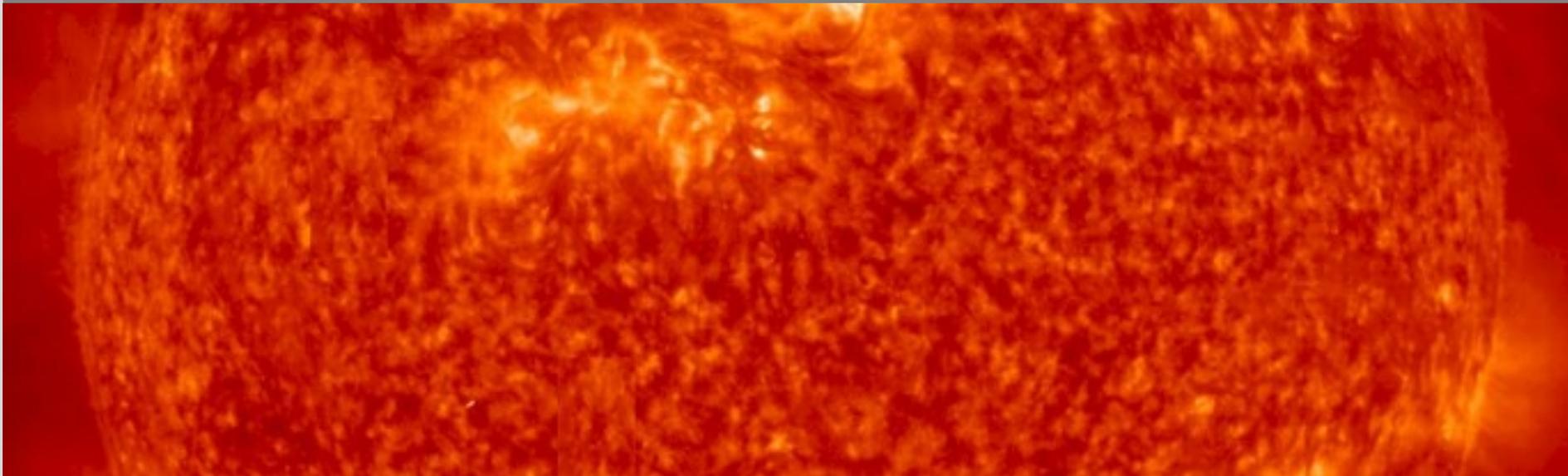


Herausforderung Fusion- Wie kann Grundlagenforschung in ErUM zur Fusion beitragen ?

Robert Stieglitz* (kondensiert aus Material vieler KIT Kollegen*)

* contains personal thoughts and views

Fusion Program



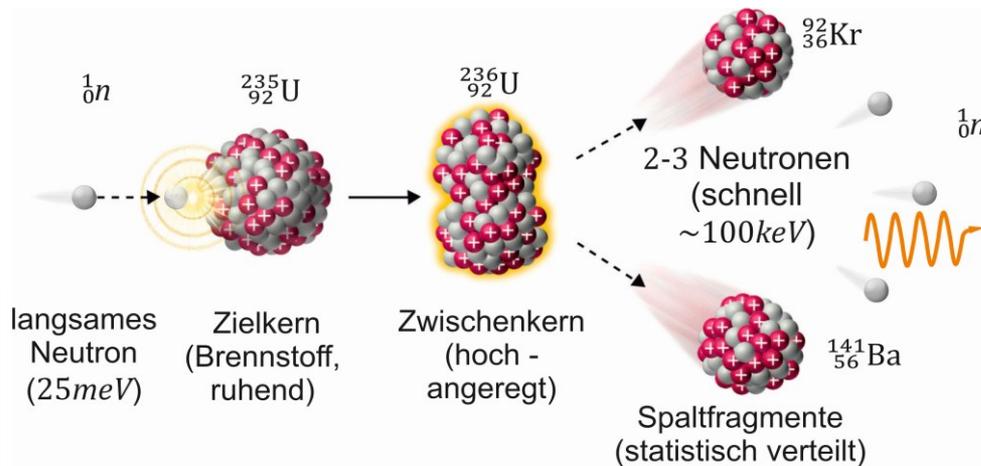
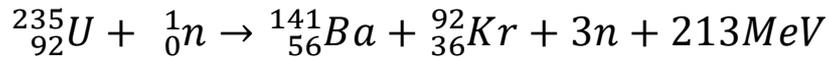
Inhalt

- **Was ist Fusion ? Energie-Brennstoff-Einschluss**
- **Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation**
- **Einschluss bedeutet kein Fusionskraftwerk !**
- **Randbedingungen der Fusionsforschung**
- **Technologische Herausforderungen für das Kraftwerk**
- **Wie kann die Grundlagenforschung hier beitragen ?**
- **Denkbare Optionen bzw. notwendige
Randbedingungen/Maßnahmen?**
- **Schlussbemerkungen**

Was ist Fusion ?

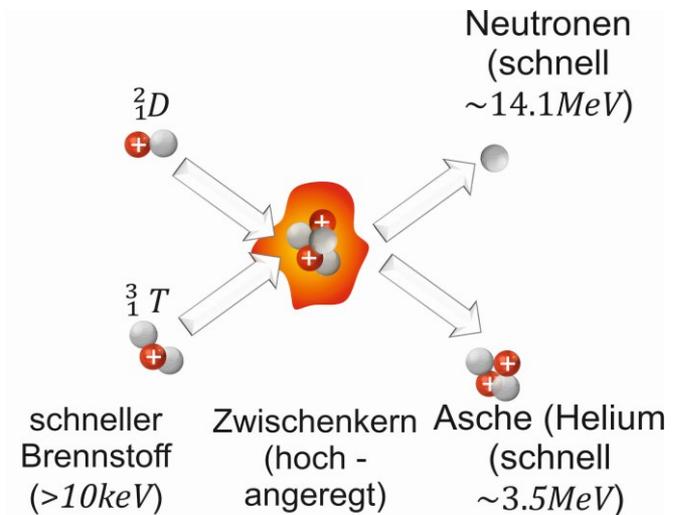
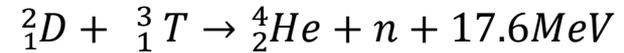
■ Fusion = **Kernreaktion** mit Freisetzung der Bindungsenergie

■ Kernspaltung



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

■ Kernfusion



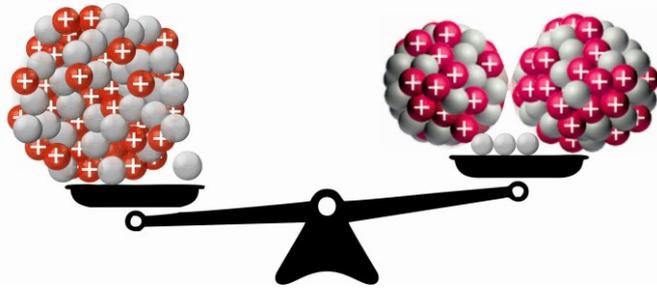
- schlechte Neutronenbilanz
- Asche neutral (Neutron ggf. zum Brennstoffbrüten-Aktivierung)
- hohe Aktivierungsenergie (effizientes Zünden bzw. Heizen)

Was ist Fusion ?

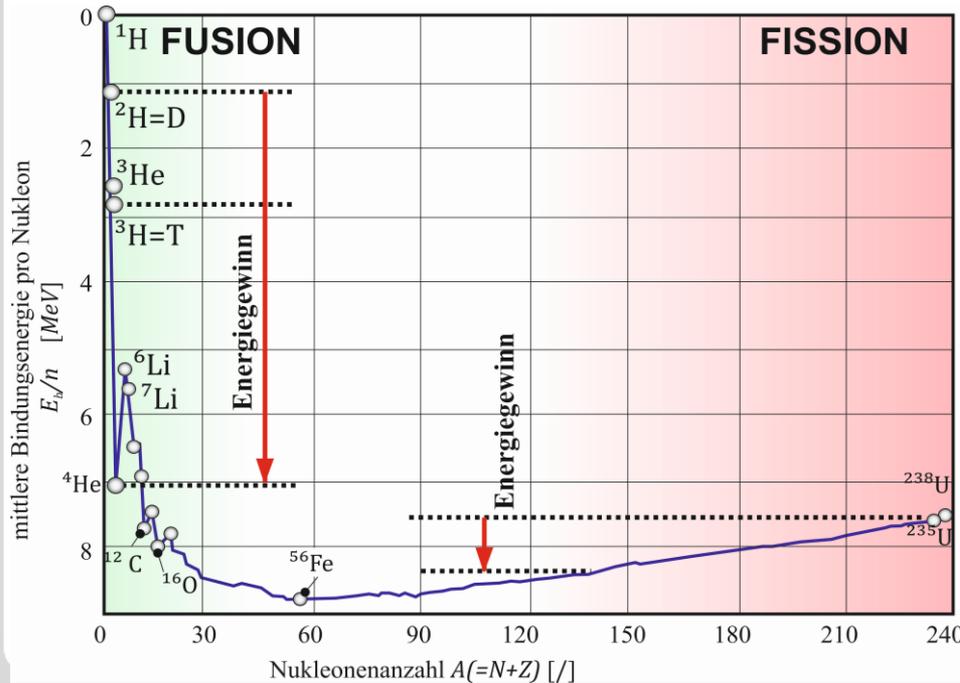
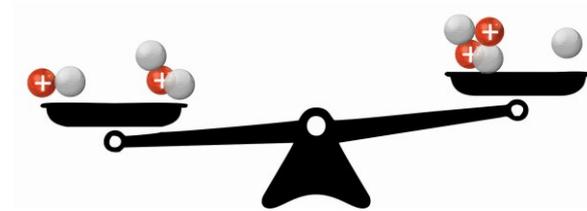
■ Woher kommt die Energie? **Massendefekt = Einsteinformel**

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

■ Kernspaltung



■ Kernfusion



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

■ Größenvergleich -andere Träger?

