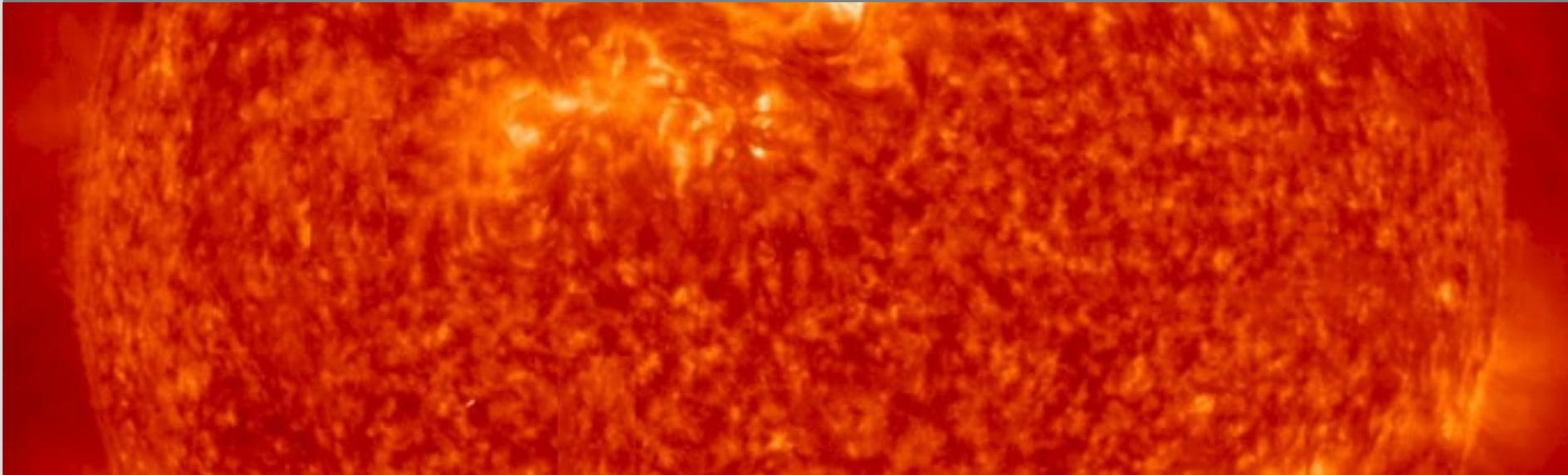


Fusionskraft - Träume, Optionen und Herausforderungen ?

Robert Stieglitz*

* beinhaltet persönliche Gedanken und Sichtweisen

Fusion Program



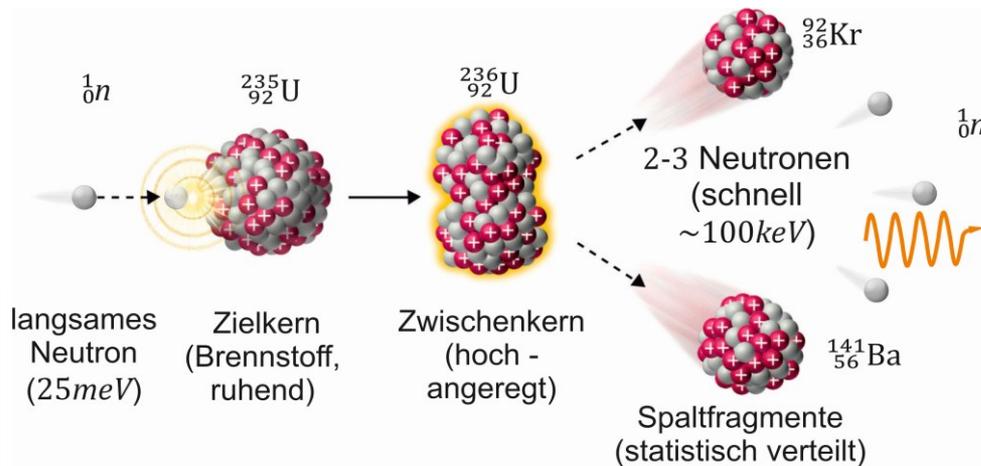
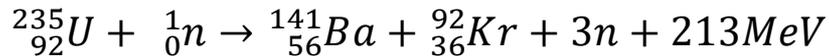
Inhalt

- **Was ist Fusion ? Energie-Brennstoff-Charakterisierung-Einschluss**
- **Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation**
- **Fusionskraftwerk >> Plasmaeinschluss+Zündung!**
- **Herausforderungen und Lösungen**
- **Schlussbemerkungen – Fusion ist High Tech für die Energiewende !!**

Was ist Fusion ?

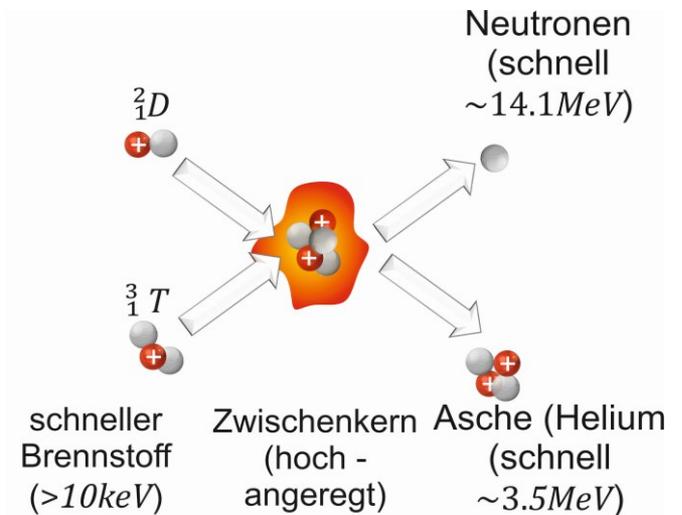
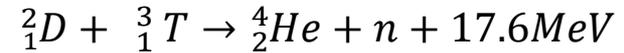
■ Fusion = **Kernreaktion** mit Freisetzung der Bindungsenergie

■ Kernspaltung



- mehr Neutronen als Endprodukt als zu Beginn (Reaktivitätskontrolle)
- aktivierte Spaltprodukte (aber immobil)
- geringe Aktivierungsenergie (selbsterhaltende Reaktion- **Sicherheit !**)

■ Kernfusion



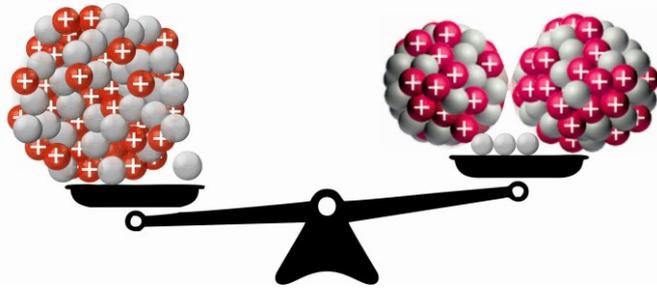
- schlechte Neutronenbilanz
- Asche neutral (Neutron ggf. zum Brennstoffbrüten-Aktivierung)
- hohe Aktivierungsenergie (effizientes Zünden bzw. Heizen)

Was ist Fusion ?

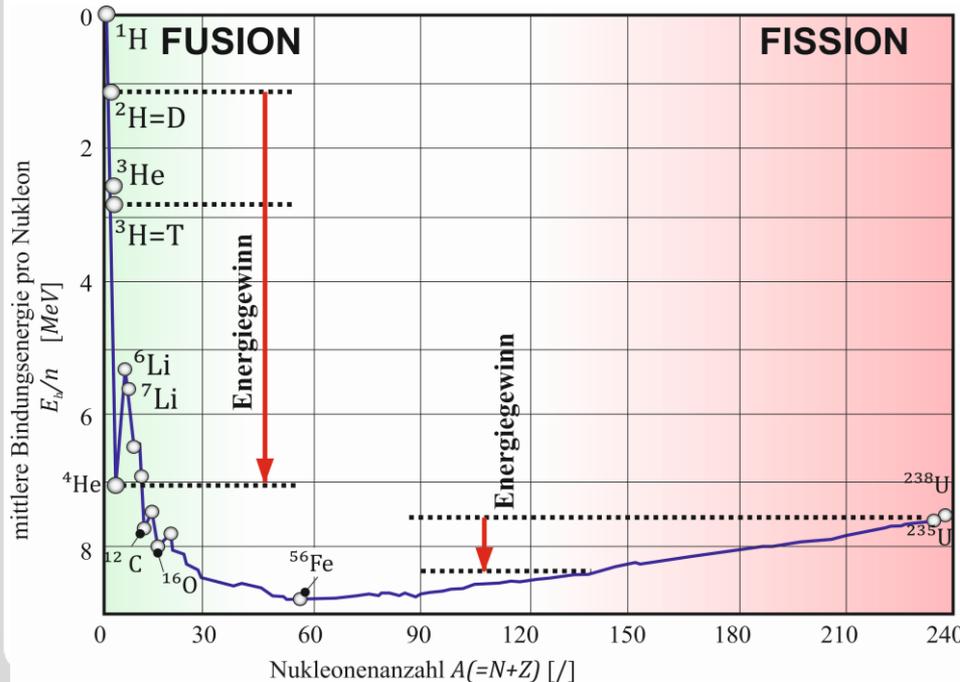
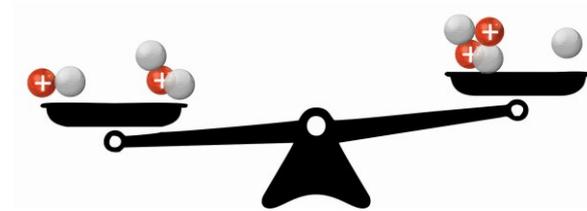
■ Woher kommt die Energie? **Massendefekt = Einsteinformel**

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

■ Kernspaltung



■ Kernfusion



■ pro Kernbaustein (Nukleon) ca. 5x mehr Energie als bei Kernspaltung

■ Größenvergleich -andere Träger?

$$E_{\text{Kernreaktion}} \approx 1 - 5 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{Verbrennung}} \approx 4 \text{ eV}$$

