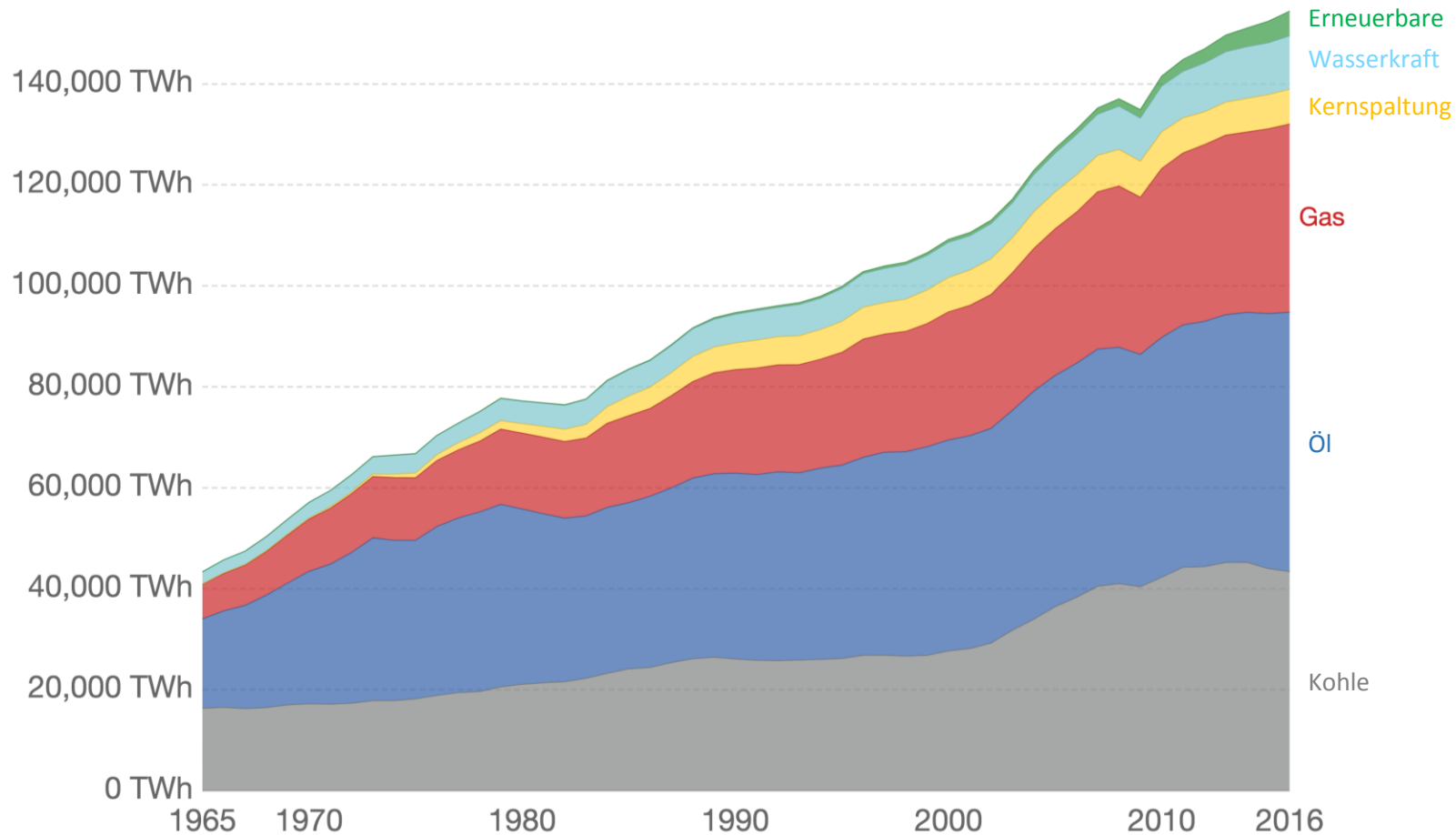


Referenz: learnwise.co

## Spaltkraftwerk

nukleare Technologie → Strahlenschutz  
Aktivierung Metallstrukturen ~ 100a  
nukleare Kettenreaktion → Steuerung  
hochradioaktiver Abfall → Endlagerung  
100-200 t Brennstoff im Kessel