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

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

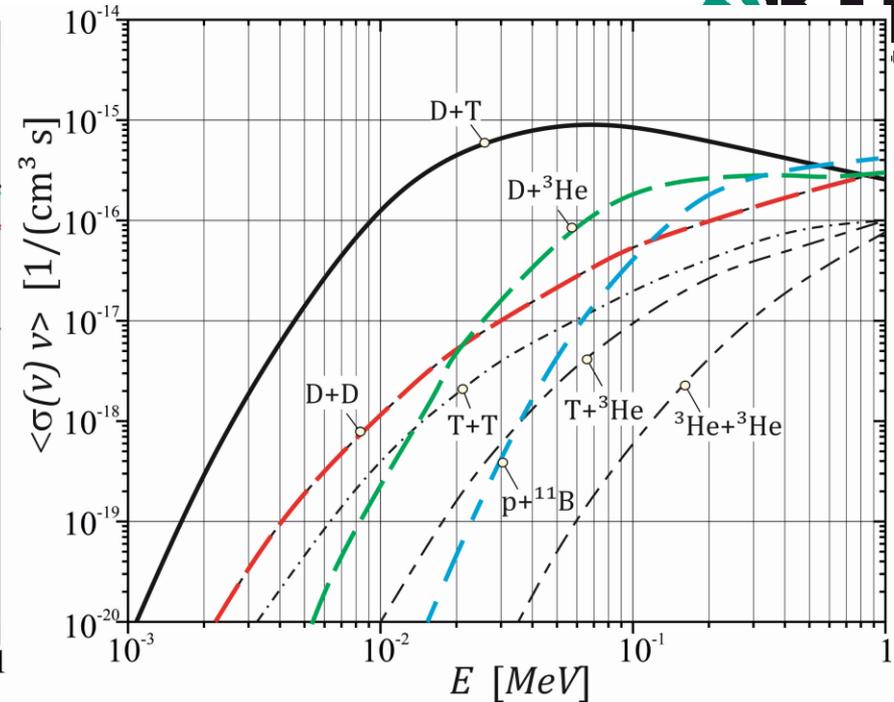
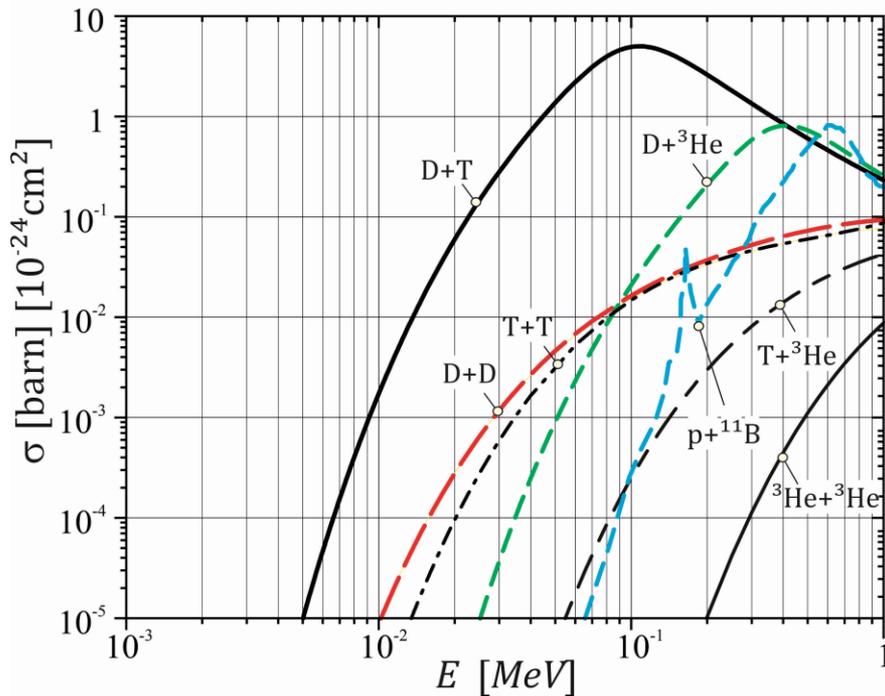
$$E_{\text{solar}} \approx 1 \text{ eV}$$

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

➔ hohe Leistungsdichte,

➔ wenig Brennstoff

Was ist Fusion ? – Brennstoffe



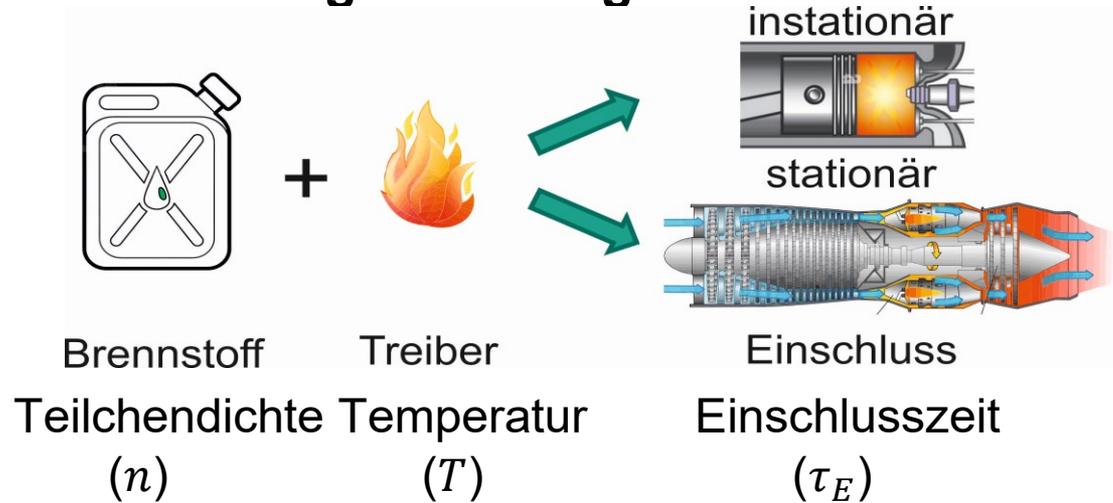
- Fusion nur im Plasmazustand* möglich ($> 10keV \approx 100Mio\ Kelvin$)
- $D - T$ mit höchster Reaktionsrate bei gleichzeitig kleinster Temperatur
- alle aneutronischen Brennstoffe (${}^3He, {}^{11}_5B$) erfordern deutlich höhere Temperaturen und haben kleinere Reaktionsraten
- ➔ aber **Tritium** muss **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 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

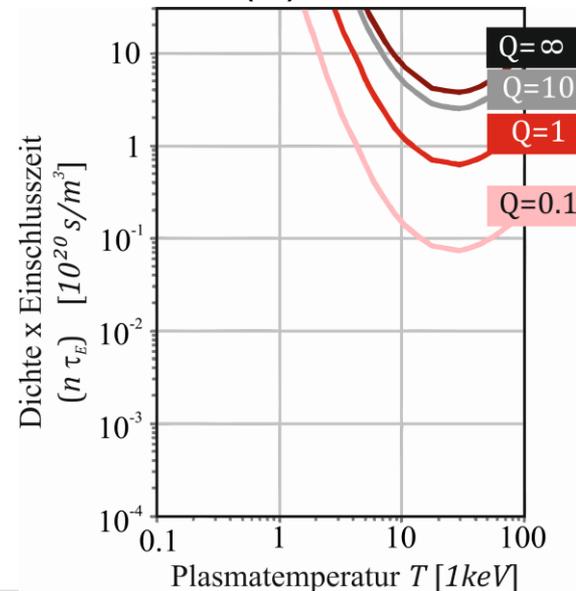


- Fusion (Plasma):