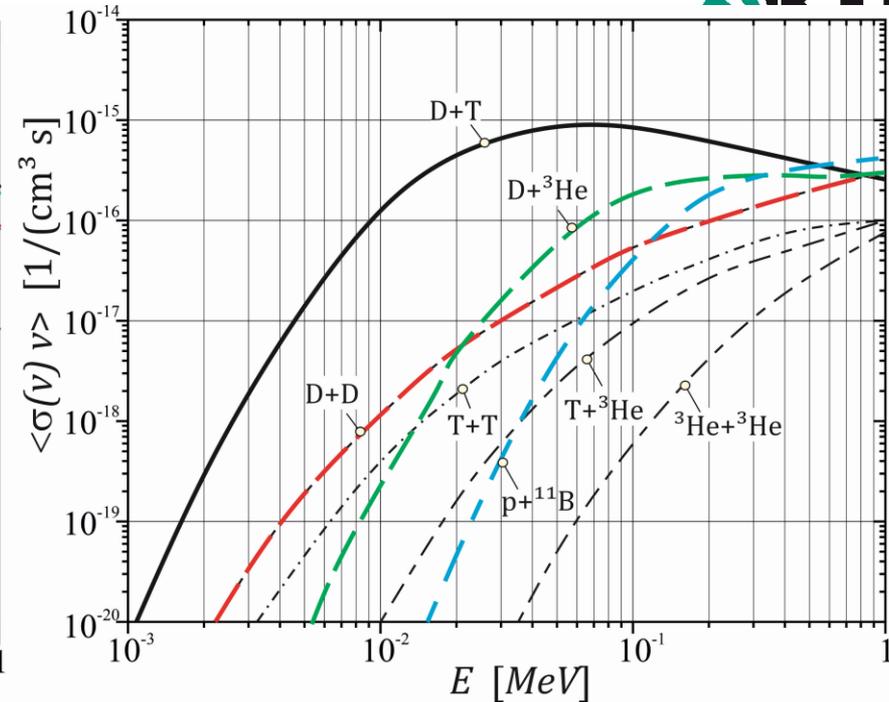
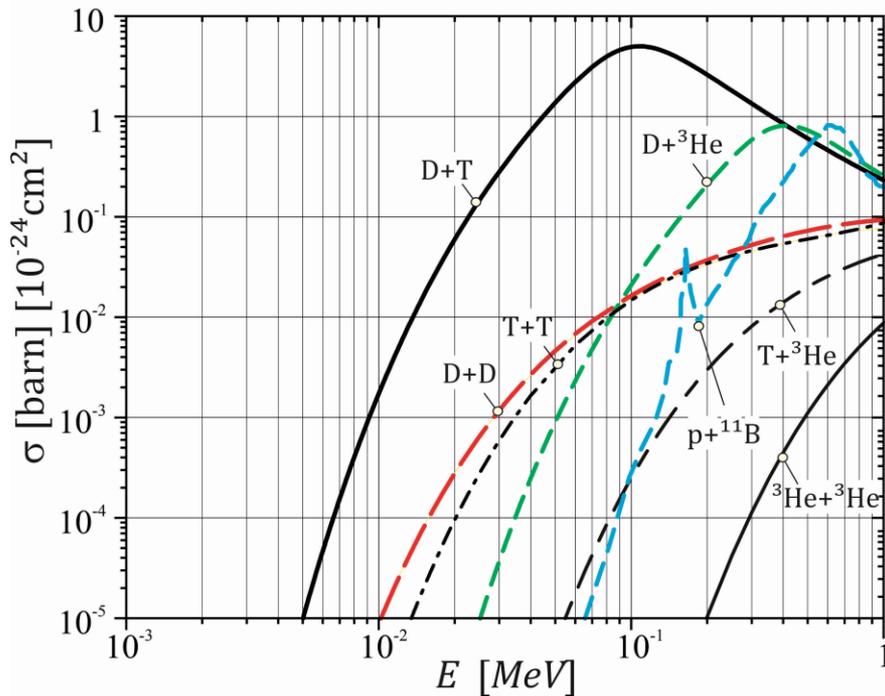
$$E_{\text{solar}} \approx 1 \text{ eV}$$

$$E_{\text{Redox}} \approx 30 \text{ meV}$$

➔ hohe Leistungsdichte,

➔ wenig Brennstoff

Was ist Fusion ? – Brennstoffe



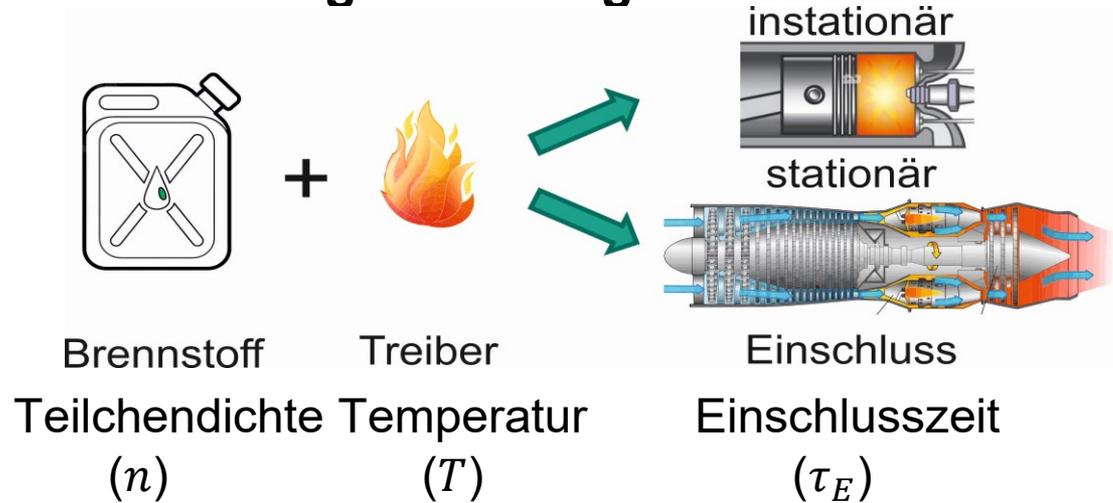
- Fusion nur im Plasmazustand* möglich ($> 10keV \approx 100Mio\ Kelvin$)
- $D - T$ mit höchster Reaktionsrate bei gleichzeitig kleinster Temperatur
- alle aneutronischen Brennstoffe (${}^3He, {}^{11}_5B$) erfordern deutlich höhere Temperaturen und haben kleinere Reaktionsraten
- ➔ aber **Tritium muss erbrütet werden** (dafür wird das Neutron gebraucht)
- ➔ **hohe Temperaturen** ($> 100Mio^\circ K$), gute Isolation nötig
- ➔ nur drei Brennstoffe möglich (${}^2_1D, {}^3_1T, {}^3_2He, {}^{11}_5B$)
- ➔ lediglich wenige Firmen verzichten auf $D - T$ -Fusion (TAE, LPPFusion, HB11, Marvel, Alpha Ring)*

Was ist Fusion ? – Brennstoffe

- **Fusionsreaktionen**
 - ${}^2_1D + {}^3_1T \rightarrow {}^4_2He (3.5 MeV) + n (14.1 MeV)$
 - ${}^2_1D + {}^2_1D \rightarrow {}^3_1T (1 MeV) + p (3MeV) + 4MeV$ oder
 - ${}^2_1D + {}^2_1D \rightarrow {}^3_2He (0.8MeV) + n (2.5 MeV) + 3.3MeV$
 - ${}^2_1D + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He (3.7 MeV) + p (14.6MeV) + 18.3MeV$
 - $p + {}^{11}_5B \rightarrow 3 \times {}^4_2He (8.7 MeV)$
- **alle** Fusionsreaktionen führen zu **nuklearer Materialschädigung** (Verlagerungsschäden – *dpa* → Aktivierung der Strukturen)
- alle Reaktionsenergien ($> 1 - 2MeV$), d.h. **Transmutation** der Strukturmaterialien verbunden mit *H* und *He*-Bildung.
 - ➔ regelmäßiger Austausch der plasmanahen Wände (Zwischenlagerung, Robotik).
- alle „nicht gefangenen“ geladenen Teilchen werden im Strukturmaterial implantiert
 - ➔ Schädigung
 - ➔ Heizung nur der Oberfläche
 - ➔ magnetischer Einschluss ermöglicht Nutzung als Heizenergie ☺
- einige Brennstoffe kommen selten vor (${}^3_1T, {}^3_2He$)
 - 3_2He nur in Spuren verfügbar, Herstellung aussichtslos
 - Tritium (radioaktiv, β -Zerfall, Halbwertszeit 12.32Jahre) erbrütbar über 6_3Li und 7_3Li Reaktionen mit Neutronen
- **neutronenerzeugende** (*n*) Reaktionen erlauben auch **Wärmeabfuhr im Volumen**
 - ➔ Heizung von Oberfläche und Volumen (➔ geringere Materialanforderungen)

Was ist Fusion ? – Charakterisierung von Fusion

- Techn. **Fusionsziel = Nettofreisetzung von Energie durch das Plasma**
- Analogon chem. Träger

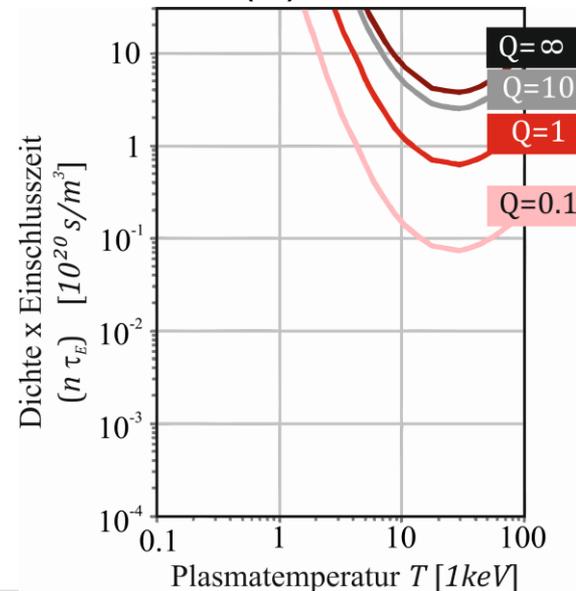


- Fusion (Plasma):

- **Qualitätsfaktor Q**
 („energy gain factor“)

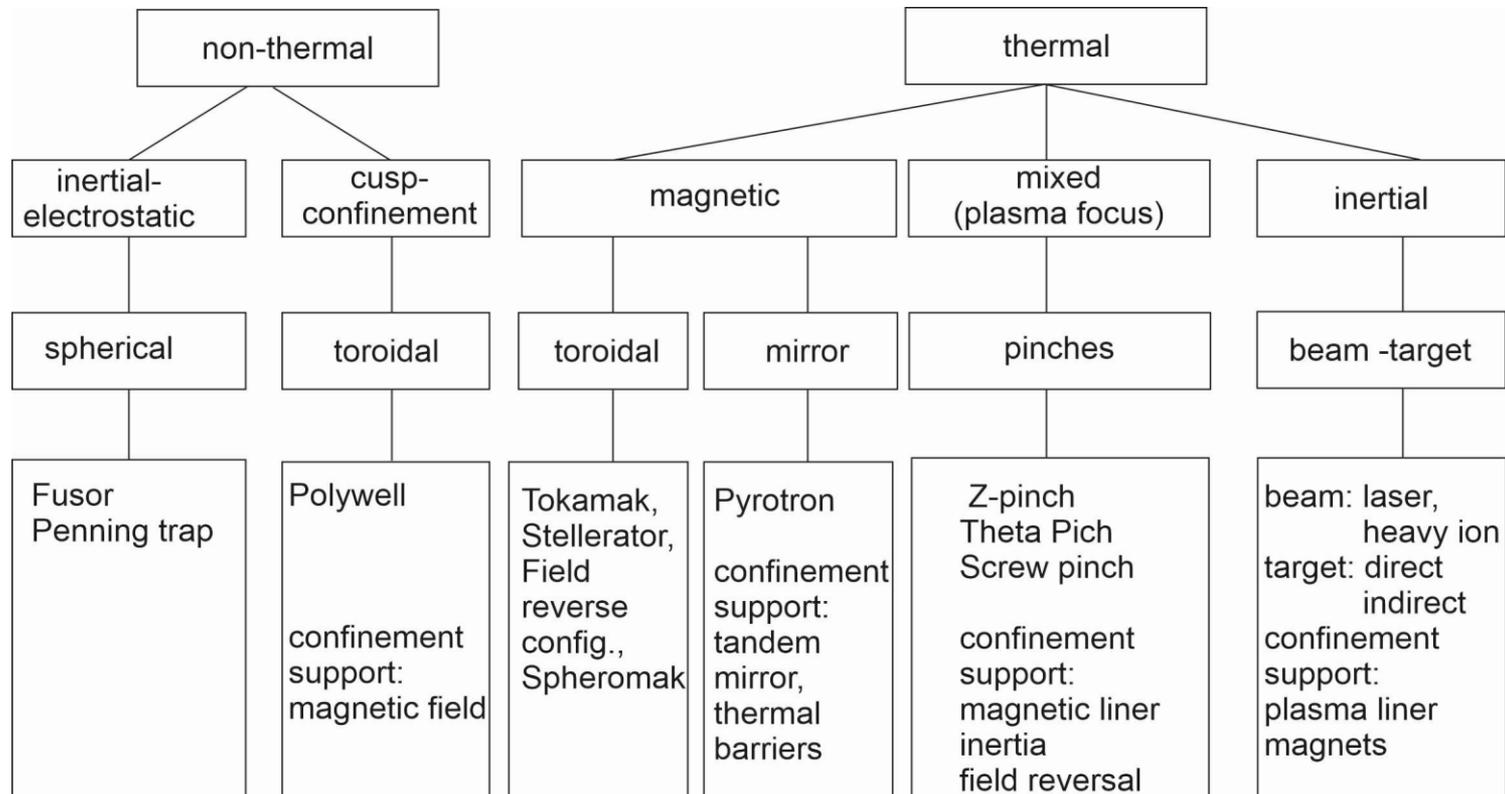
$$Q = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aufgewendete Heizleistung}} > 1$$