# Brauchen wir Fusionsenergie?



weltweiter Energiemix



sehr CO<sub>2</sub>-lastig

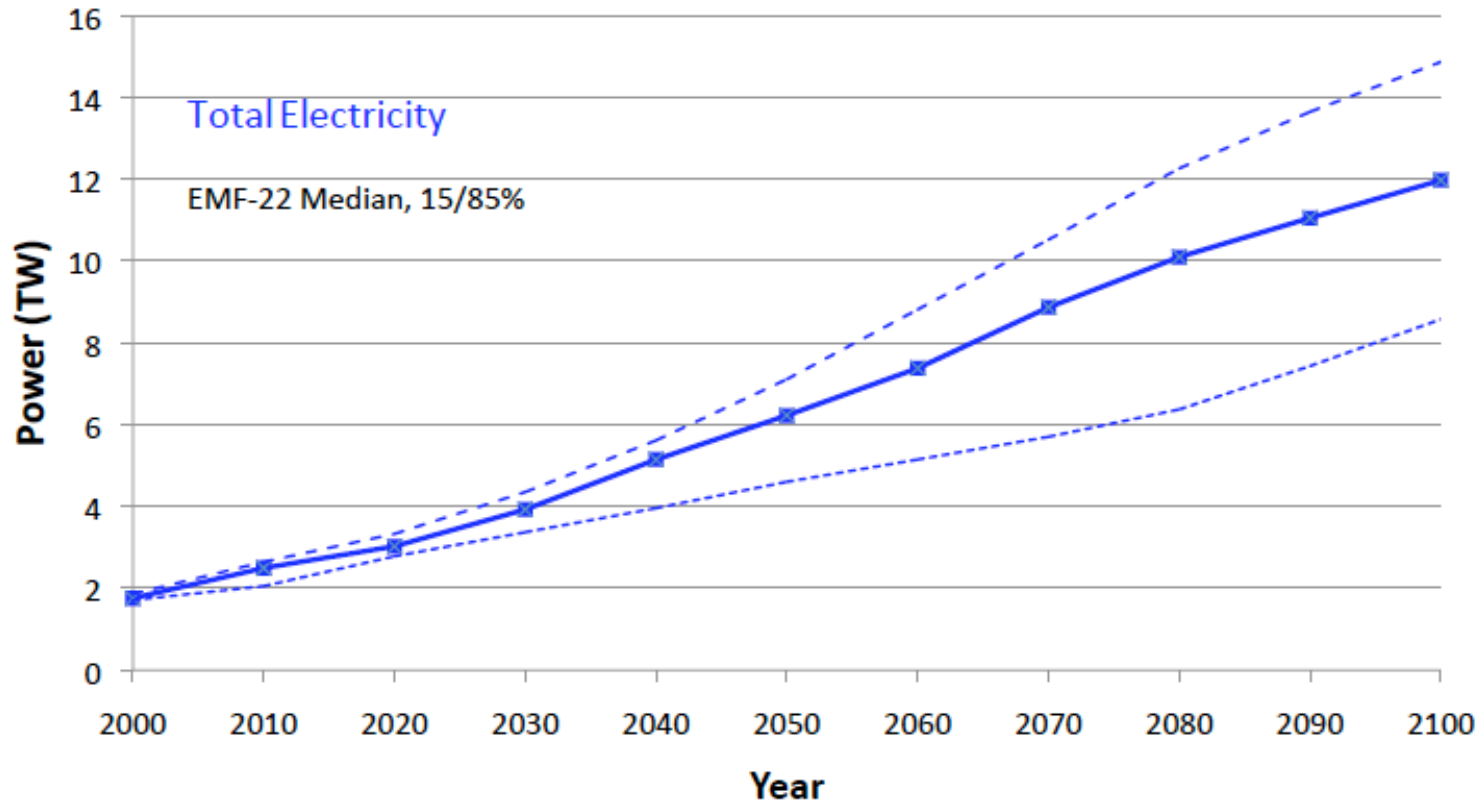
Source: BP Statistical Review 2016

OurWorldInData.org/energy-production-and-changing-energy-sources/ • CC BY-SA

# Brauchen wir Fusionsenergie?



## Global Electricity Production



globale Stromnachfrage steigt um etwa Faktor 6 - die Hälfte davon nach 2050!

Zuwachs entspricht 10.000 Gigawatt-Kraftwerken - also 2 pro Woche!



- **Brennstoffvorrat fast unbeschränkt und für alle Nationen verfügbar**
  - keine Kämpfe um Rohstoffe
- **Vorteile für die Umwelt**
  - keinerlei CO<sub>2</sub> Emission, Unfall- und Verunreinigungsrisiko minimal
- **Sichere Versorgung im Zusammenspiel mit Erneuerbaren Energien**
  - optimal für Versorgung bevölkerungsreicher Gebiete („Mega-Cities“)
  - optimal für die Versorgung großer Industrieanlagen
  - Grundlast, falls keine Nachfrage - Produktion chemischer Energiespeicher
- **Wendelstein 7-X ist ein Grundlagenexperiment mit Schlüsselfunktion**
  - Wasserstoffplasmen relevant für Fusion im Dauerbetrieb