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

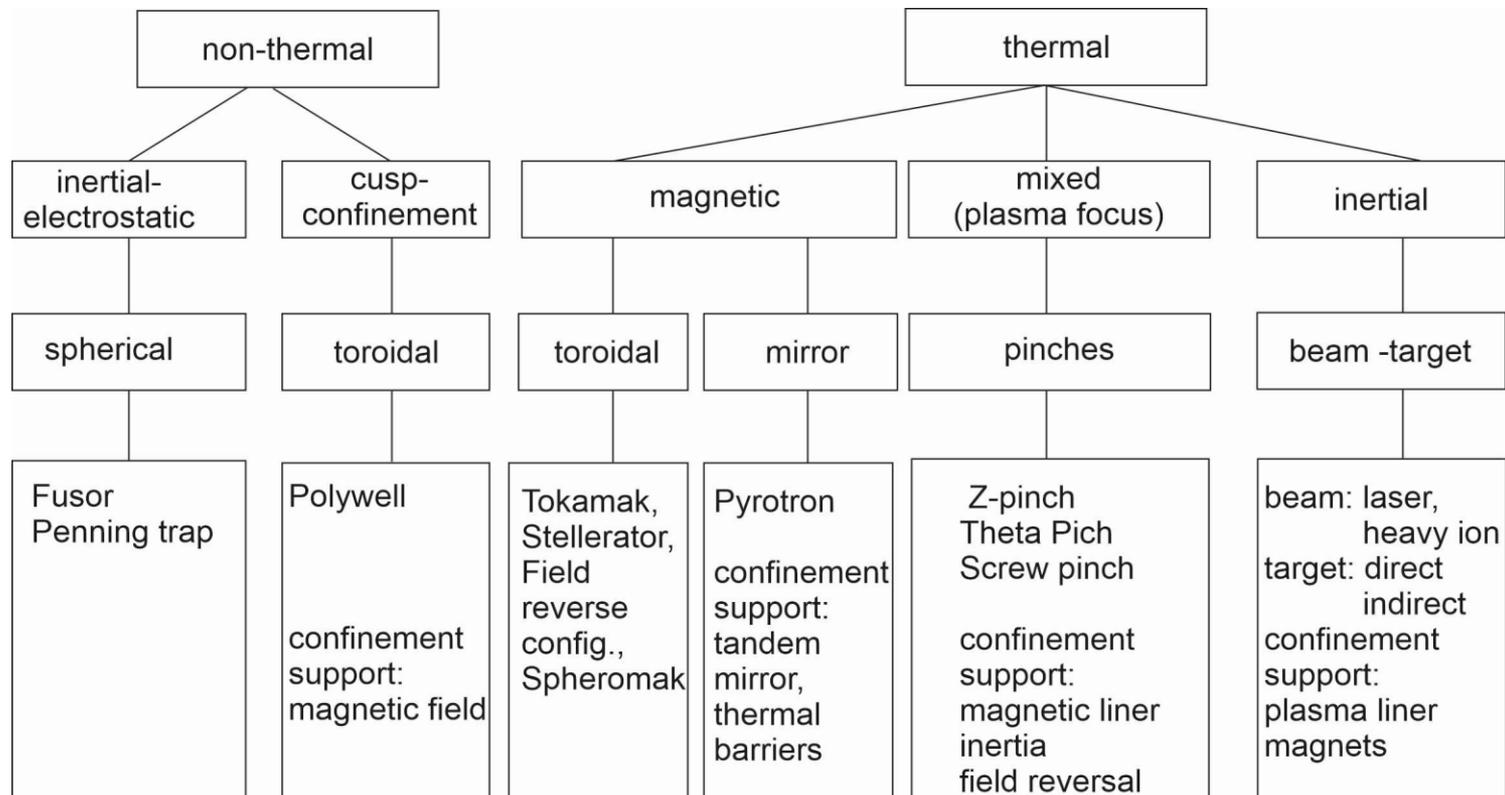
$$Q = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aufgewendete Heizleistung}} > 1$$