- Suchgröße =
Einschlusskonfiguration

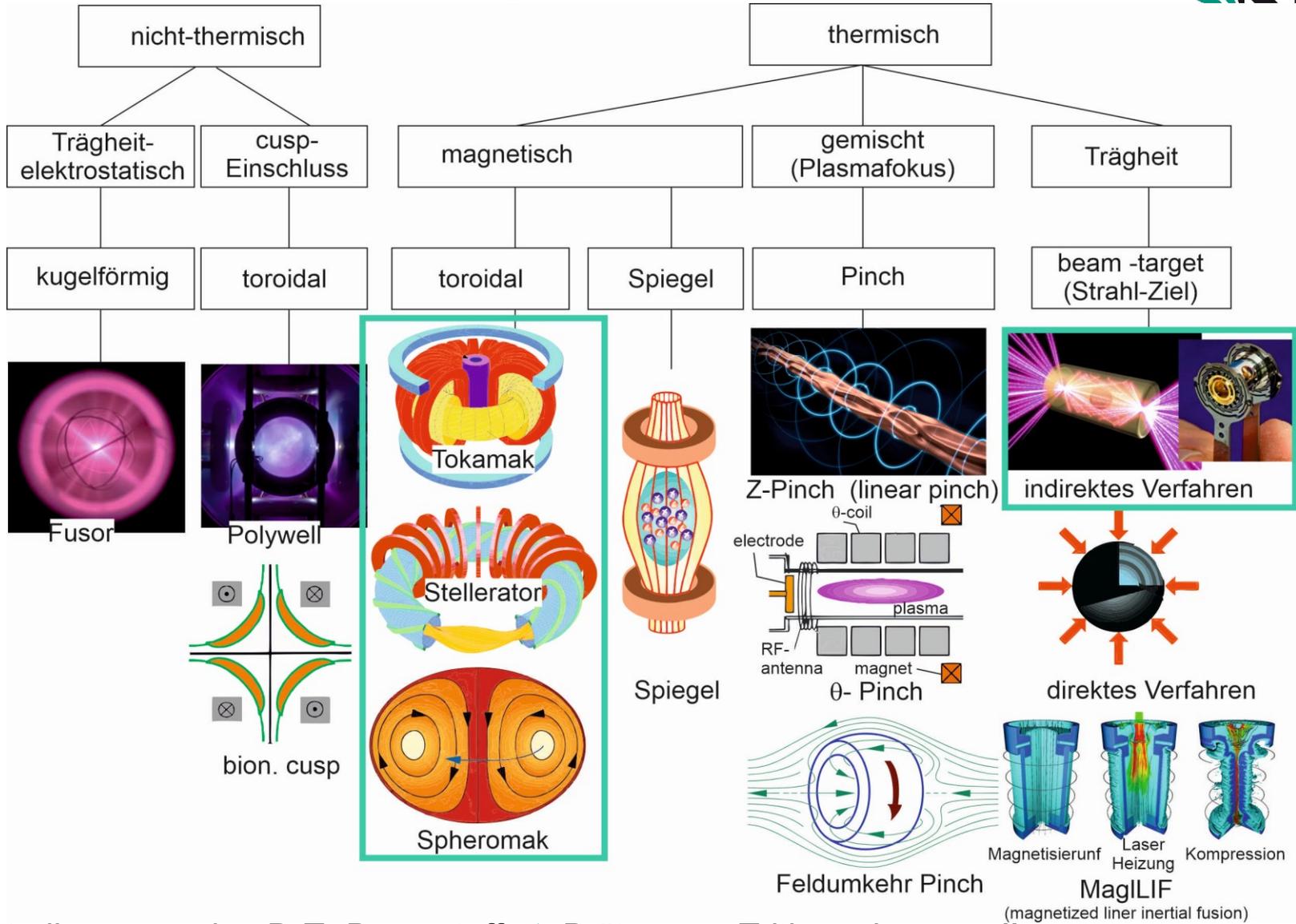


Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation

- **zwei Einschlussfamilien** = nicht-thermischer und thermischer Einschluss
- fünf Linien (Kategorisierung: physikal. Kräfte und geometr. Plasmaanordnungen)
- sechs Geometrien
- ➔ theoretisch ca. 60 Fusionskraftwerkskonzepte möglich



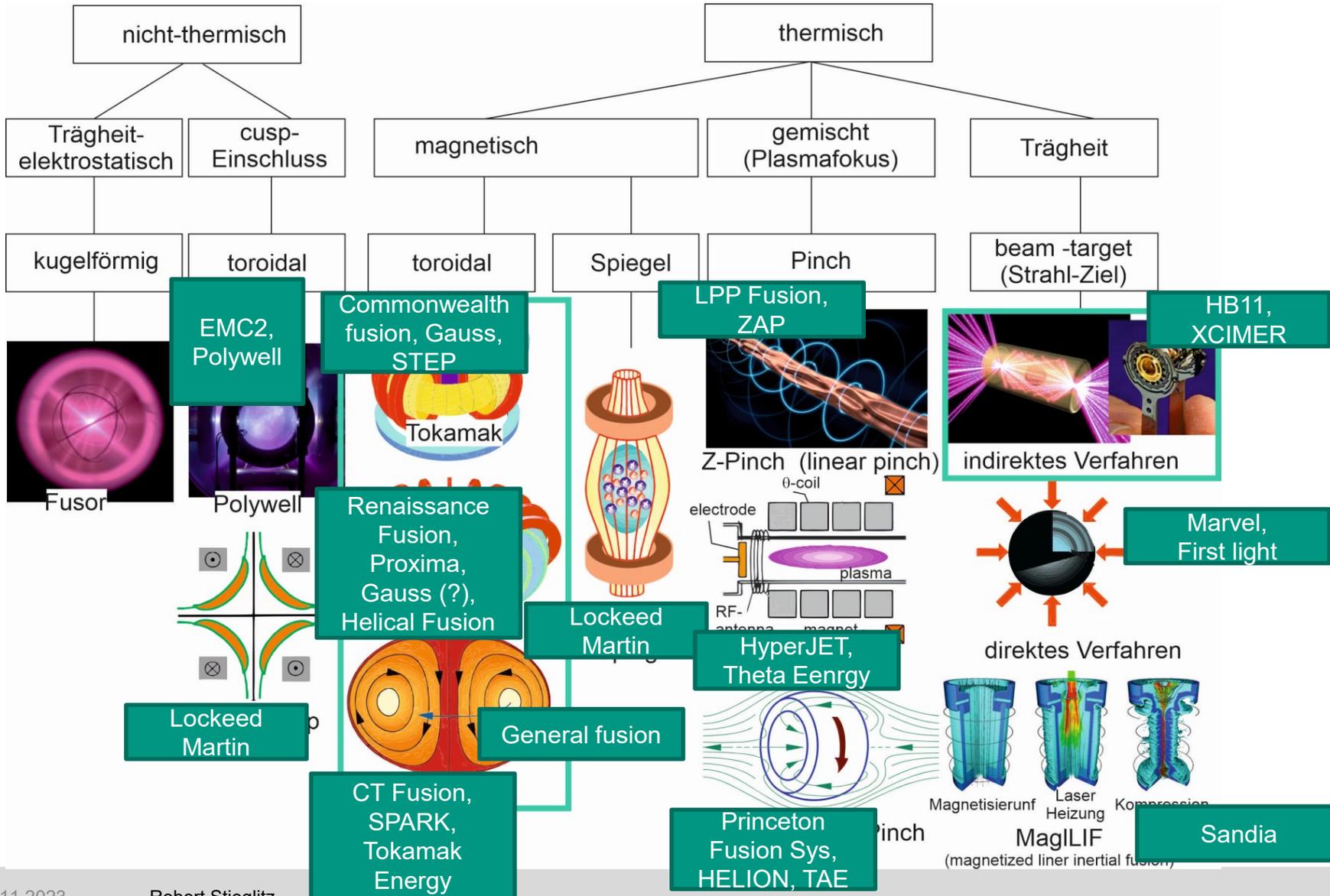
Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation



■ fast alle verwenden D-T- Brennstoff ➔ Brüten von Tritium ein muss !!

Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation

- Firmen (lediglich Beispiele mehr <https://www.fusionindustryassociation.org/about/members/>)

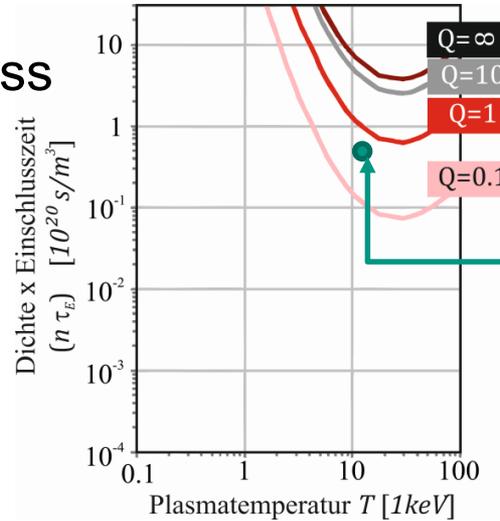
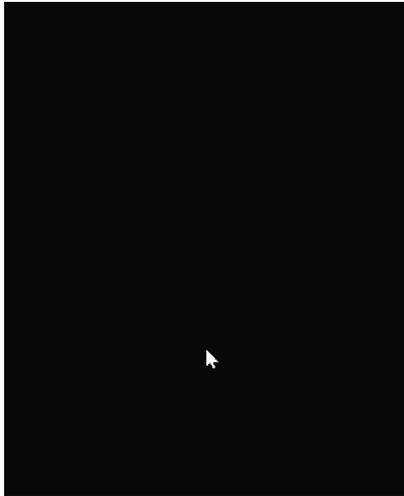


Was ist Fusion ? – Was hat man erreicht ?