- Suchgröße =
Einschlusskonfiguration

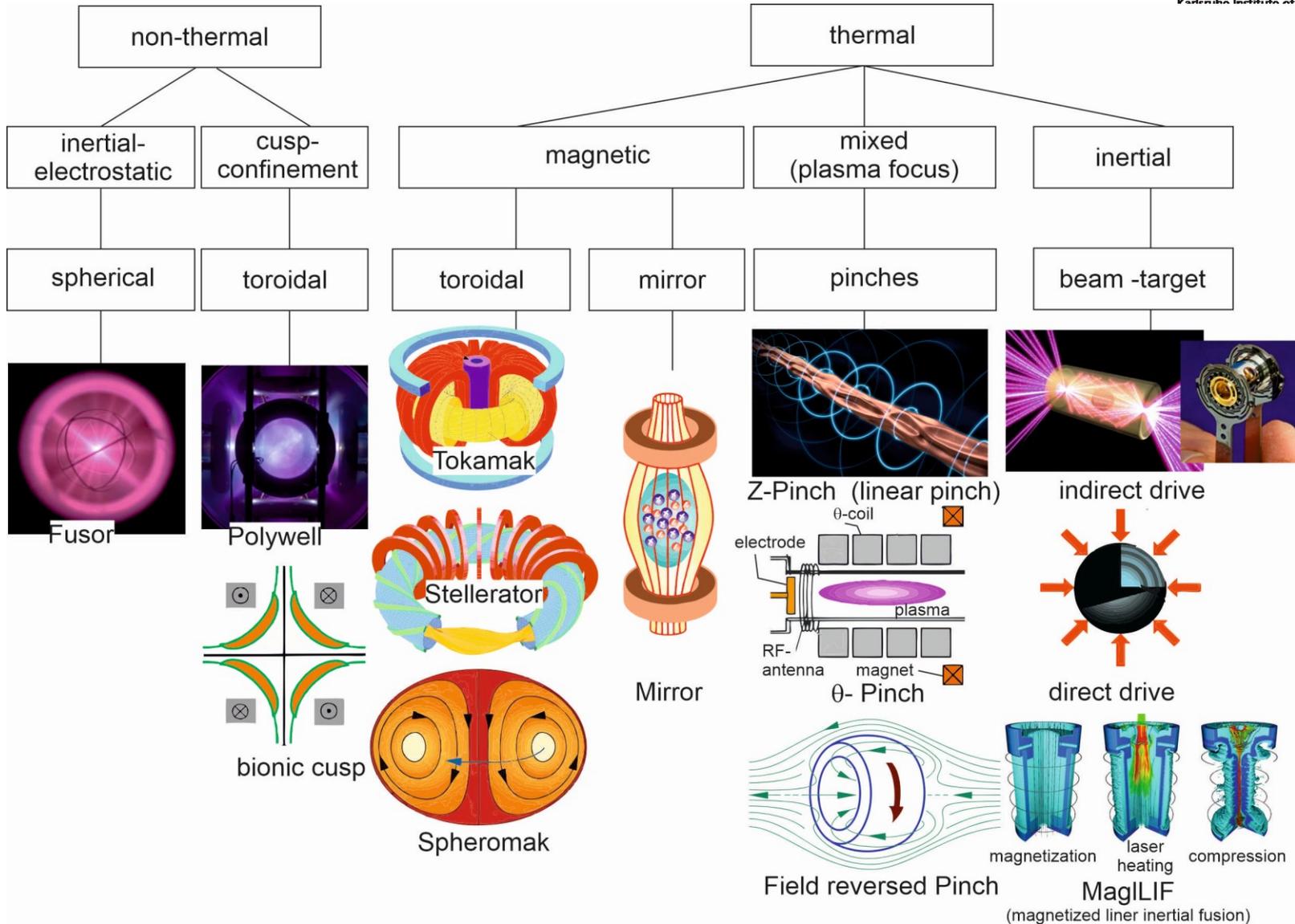


Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation

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

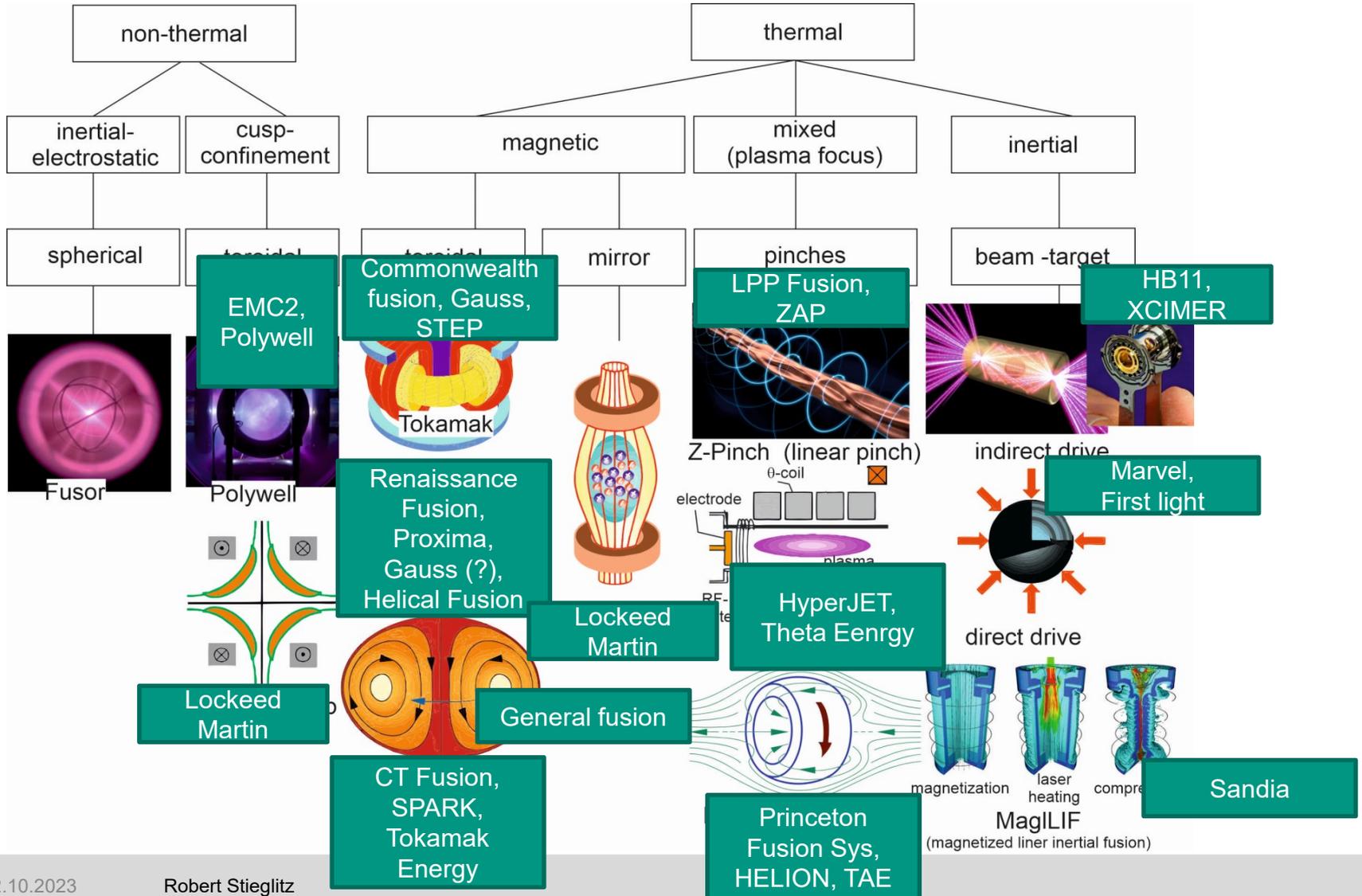


Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation



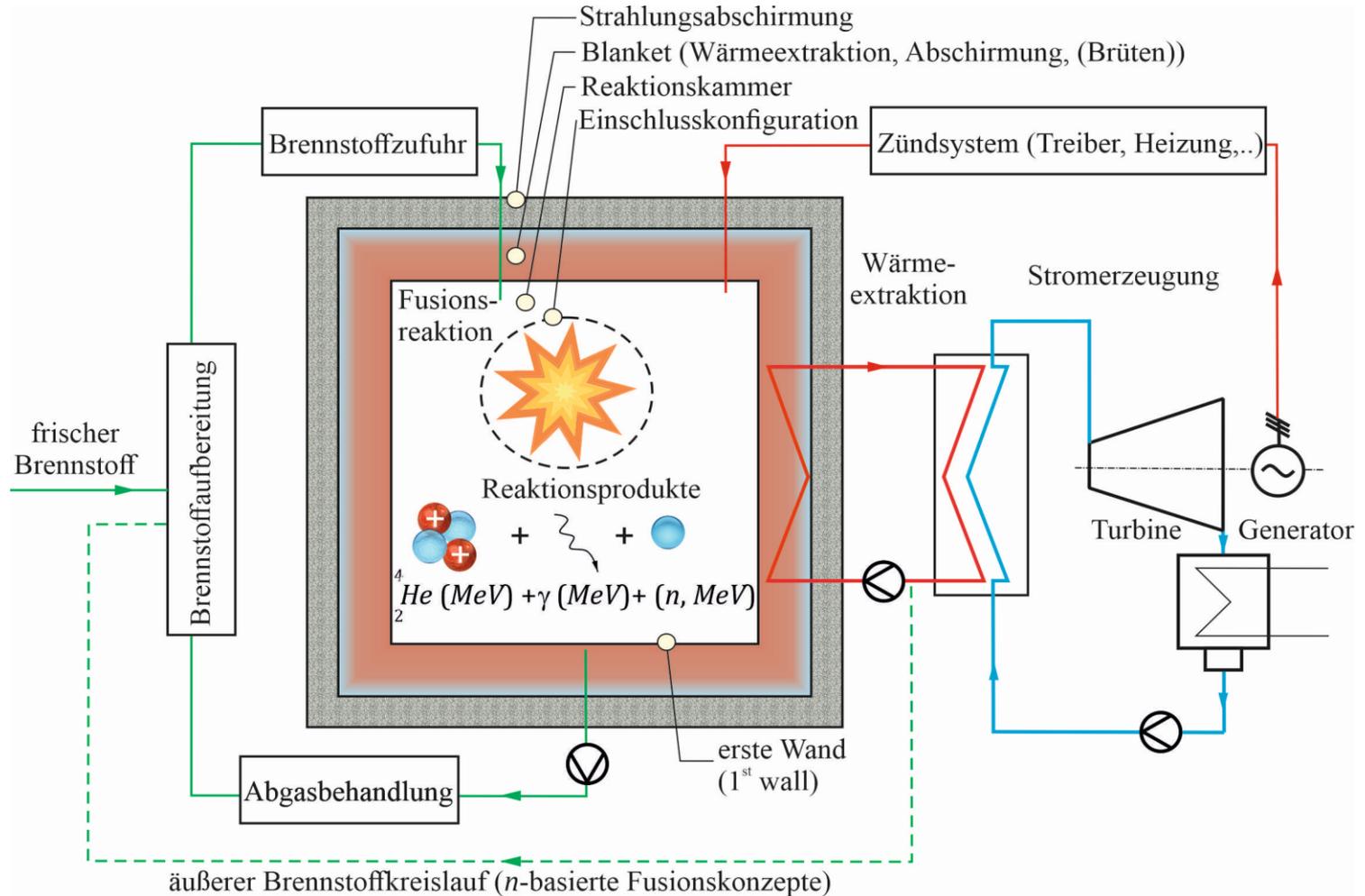
Fusionsherausforderung? Einschluss-Isolation

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



Einschluss bedeutet kein Fusionskraftwerk

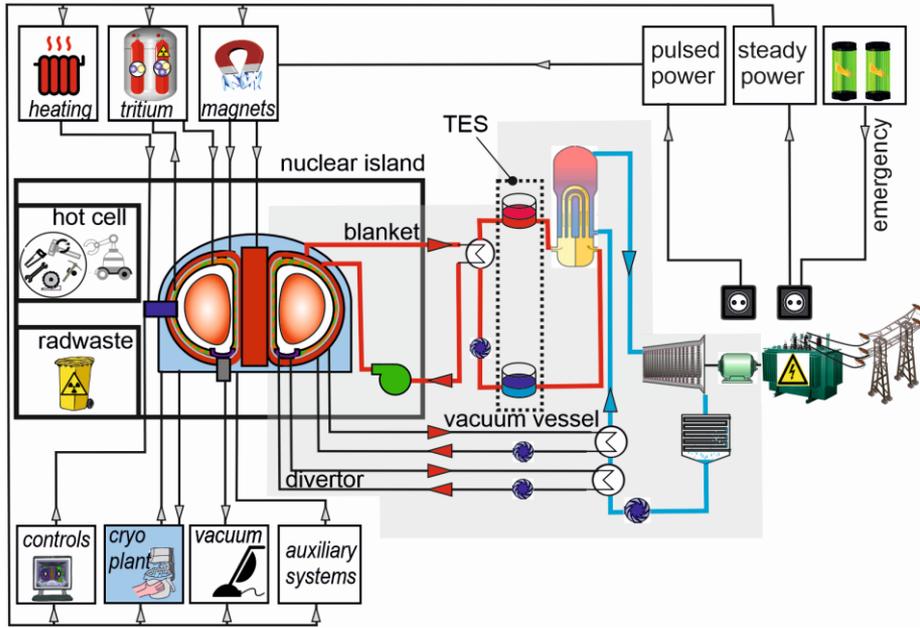
- **Einschluss + Zündung \neq Kraftwerk**(*Fusion gibt es schon mehrfach, experimentell auch nachgewiesen)



Einschluss bedeutet kein Fusionskraftwerk

- MCF und ICF Fusionskraftwerke unterscheiden sich substantziell

■ MCF- Kraftwerk



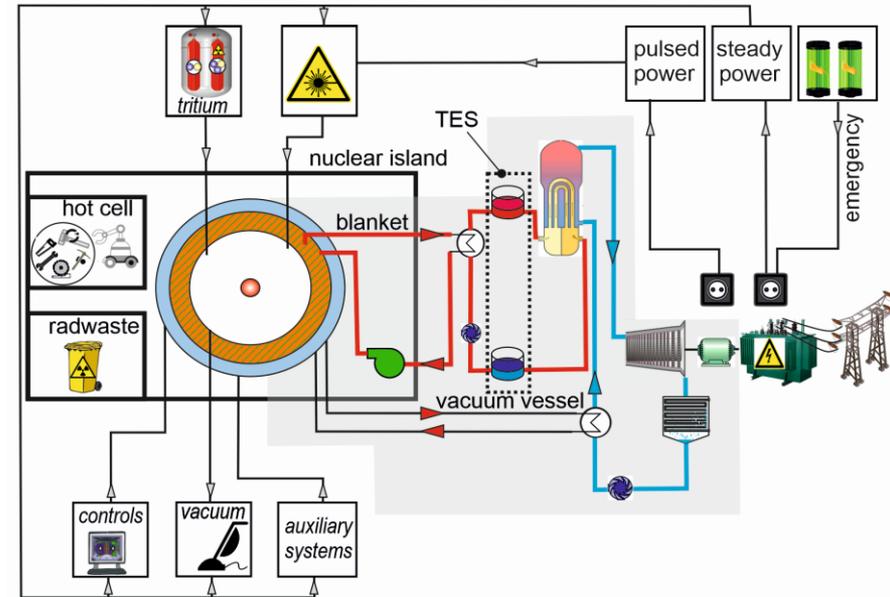
- viele komplexe Systeme
- komplizierte Logistik
- zahlreiche Schnittstellen
- Verifikation vieler Systeme vorhanden

Synergien MCF-ICF:

- ähnliche Systeme
- Leistungskonversion
- nukleare Sicherheit



■ ICF- Kraftwerk



- 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.

Einschluss bedeutet kein Fusionskraftwerk

■ 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

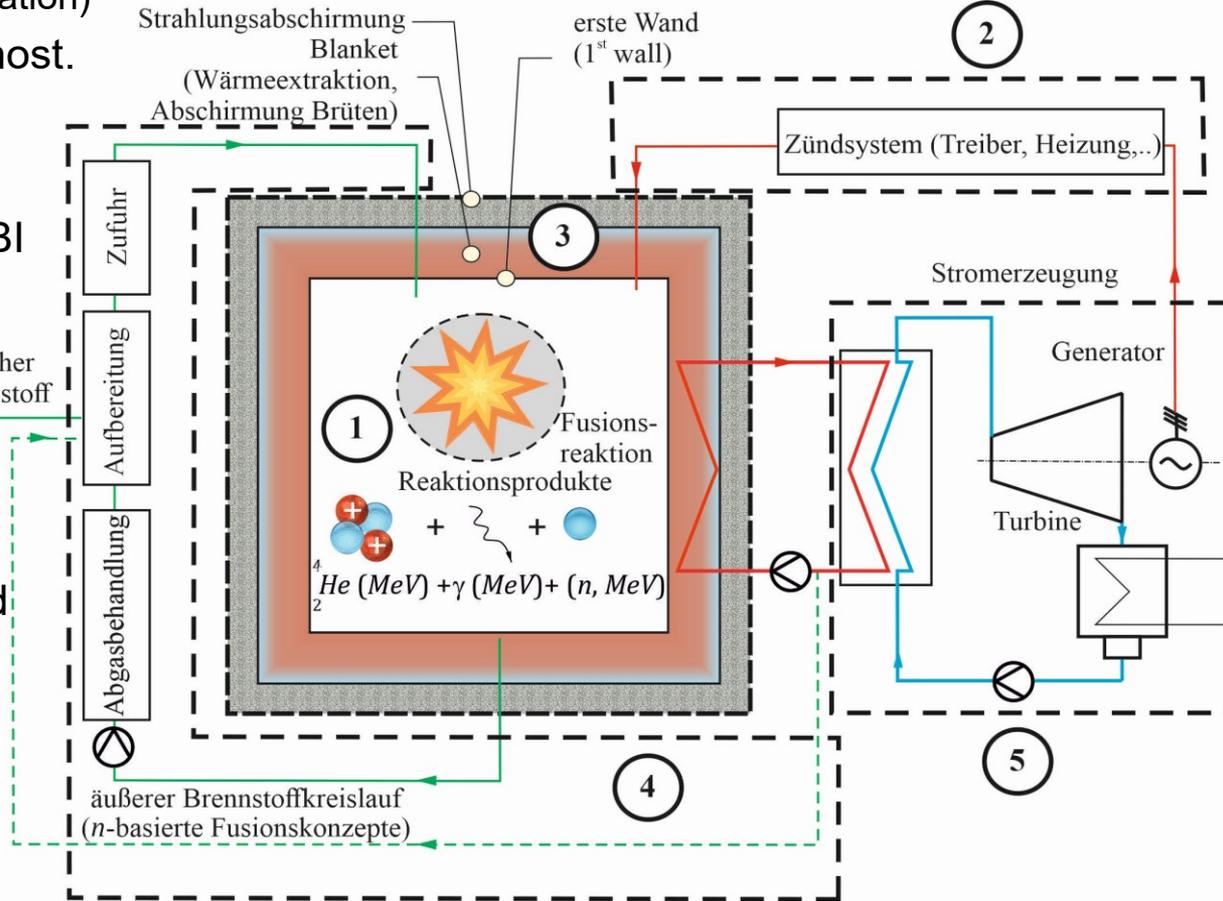
③ **In-Vesselkomponenten**

- MCF: Blanket, Divertor; Limiter
 - ICF : Blanket
- Instrumentierung, Struktur- und Funktionsmaterialien

④ **Brennstoffkreislauf**

Vakuumsysteme, Abgas-aufbereitung, Brennstoffinjektion

⑤ **Wärmeabfuhrsystem**



kritischer Konzeptpfad

„geschlossenes Kraftwerkskonzept“

- Bereitstellung eines auf Grundlagenprinzipien beruhenden ganzheitlichen Kraftwerkskonzeptes
- ➔ Ermöglichung einer Risikobewertung des Gesamtkonzeptes.
- ➔ Ermittlung zentraler für die Funktionalität/Sicherheit des Konzeptes relevanter Systeme (Anforderungen an Systeme, bauliche Gestaltung,..)
- ➔
- ➔ Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen für den Zuwendungsgeber
- ➔

Bemerkungen*

- in Magnetfusion z.T. vorhanden
- in Trägheitsfusion „bestenfalls“ in Ansätzen erkennbar

① Plasmaeinschluss (höhere Magnetfelder = besserer Einschluss)

■ Hochtemperatursupraleiter (HTS)

- geringere Kryoleistung
- Kompakte Bauweise



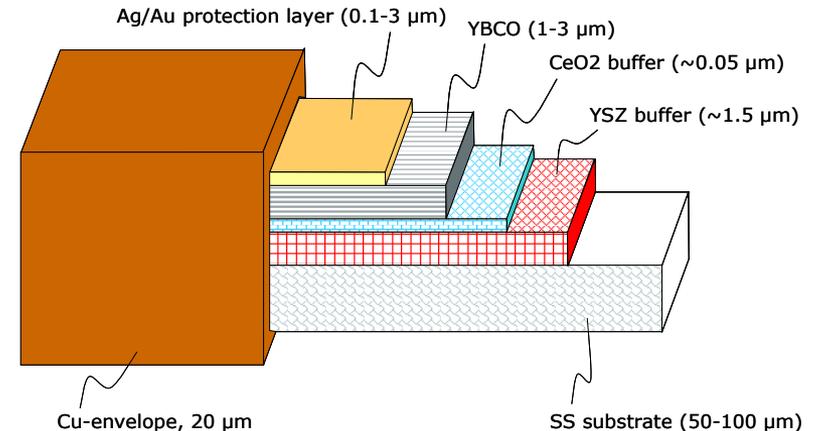
PLD600
Batch vacuum coating



ABAD vacuum coater



PLD600
substrate drum



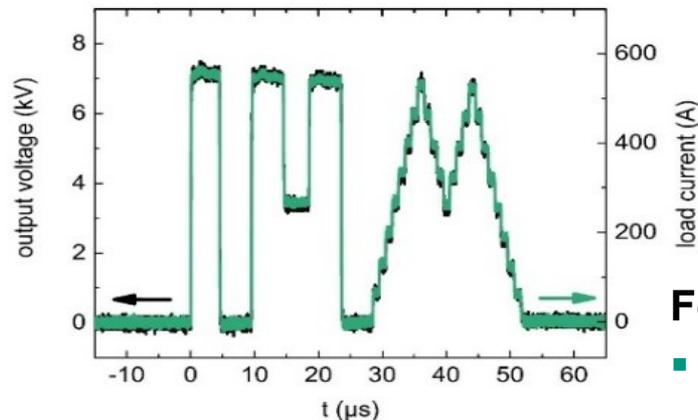
Forschungsbedarfe

- HTS-Drähte
- Supraleitende Permanentmagnete
- Magnetdesign, Kühlung und Stabilität für alle Temperaturen
- Kryogene Verfahren (Brennstoff ICF, MCF gefrorener Wasserstoff)
- AC- & Ramping-Optimierung
- Charakterisierung
- Hybridmagnete
- ➔ Near term Industriespinoff (KIT BRUKER HTS R&D)