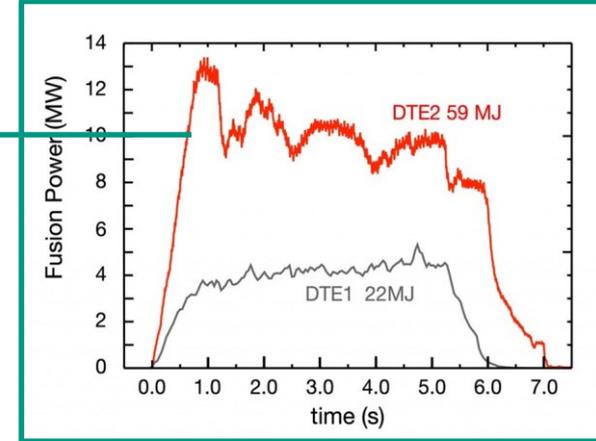
Fusion magnetischer Einschluss

- JET Tokamak (50/50 D-T fuel)

$$Q = 0.67^*$$



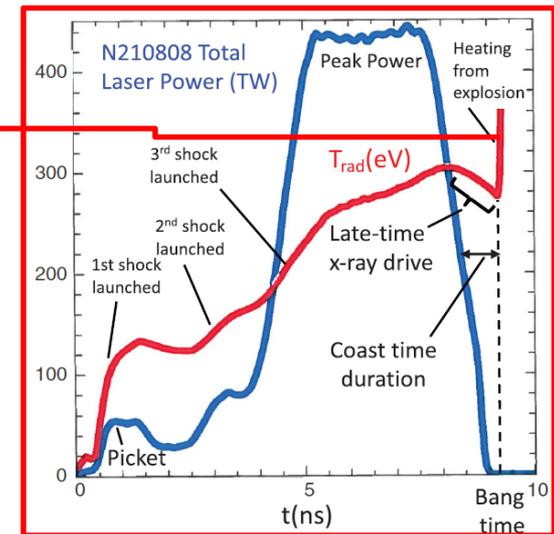
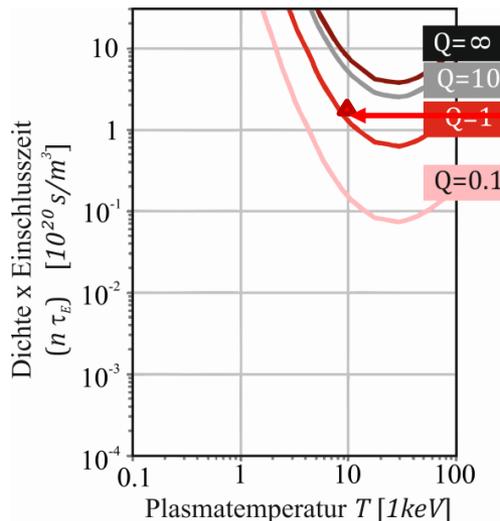
DTE2 Exp. 21st Dec. 2021 , UKAEA



Fusion Trägheitseinschluss

- NIF 2022 (August, Dez. 2022)

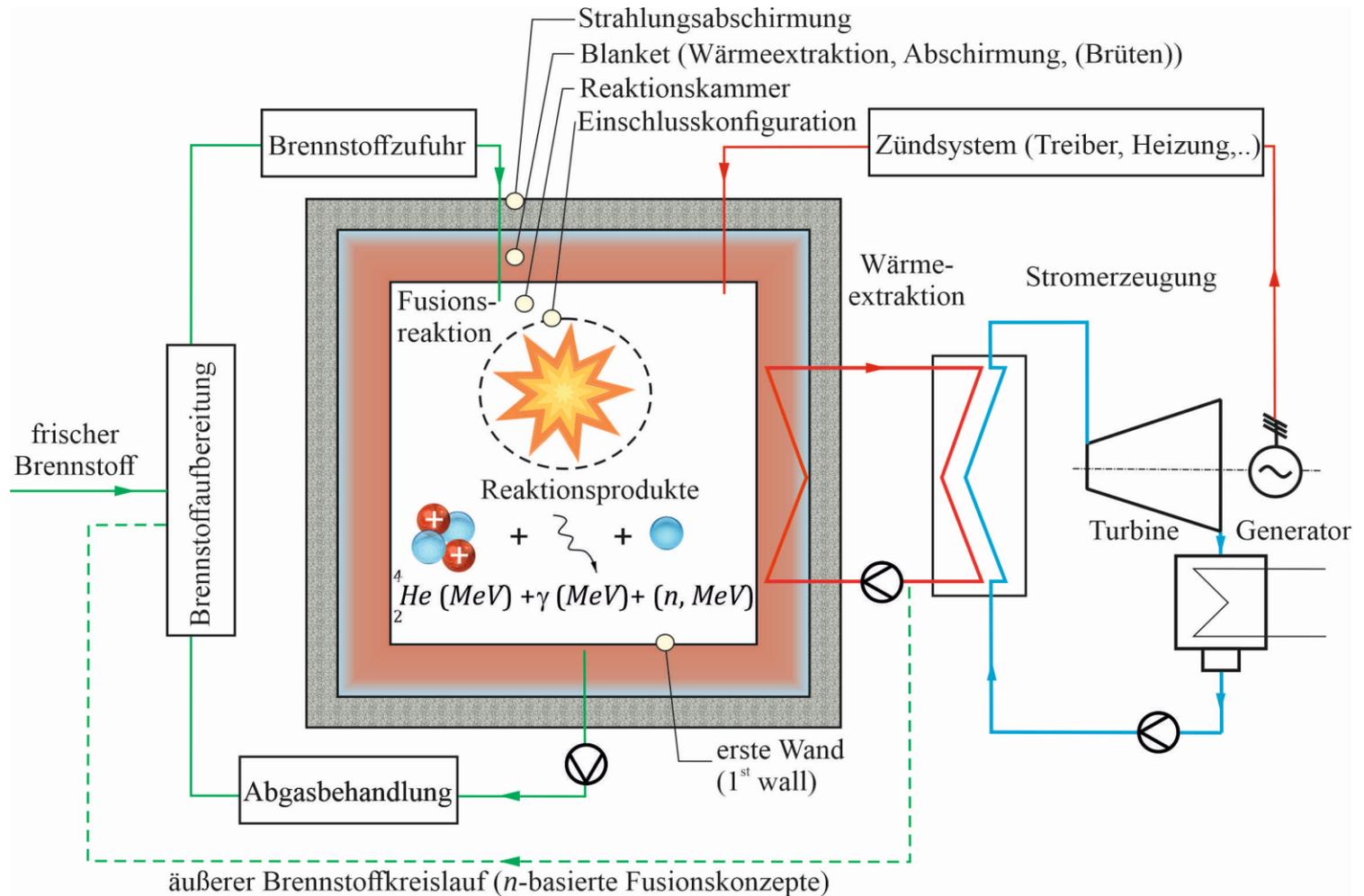
$$Q = 1.2^*$$



* allerdings bezieht sich Q auf die effektiv ins Plasma eingestrahle Leistung

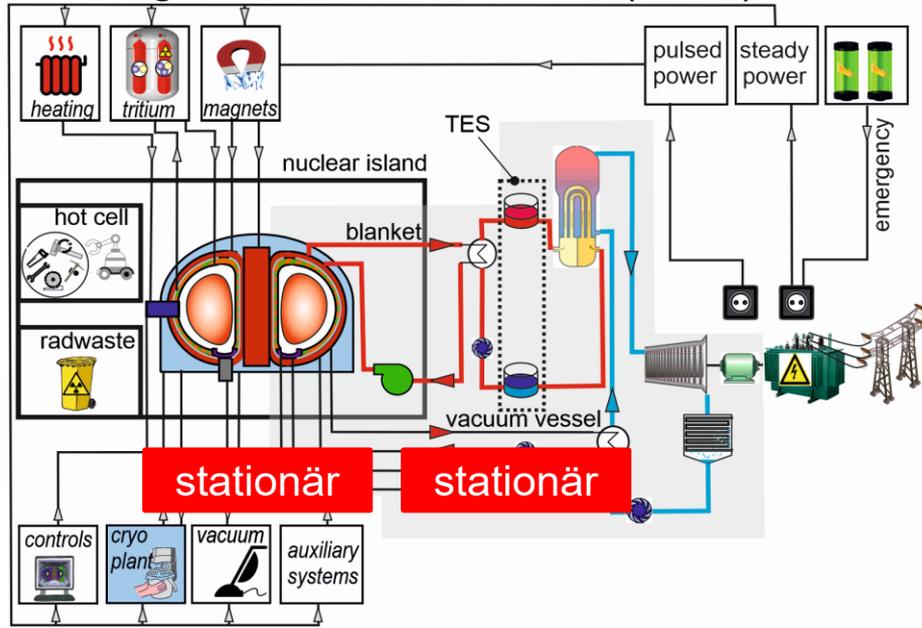
Fusionskraftwerk >> Plasmaeinschluss+Zündung

- **Einschluss + Zündung** \neq **Kraftwerk** (*Fusion gibt es schon mehrfach, experimentell auch nachgewiesen)



Fusionskraftwerk >> Plasmaeinschluss+Zündung

- MCF und ICF Fusionskraftwerke unterscheiden sich substantziell
- Magnetfusionskraftwerk (MCF)



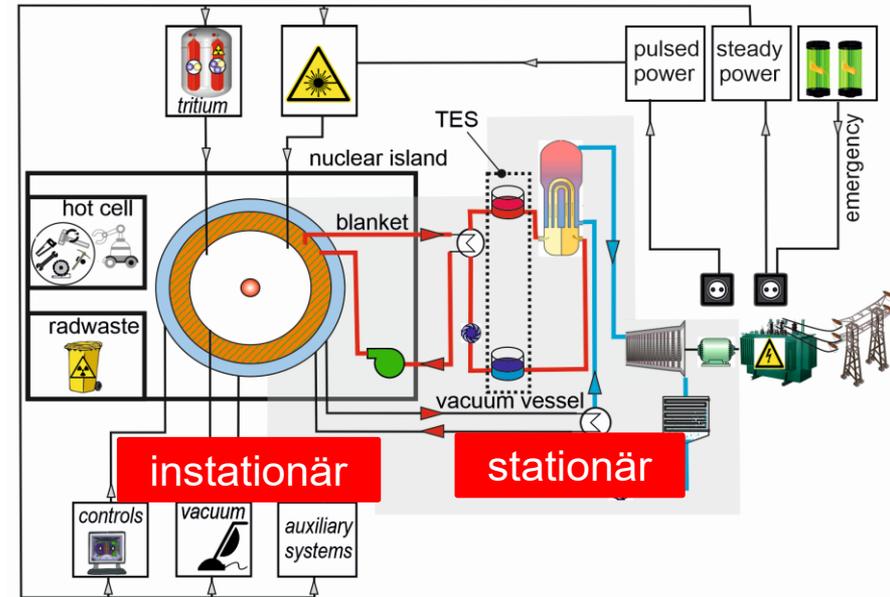
- viele komplexe Systeme
- komplizierte Logistik
- zahlreiche Schnittstellen
- Verifikation vieler Systeme vorhanden

Synergien MCF-ICF:

- ähnliche Systeme
- Leistungskonversion
- nukleare Sicherheit



- Trägheitsfusionskraftwerk (ICF)