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



Forschungsbedarfe

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

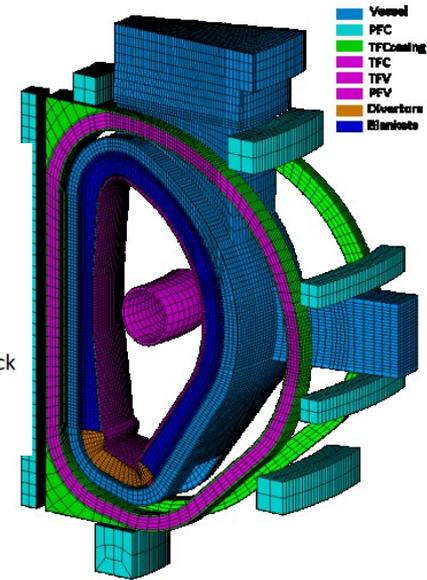
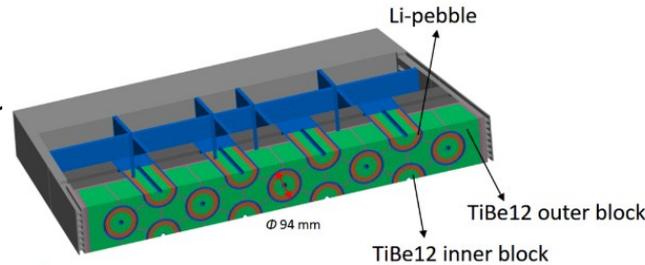
➔ **Medizintechnik, Beschleuniger, Kicker-Magnete, Energiewende**

Technologische Herausforderungen für das Kraftwerk*

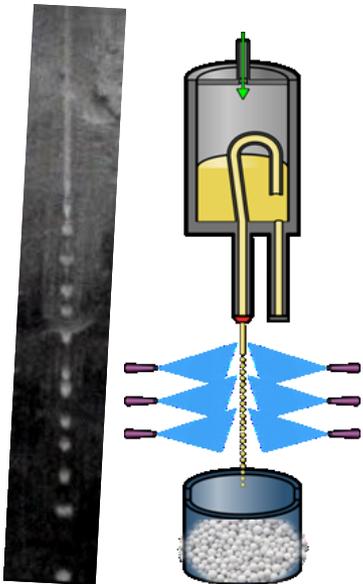
③ In-Vesselkomponenten

Blanket (Funktionen: Brüten, Wärmeabfuhr, Abschirmung)

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

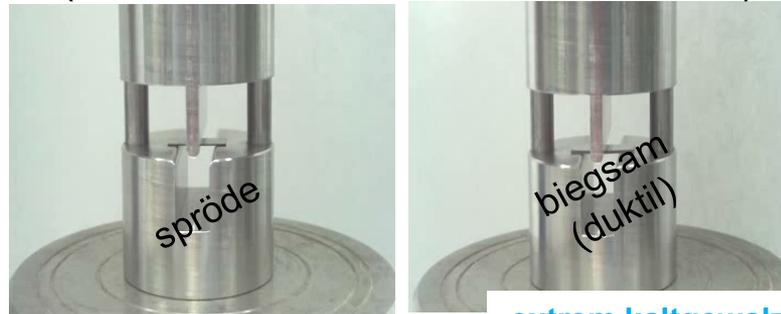


Funktionswerkstoffe (keram. Brüter)

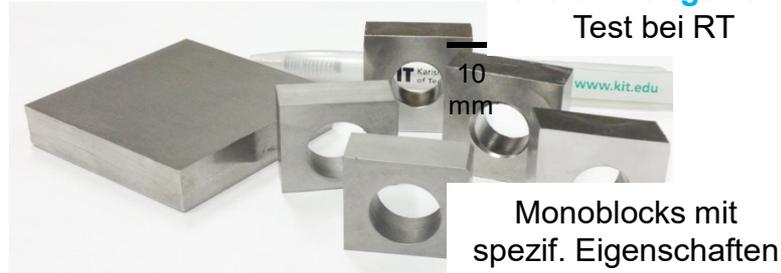


Struktur^{B-B}

(hier Wolfram -Plasmawandmaterial)



extrem kaltgewalzt
Test bei RT



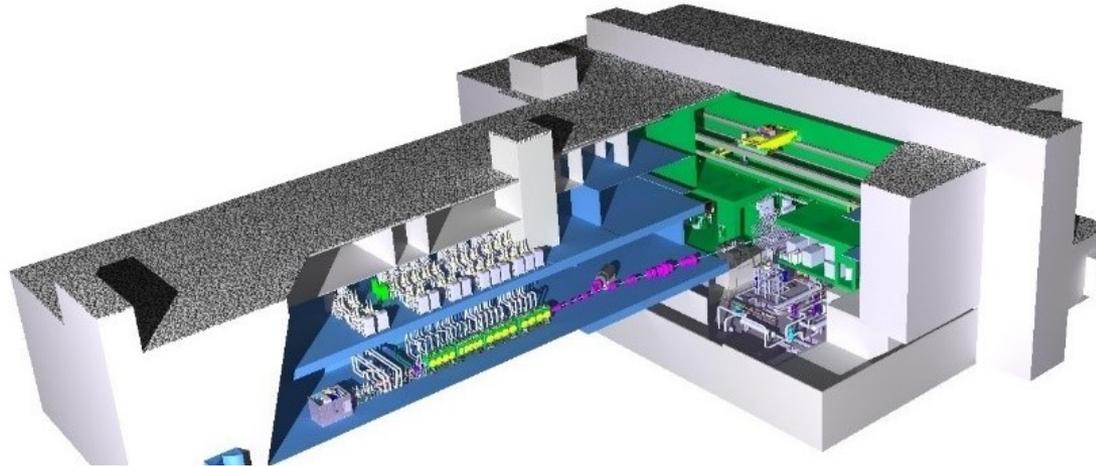
Forschungsbedarfe

- Multiphysik-Multiskalenverfahren
- Neutronenresistente, niedrigaktivierbare Struktur- und Funktionswerkstoffe
- Strahlenharte Diagnostik
- Fertigungstechnologien
- Robotergestützte Fernhandlungstechnologien
- THz Bildgebung/Tomographie

Technologische Herausforderungen für das Kraftwerk*

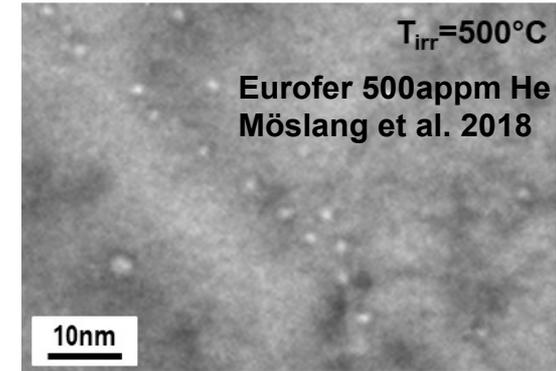
③ In-Vesselkomponenten/Diagnostik

- 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

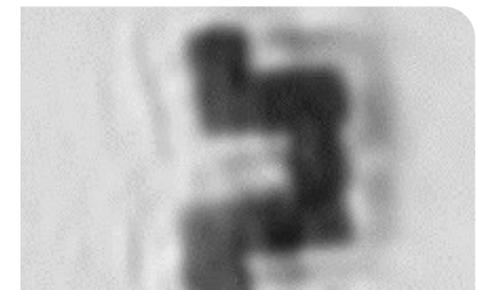


IFMIF-DONES @ Granada (<https://ifmif-dones.es/>)

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



Self-Powered-SiC-Detektoren

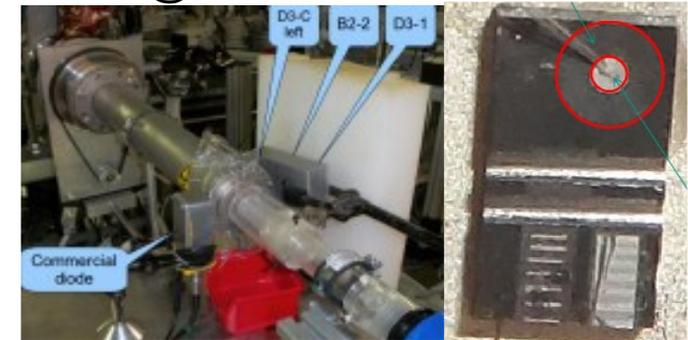


THz- Tomographie

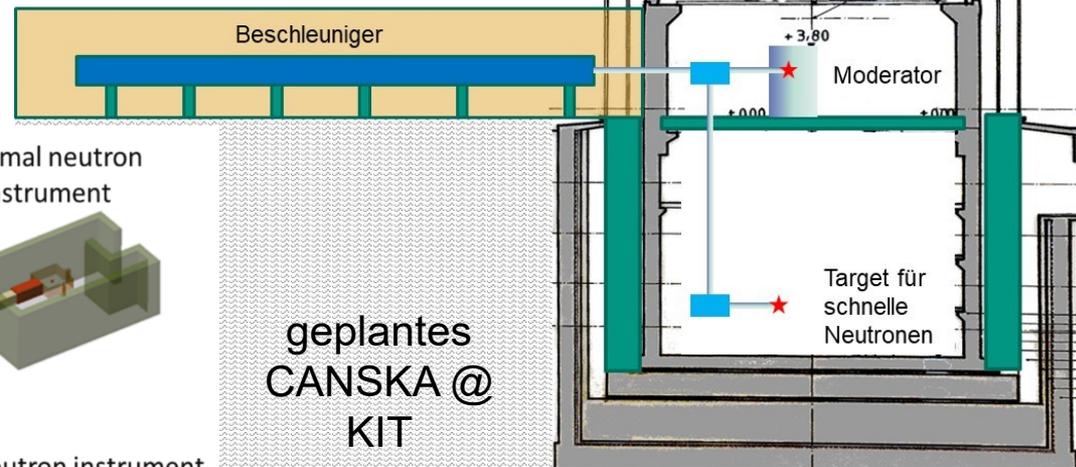
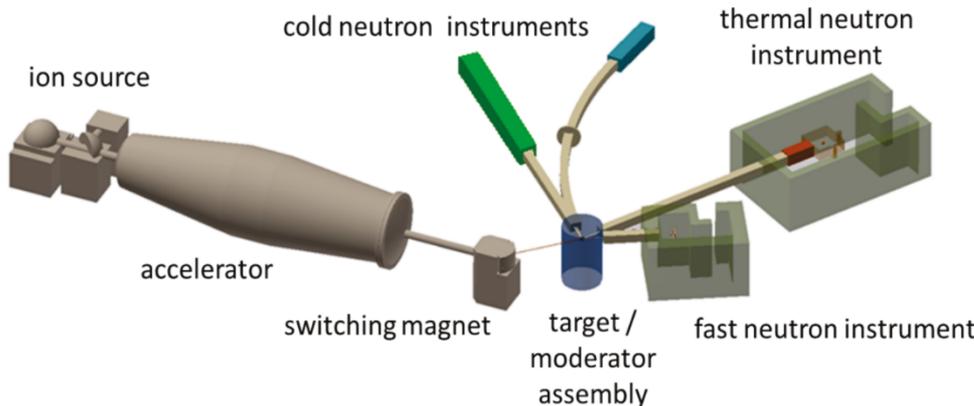
③ Neutronenquellen

- 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



kritischer Zeitpfad

„ fusionstypische Neutronenquelle zur Materialqualifizierung“

- Lizensierung 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.
- ➔ **Programm ErUM prädestiniert**

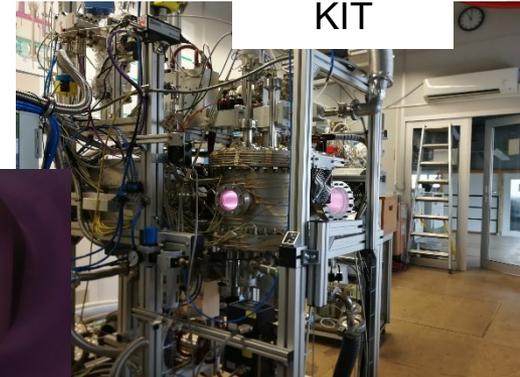
Bemerkungen*

- in Magnetfusion bisher nur Charakterisierung ohne Neutronen bzw. in Spaltreaktoren
- Transportrechnungen nur mäßig abgesichert, (Materialverhalten ?)

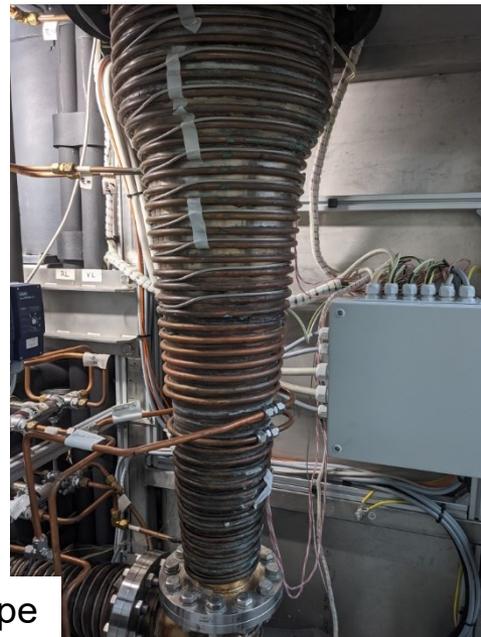
④ Brennstoffkreislauf Vakuumsysteme, Abgasaufbereitung, Brennstoffinjektion

- Verfahrenstechn. System vieler Einzelkomponenten
- Abgasaufbereitung, (),
- selektives Abtrennen von Brennstoff (Superpermeation)
- Isotopenrebalancing,
- Detritierung,
- Brennstoffinjektion in Reaktionskammer.

Hermes @
KIT



Isotope-Rebalancing



Hg- Diffusionspumpe

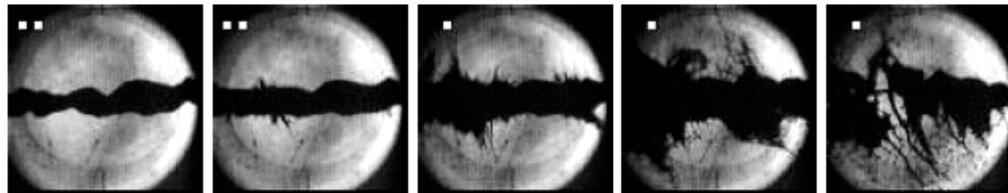
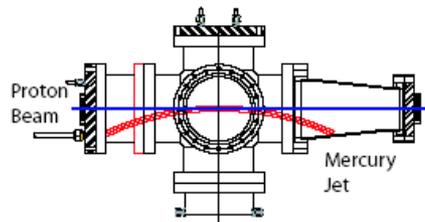
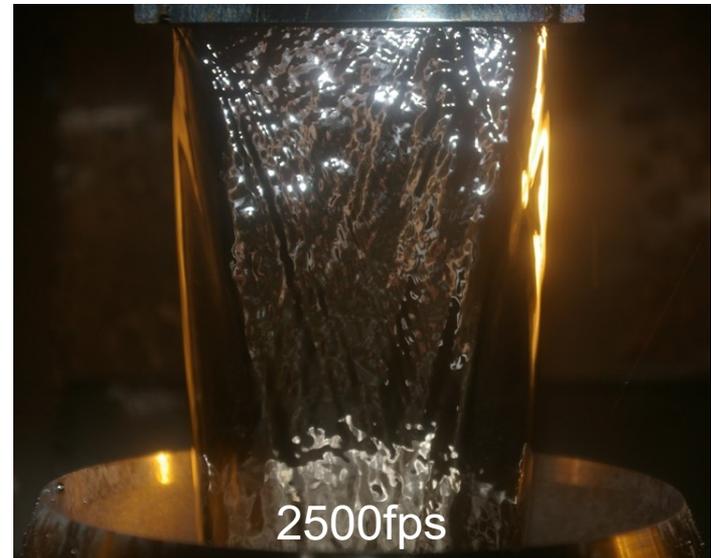
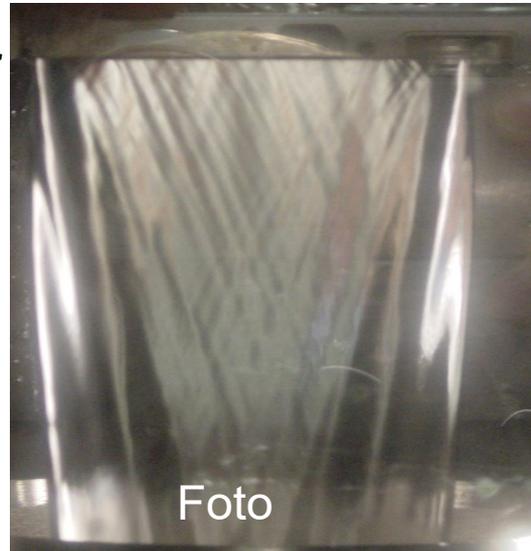
Forschungsbedarfe