- weniger Systeme (kein Stromtrieb, Divertor, Magnete → kompakte Bauweise ?)
- weitgehend unabhängiger Betrieb von Systemen

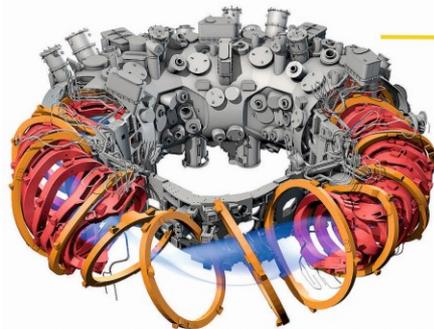
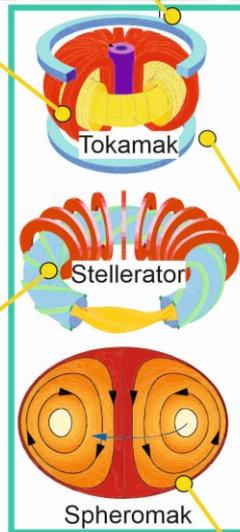
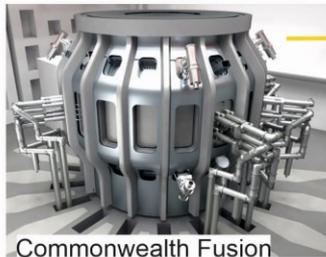
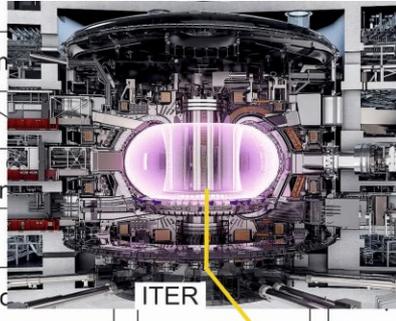
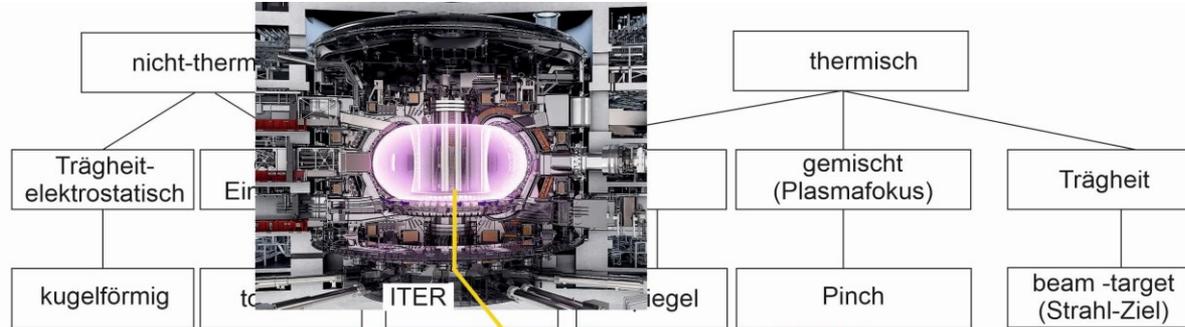


ICF simpler als MCF ?

NEIN:

- Materialherausforderungen größer
- Kraftwerkskonzept (BoP) und
- Design zentraler Systeme noch nicht begonnen.

Fusionskraftwerk >> Plasmaeinschluss+Zündung



■ bislang nur geschlossene Kraftwerkskonzepte in der Magnetfusion !!

kritischer Konzeptpfad

„geschlossenes Fusionskraftwerkskonzept“

- Bereitstellung Grundlagen beruhenden ganzheitlichen Kraftwerkskonzeptes
- ➔ Ermöglichung einer Risikobewertung des Gesamtkonzeptes.
- ➔ Ermittlung zentraler für die Funktionalität/Sicherheit des Konzeptes relevanter Systeme (Anforderungen an Systeme, bauliche Gestaltung,..)
- ➔ Verfügbarkeit / Wirtschaftlichkeit/....

Bemerkungen*

- in Magnetfusion vorhanden, aber Vorsicht viele Start-ups versprechen Skalierbarkeit und schnelle Kraftwerkrealisierung (ab 2030)
 - kleine Maschinen haben nicht genügend Fläche zum Brüten – **Wo soll das Tritium herkommen ? Aus Kernspaltungsreaktoren?**
 - große Magnetfelder erlauben kleinere Maschinen – **RICHTIG** , aber die Neutronenquellendichte ist größer, so dass die Bauteile schneller versagen
 - ➔ Geschlossene Konzepte bisher große Tokamaks- **ABER** Konkurrenz belebt das Geschäft.
- Trägheitsfusion „bestenfalls“ in Ansätzen (viele Bilder im Netz kein geschlossenes Konzept)- größte Herausforderung
 - Strahlenabschirmung der Wände, bei gleichzeitigen Brüten und Wärmeabfuhr zur Leistungserzeugung (Pulslänge wenige Nanosekunden)

Fusionskraftwerk >> Einschluss+Zündung

■ generisches Fusionskraftwerk hat 5 größere Bausysteme *

① Plasma (mit Einschlusskonfiguration)

- MCF: Magnete, Spulen, Diagnost.
- ICF : Target

② Zündsysteme

- MCF: ECRH, ICRH, LHH, NBI
- ICF : Laser

③ In-Vesselkomponenten

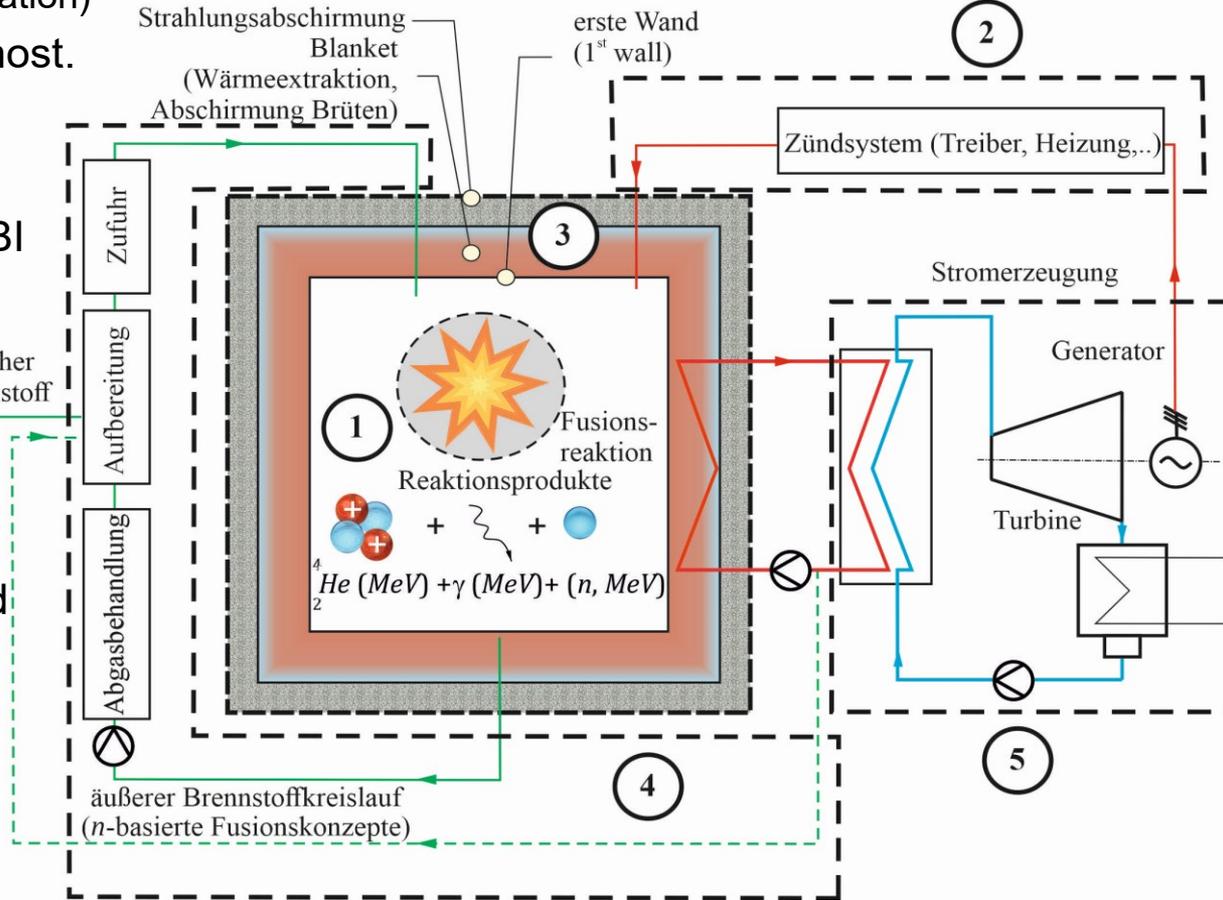
- MCF: **Blanket, Divertor;** Limiter
- ICF : **Blanket**

Instrumentierung, Struktur- und Funktionsmaterialien

④ Brennstoffkreislauf

Vakuumsysteme, Abgas-aufbereitung, Brennstoffinjektion

⑤ Wärmeabfuhrsystem



Herausforderungen und Lösungen *

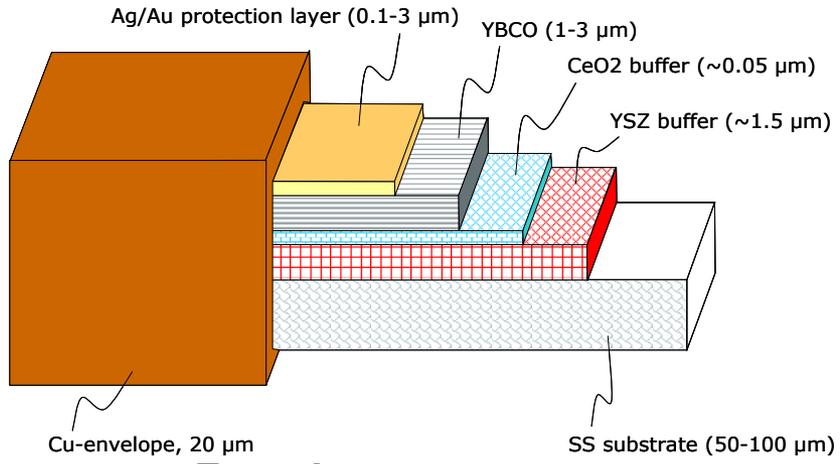
① Plasmaeinschluss (höhere Magnetfelder = besserer Einschluss)

■ Hochtemperatursupraleiter (HTS)

- geringere Kryoleistung
- Kompakte Bauweise



PLD600
Batch vacuum coating



ABAD vacuum coater



PLD600
substrate drum

Forschung

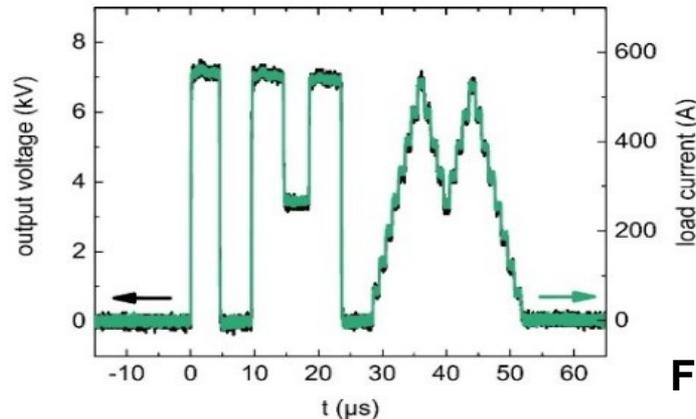
- HTS-Drähte
- Supraleitende Permanentmagnete
- Magnetdesign, Kühlung und Stabilität für alle Temperaturen
- Kryogene Verfahren (Brennstoff ICF, MCF gefrorener Wasserstoff)
- AC- & Ramping-Optimierung
- Charakterisierung
- Hybridmagnete
- ➔ Industrie-Spinoff (KIT BRUKER HTS R&D)
- ➔ Anwendungen auch in Medizin,....



② Heizsysteme (hohe Nettoeffizienz, geringe Plasmaeinkopplungsverluste,...)

■ Gyrotrons

- schnell schaltende Pulsleistungsmodulatoren
- Erzeugung, Übertragung & Anwendung von Hochenergie-EM Wellen 1 GHz bis 300 GHz wenige Watt bis MW



THALES
Building a future we can all trust

LTT
tasler.de



Forschungsfelder

- schnell schaltende Pulsleistungsmodulatoren (hohe Strahlleistungen, kompakte Abmessung, präzise, zuverlässig)
- Halbleitertechnologien (*GaN*, *SiC*) (Schaltungskonzepte, Schaltverlustreduktion)
- Ultra-schnelle Ausleseelektronik (DAQ) GS/s



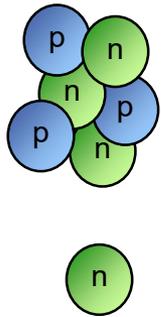
➔ **Medizintechnik, Beschleuniger, Kicker-Magnete, Trafos-Schaltungstechnik**

③ In-Vesselkomponenten

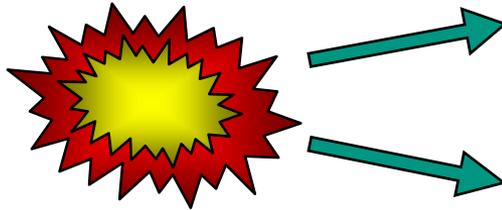
Blanket (Funktionen: Brüten, Wärmeabfuhr, Abschirmung)

- Brüten aus Lithium – Tritium herstellen

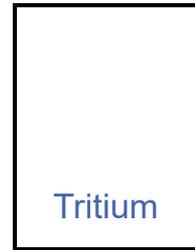
Lithium 6



Neutron



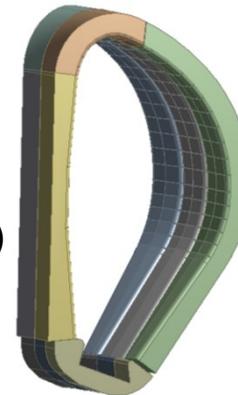
Helium



Tritium

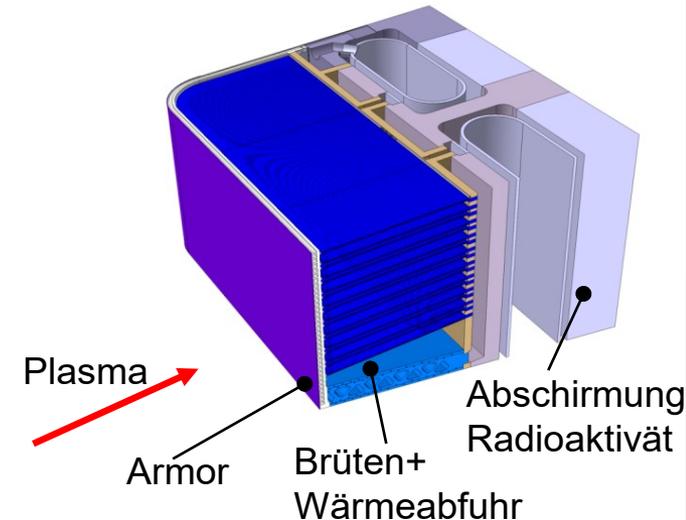
Wärmequellen im Blanket

- Brutreaktionen mit Lithium
 - ${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + T + n - 2.47\text{MeV}$
 - ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + T + \dots + 4.78\text{MeV}$
- Neutronenwechselwirkung mit Materie
 - große volumetrische Wärmefreisetzung
- Wärmestrahlung aus Plasma ($\sim 150^\circ\text{MioK}$)
 - Linienstrahlung
 - Bremsstrahlung
- Design- und -materialentwicklung



Lösungsansatz Blanket

- radiale Mehrzonenfunktionalität (Schild-, Brut/Wärmeabfuhr-, Strahlungsschild)
- modularer Aufbau
- Fernhandtierbarkeit
- sicherer Betrieb (Strahlungsabschirmung, keine Freisetzung radioaktiver Stoffe)

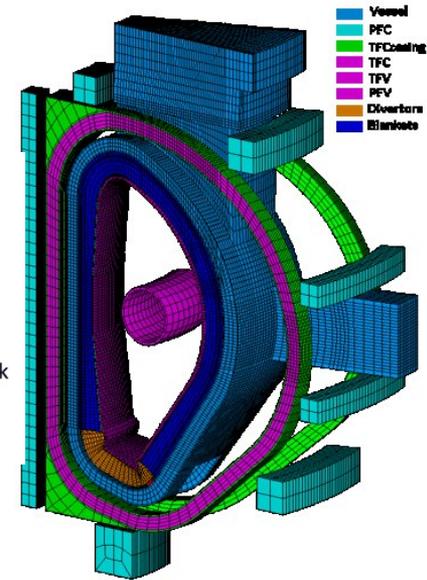
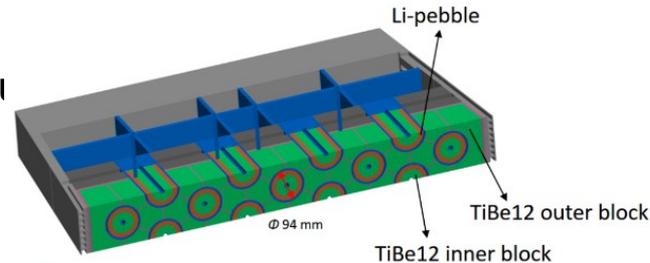


Herausforderungen und Lösungen *

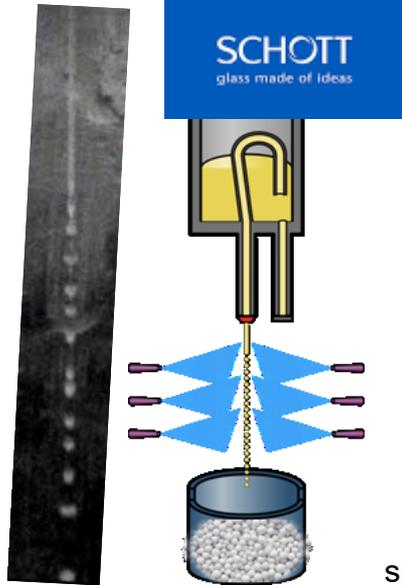
③ In-Vesselkomponenten

Blanket (Funktionen: Brüten, Wärmeabfuhr, Abschirmung)

- struktureller Aufbau zur Funktionalität
- geringe Aktivierung
- fernhandzierbarer Ein-/Ausbau
- Robustheit gegenüber Betriebstransienten



Funktionswerkstoffe (keram. Brüter)



Str_{B-B} (hier Wolfram -Plasmawandmaterial)



extrem kaltgewalzt
Test bei RT



Monoblocks mit spezif. Eigenschaften



Forschungsfelder

- Multiphysik-Multiskalenverfahren
- Neutronenresistente, niedrig-aktivierbare Struktur- und Funktionswerkstoffe
- Strahlenharte Diagnostik
- Fertigungstechnologien
- Roboterassistierte Fernhandlungstechnologien
- THz Bildgebung/Tomographie

Herausforderungen und Lösungen *

③ In-Vesselkomponenten erfordern neue Lösungen

- **Blanket** (Funktionen: Brüten, Wärmeabfuhr, Abschirmung)
 - innovative Fertigungsmethoden
 - neuartige/verbesserte Fügeverfahren
 - Integrale Bauteile
 - ➔ klassische verfahren (drehen, fräsen, biegen,...) +
 - ➔ 3D Druck, über HIP, Kaltgasspritzen und
 - ➔ Hybride Kopplung



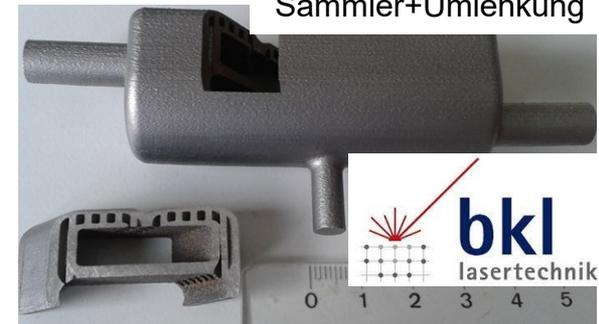
Kühlkanäle mit Sammler+Umlenkung



Biegen massiver Bauteile



Elektrisch voneinander getrennte Bauteile mit Kühlung



innenstrukturierte Kühlkanäle



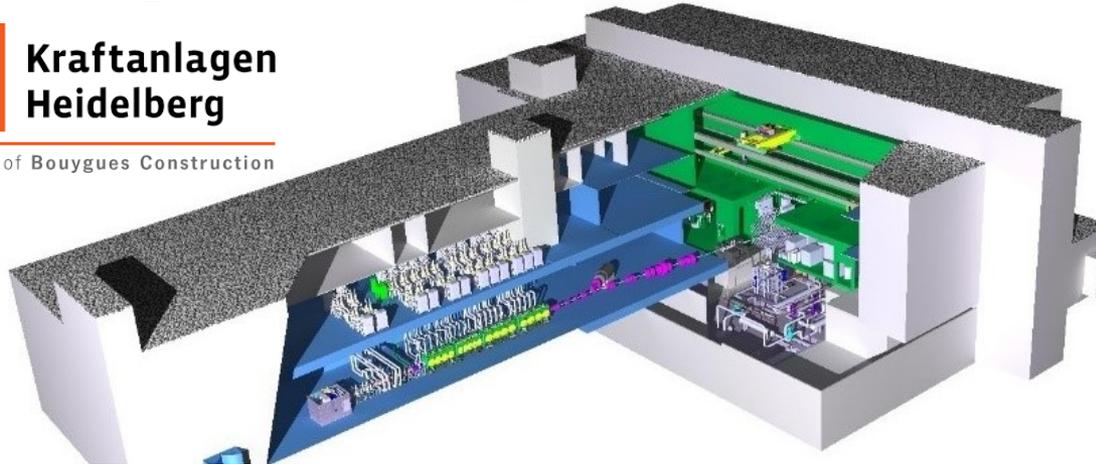
Herausforderungen und Lösungen *

③ In-Vesselkomponenten/Diagnostik

- Schädigung (Neutronen-/ γ -Strahlung) in Fusion anders als bei Beschleunigern (weniger Transmutation), aber auch Kernspaltungsreaktoren
 - ➔ **Fusionsneutronenquelle** zur Qualifizierung von Materialien erforderlich (IFMIF Dones)
 - ➔ **komplementäre Neutronenquellen für Funktionsmaterialien, bestrahlungsharte Diagnostik**, Grundlageneffekte werden diskutiert

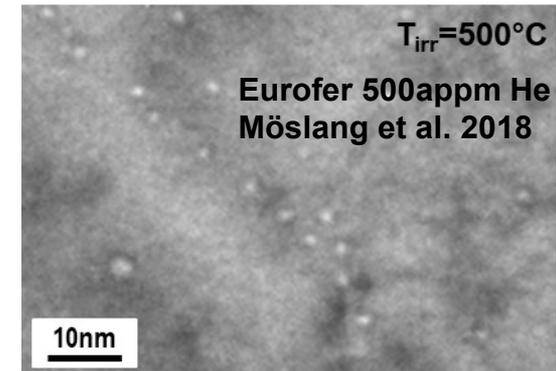


A member of Bouygues Construction

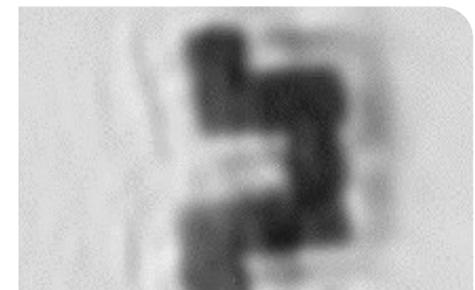


IFMIF-DONES @ Granada (<https://ifmif-dones.es/>)

- Bauzeit 10 Jahre (deutsche Beteiligung noch offen)
- erste Bestrahlungsdaten 5 J. nach Inbetriebnahme (nur Strukturmaterialien)
- Lizenzierungsprozess +5 weitere Jahre



Self-Powered-SiC-Detektoren



THz- Tomographie

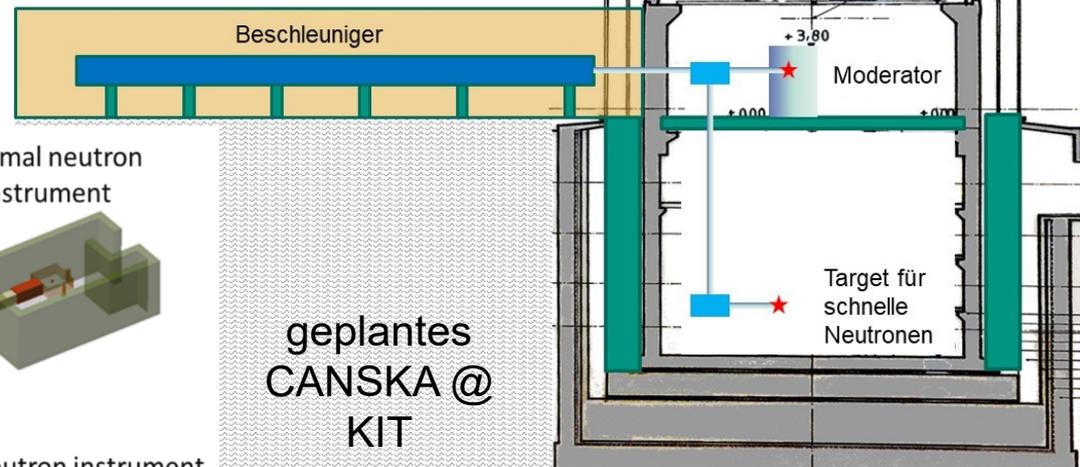
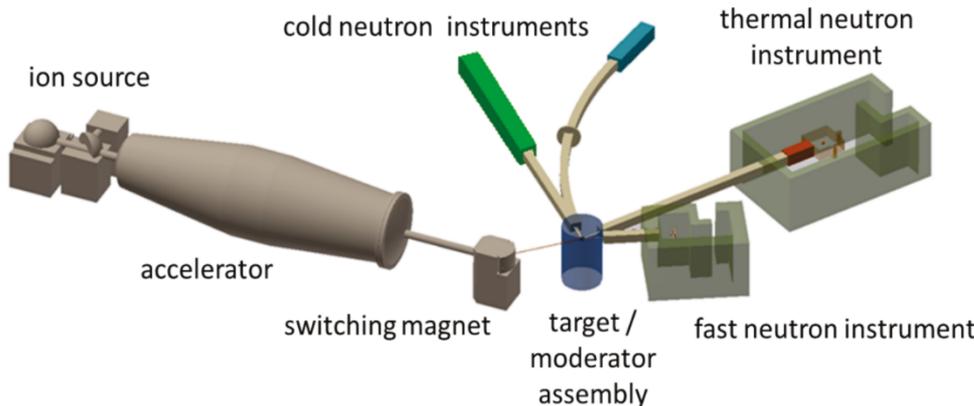
③ Neutronenquellen

- Lediglich 2 kleine Fusionsneutronenquellen in Deutschland verfügbar (HZDR, Uni-DD/KIT)
- neue beschleunigerbasierte Konzepte (FZJ, KIT) (basierend auf Beschleunigerforschung) da
- Funktionsmaterialien (Brüter, n - Multiplikator, Armor/Shielding) bisher nicht neutronenqualifiziert (basierend auf Beschleunigerforschung) da
- ➔ **fusionstypische Neutronenquelle unverzichtbar ***
- ➔ **Spin-off in verschiedene High-Techfelder absehbar (Medizin, Batterien, Werkstoffentwicklung,.....)**

FNG @ HZDR



NOVA-ERA Conceptual Design Report. FZJ



geplantes
CANSKA @
KIT

kritischer Zeitpfad

„ fusionstypische Neutronenquelle zur Materialqualifizierung“

- Lizenzierung kerntechnischer **Strukturmaterialien** (mit Abbildung in Codes/Standards) langwieriger Prozess
- ➔ Umsetzung von **IMIF/DONES unerlässlich**
- **Funktionsmaterialien** (Brüten, Neutronenmultiplikation, Abschirmen, Plasmaraumdiagnostik, (Wärmeabfuhr)) erfordern Qualifizierung in fusionstypischen Strahlungs-Neutronenspektrum
- ➔ **komplementäre multifunktionale Neutronenquelle** zeitnah erforderlich.

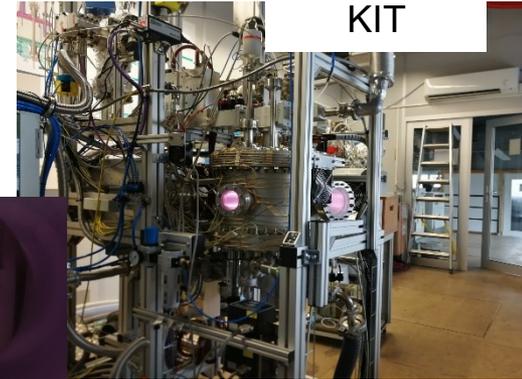
Bemerkungen*

- in Magnetfusion bisher nur Charakterisierung ohne Neutronen bzw. in Spaltreaktoren mit leider allerdings sehr müden („langsamen“) Neutronen (➔ keine Heliumtransmutation)
- Transportrechnungen nur mäßig abgesichert, (Materialverhalten ?)

④ Brennstoffkreislauf Vakuumsysteme, Abgasaufbereitung, Brennstoffinjektion

- Verfahrenstechn. System vieler Einzelkomponenten
- Abgasaufbereitung, (),
 - selektives Abtrennen von Brennstoff (Superpermeation) („Wasserstoffisotope aus dem Abgas herausfischen“)
 - Isotopenrebalancing,
 - Detritierung,
 - Brennstoffinjektion in Reaktionskammer.

Hermes @
KIT



Isotope-Rebalancing



Hg- Diffusionspumpe

Forschungsfelder

- Superpermeation/
Membranverfahren
- Vakuumsysteme mit hohem spez.
Saugvermögen
- Grenzflächenchemie/-physik
(numerisch/experimentell)
- Optimierte MC basierte Verfahren
zur Beschreibung von Vakuum
-pumpe
- ➔ **relevant für Firmen (Vakuum,
Reinraum, ...)**

Herausforderungen und Lösungen *

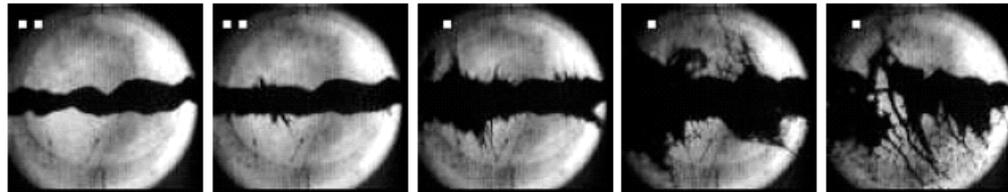
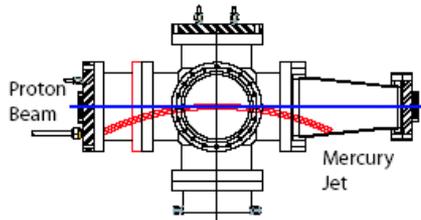
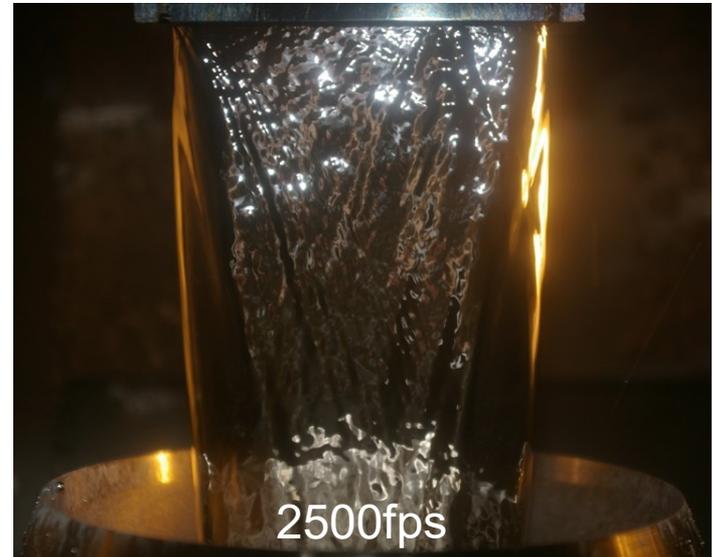
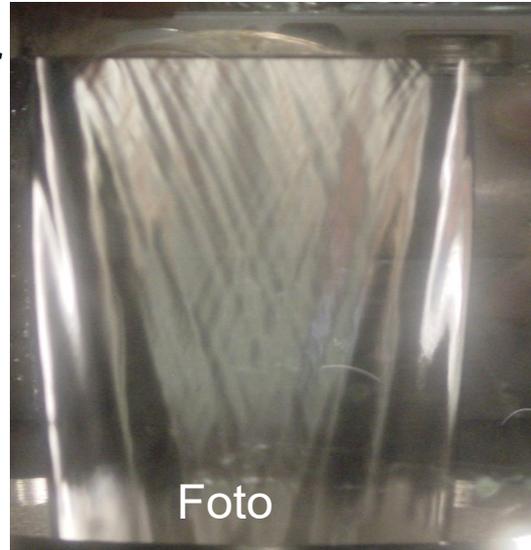
- Gepulste Betriebsweise bei Trägheitsfusion (ICF) besonders herausfordernd → bisher kein Blanket- (Target-) Konzept verfügbar
 - denkbar Flüssigmetallfilme

Natrium $u_0 = 5m/s$
@ KALLA



**Kraftanlagen
Heidelberg**

A member of Bouygues Construction



$\phi=1$ cm Hg-Jet in $2 \cdot 10^{12}$ Protons at $t=0, 0.75, 2, 7, 18ms$ (instant. Evaporation → pressure waves → Filaments)

Neutron Production target @ BNL

Schlüsselnachrichten

Fusion = **Hightech in allen Technologien der Energiewende**

- **Stärkung der Fusion an Hochschulen** als Studien- und Forschungsthema (Physik, Ingenieurwissenschaften, Informatik) unverzichtbar
- **Institutionelle technologieoffene aber zielgerichtete Fusionsforschung ist eine Zukunftsinvestition**
- **Fusion erfordert ein mit Bewusstsein für**
 - ➔ „kritische Gesamtkonzeptpfade“ (Kraftwerk)
 - ➔ „kritische Zeitpfade“ (Material bei Fusionsbeding. IFMIF, n -Quelle)
- **Industrie aus Baden-Württemberg ist heute schon in der Fusion in der Technologie & Innovation unverzichtbarer Partner der Fusionsforschung über Mitwirkung an**
 - In internationalen Projekten
 - Entwicklungskooperationen auf unterschiedlichen Niveaus
 - Fertigung von Bauteilen, Systemen bis hin zu Infrastrukturen
 - Beteiligung an der Ausbildung
- ➔ **In der Zukunft sollte auch die Industrie Fusionsforschung gezielt „offen“ unterstützen**
- ➔ **auch wenn Fusion eine einzigartige Option einer künftigen Energieversorgung erfordert sie einen langen „Atem“ aber auf dem Weg können viele Früchte geerntet werden.**

Sendungen 3SAT/ZDF zur Fusion u.a.

<https://www.zdf.de/dokumentation/3sat-wissenschaftdoku/231102-sendung-hoffnung-kernfusion-wido-100.html>



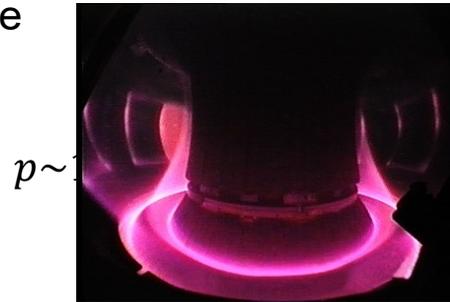
© ITER Sep.2023 , mehr Infos www.iter.org

Herausforderung Magnetfusion (MCF)

■ Brennendes Magneteinschlussplasma vs. Verbrennung?

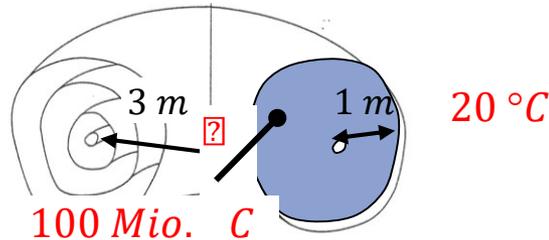
Magnetfusion

- Einschluss bei extremen Temperaturen ($10keV$)
- Einschluss der *He*-Ionen ($3.5 MeV$)
- kleine Teilchendichte
 $n \sim 10^{20} m^{-3}$
- normaler Druck



- erfordert extreme thermische Isolation

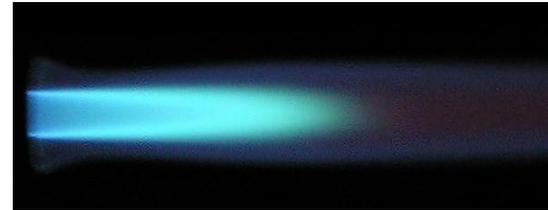
1m Magnetfeld
120m² Oberfläche
(JET torus)
➔ 20 MW



- Partikel- & Leistungsabfuhr (max. > 10 MW/m²)
- geringer Brennstoffabbrand (~1%)
- Brüten von Tritium (aus *Li*)

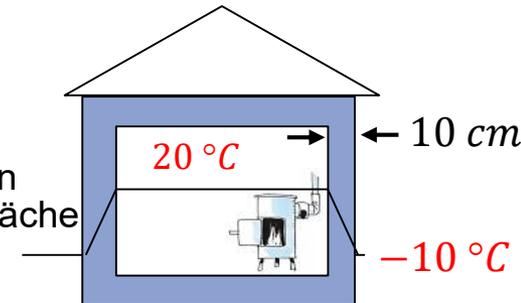
Thermische Verbrennung

- Verbrennungstemperatur $\sim 0.1eV$
- Reaktionsprodukte nicht am Prozess beteiligt
- hohe Teilchendichte $n \sim 10^{23} m^{-3}$
- moderater bis hoher Druck $p \sim 1 - 10bar$



- kleine Wärmelast
z.B. Haus

10 cm Isolation
400 m² Oberfläche
➔ 5 kW



- Limit $\sim 1MW/m^2$
- vollständiger Abbrand (> 99%)
- externe Brennstoffzufuhr

Ziel: stationäre, prädiktive Leistungsabgabe, ressourcenschonend, zuverlässig

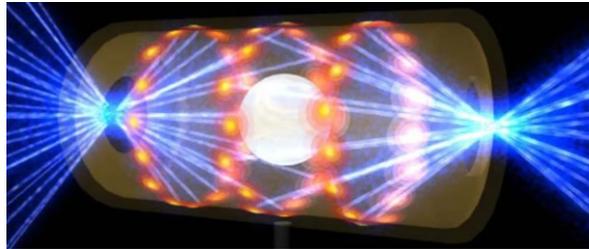
- ➔ stationäres Plasmagleichgewicht bei hinreichendem Leistungsniveau
- ➔ guter Einschluss = hohe thermische Isolation

Herausforderung Trägheitsfusion (ICF)

■ brennendes Trägheitsplasma vs. instationäre Verbrennung?

Trägheitsfusion

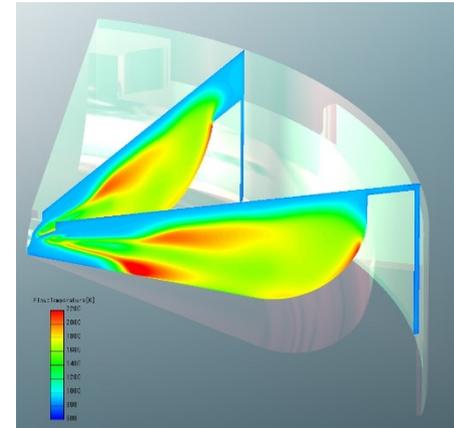
- Einschluss bei extremen Temperaturen ($10keV$)
- Zündenergie $> 1MJ$ (Laser)
- Einschluss der He -Ionen ($3.5 MeV$)
- gewaltige Teilchendichte
 $n > 10^{28}m^{-3}$
- riesiger Druck



- gewaltige Neutronenblitze (Heizung, Haltbarkeit Materialien)
- ➔ Repetitionsrate $8 - 10Hz$
- Limit Leistungsabfuhr (max. $> 20 - 40 MW/m^2$)
- relativ hoher Brennstoffabbrand ($\sim 40\%$)
- Brüten von Tritium (aus Li)

Thermische Motorverbrennung

- Verbrennungstemperatur $\sim 0.2eV$
- Zündenergie $\sim 1J$ (selbst/Zündkerze)
- Reaktionsprodukte nicht am Prozess beteiligt
- hohe Teilchendichte $n \sim 10^{23}m^{-3}$
- hoher Druck
 $p \sim 100 - 1200bar$



- Verringerung Wärmespannung über Drehzahl ($10 - 100Hz$)
- Limit $\sim 1 - 10MW/m^2$
- vollständiger Abbrand ($> 99\%$)
- externe Brennstoffzufuhr

Ziel: stationäre, prädiktive Leistungsabgabe, ressourcenschonend, zuverlässig

- ➔ wiederholbare, effiziente Verbrennung mit hoher Zündenergie (Laser)
- ➔ langzeitresistente Materialien mit Brutfähigkeit (mit Robotik zum Ein-/Ausbau)

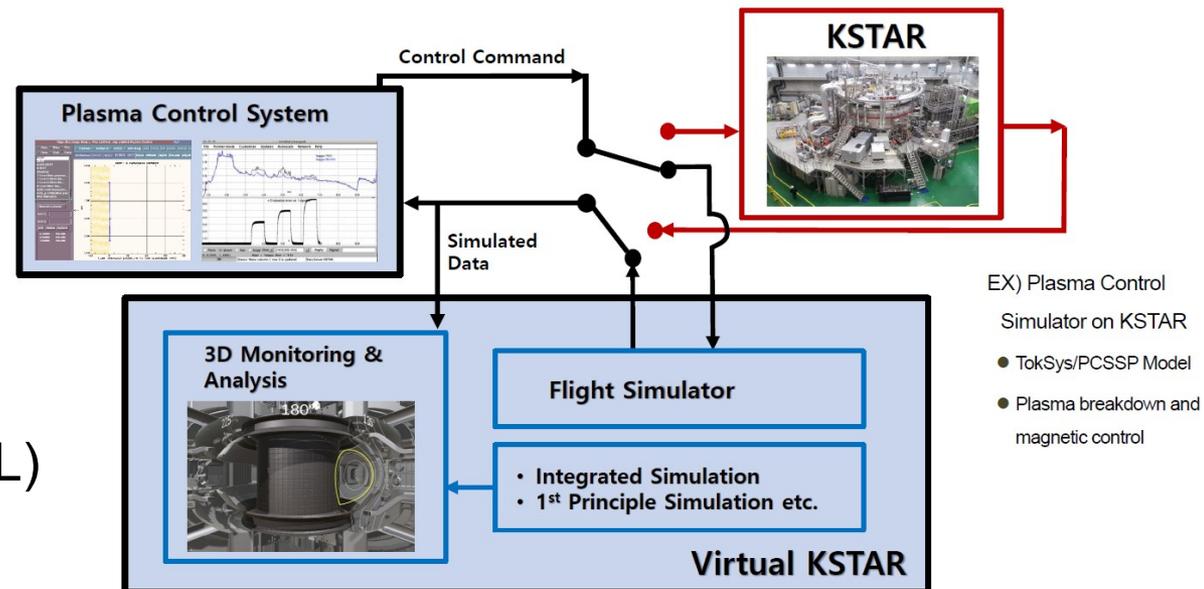
Technologische Herausforderungen für das Kraftwerk

jede Menge mehr Herausforderungen wie sie bei komplexen Anlagen (insbesondere bei Beschleunigern) bestehen.

➔ **Verzahnung Materieforschung & Fusion eher ein „Muss“** (vergl. Japan)

Themen

- Kryotechnik und kryogene Technologien
- Lasertechnologien (Quelle ➔ Einkopplung), Fokus: Effizienz in allen Bereichen (Quelle, Fokussierung, „wall-plug“,)
- KI-Methoden für
 - Steuerung, Regelung & Optimierung
 - Betriebsführung & Automatisierung
 - Injektion, Orbit-Kontrolle, Start-Up, ...
 - Stabilisierung
- maschinelles Lernen (ML)
 - Klassische ML & Deep Learning
- u.v.w.m.



Digital Twin „Standard“ in modernen Plasmamaschinen