- 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, ...)**

Technologische Herausforderungen für das Kraftwerk*

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

Natrium $u_0 = 5m/s$
@ KALLA



$\phi=1$ 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

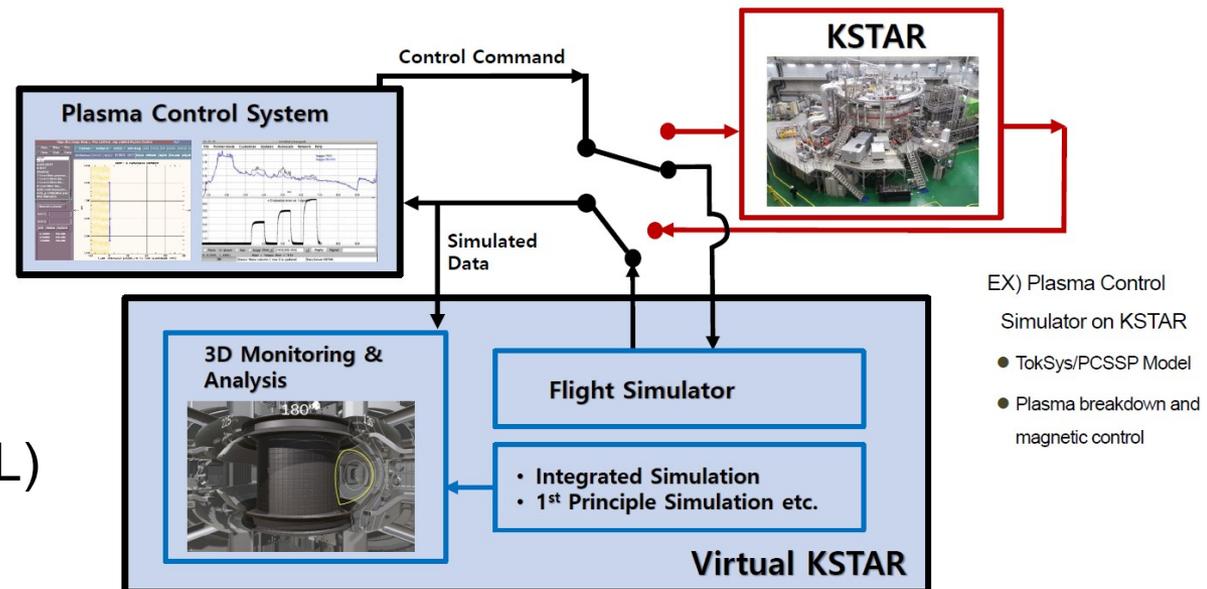
Technologische Herausforderungen für das Kraftwerk

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

- **keine fokussierte Fusionskraftwerksforschung zu ICF in Deutschland**
 - keine Abbildung von Physik und Technologie in Hochschulen,
 - (bisher) Absenz in einem nationalen Programm,
 - fehlende Forschungsförderinstrumente (-formate) ,
 - ➔ aber auch kein spezifischer Markt (Förderungen: Innovationsfonds, Projektfonds,)
 - ➔ Gamechanger (?): Fusions-Start-up Unternehmungen.
- **Grundlagenforschung in (ICF&MCF) erfolgt**
 - auf thematischen Forschungs-“Inseln“ (Plasma, Laser, Synergien mit Beschleunigerforschung, Regelungstechnik, Werkstoffe) an Hochschulen,
 - in F&E Einrichtungen in Spezialdisziplinen mit niedrigem Koordinierungsgrad (ohne nationale Fonds- DFG,).
- **koordinierte Projektforschung (mit Ziel eines Kraftwerks) nur auf europ. Ebene in MCF über Projektvorhaben:**
 - EUROFusion
 - ITER-IO /F4E
 - Nationale institutionelle Förderung (im wesentlichen HGF)
 - Kooperationsabkommen mit ausländischen Einrichtungen (USA, Japan, China, Frankreich)
- bislang Deutschland bei High-Tech Premium-Zulieferer (Hardware, know-How)
- Fusion vereinigt fast alle High-Tech-Technologien

Wie kann die Grundlagenforschung hier beitragen?

Beobachtungen

■ **Universitäre Ausbildung**

- Reihe von qualifizierten Lehrstühlen vorhanden (Physik, Materialwissenschaften, Ingenieurwissenschaften) allerdings mit **geringer Fusionsaffinität**
- Zahlreiche vor allem nukleare Technologiesektoren nicht existent oder verschwunden (Neutronenphysik, bestrahlte Werkstoffe,)
- Lehrstühle für absehbar erforderliche **High-Techfelder mit Fusionsbezug kaum in Sicht** in SEPs*¹ (Steuerung komplexer Systeme, Digitale-Twins, Tailored materials (Supraleiter, comp. Material Science), HF-Halbleiter,)

■ **Universitäre Ressourcen**

- Lehrstuhlausstattung z.T. „**dürftig**“, Zugriffsmöglichkeit auf große Infrastrukturen limitiert
- kompetitive Ausschreibungen an Infrastrukturen möglich- aber nur im internationalen Wettbewerb, nur auf „User“-Nutzung bezogen (nur in wenigen Feldern: z.B. Plasma-Science)
- Technologie-upgrades an Großanlagen in Verantwortung von Projekten/User-Community
 - ➔ **kaum (kein) Spielraum für Mitwirkung im Technologiesektor**
- keine nationale Förderung in Fusion

■ **Forschungseinrichtungen**

- Fusion lediglich auf FB Energie in Helmholtz begrenzt (bisher).
- Erfolgsindikatoren auf internationale Projektbeteiligung fokussiert.
- Anreize zu Kooperation mit Grundlagenforschung national/international absent (Einzelinitiativen der Zentren und Institutsleitungen)
- Forschungsbudget für freie Forschung innerhalb eines Programms nicht vorgesehen*²

Denkbare Optionen bzw. notwendige Randbedingungen/Maßnahmen?

■ Hochschulen

- **Etablierung fusionsaffiner Lehrstühle** (singulär und mit Firmen/Forschungseinrichtungen)
 - ➔ Defizite hauptsächlich bei ICF (in Physik) **und** Technologie (über alle Bereiche)
- **öffentliche Projektförderungen** (analog Kompetenzerhalt in der Kerntechnik)
- **Verbundvorhaben** (z.T. bereits initiiert über BMBF bisher mit Fokus Industrie)
- Einrichtung DFG(-Fachkollegie(n)) (➔ zur Etablierung breiterer wissenschaftl. Basis)

■ Forschungseinrichtungen

- für einzelne Technologien Infrastrukturen existent (**gezielte Erweiterung erforderlich**-Stelleratoren, Laser + fortschrittliche Technologiesektoren (Ingenieure, Chemie, Informatik)).
- Entwicklung von **Förderformaten für verzahnte Forschung** (Hochschule, Forschungseinrichtungen (+Industrie)).
- **Erleichterung des Transfers** (Ressourcen) über Forschungsbereichsgrenzen.
- **Kooperationsmodelle** (mit Hochschulen und Industrie).

■ Randbedingungen/Maßnahmen (zur Umsetzung)

- Einrichtung einer Organisationsstruktur mit Eckdaten (bei ICF aktuell absent, bei MCF rudimentär über EUROfusion gegeben) – **Projektträger ?**
 - ➔ **Gefahr: Vieles wird als Fusion verkauft was keine ist !!!**
- in Fördervorhaben **klare Definition von Zielen** (analog zu DFG oder USDOE).
- frühzeitige **Etablierung eines Wissens- und Know-how Transferkonzeptes**.
Ausgestaltungsoptionen: Programm in Helmholtz/Fraunhofer ?,
 - ➔ Ziel: Aufzeigen von Leitplanken bei Programmsteuerung, Verzahnung ICF /MCF, Etablierung kompetitiver deutscher Fusionscommunity (Ökosystem)
 - ➔ Sicherung des Industrieinteresses (-beteiligung), Rückfluss in Hochschule/Gesellschaft

Schlussbemerkungen

- bewusst kein Kommentar zu (Lasern und Targets)+ Fusion*

Schlüsselnachrichten – Fusion benötigt ein kompetitives Ökosystem (3 Säulen)

- **Stärkung der Hochschulen** mit Fusion als Studien- und Forschungsthema (Physik, Ingenieurwissenschaften, Informatik) unverzichtbar
- **Institutionelle technologieoffene aber zielgerichtete Forschung** mit mehreren Elementen nötig
 - **Programm** mit klarem Zielfokus (Planung Meilensteine, Spin-off- Know-howTransfer),
 - **Mitwirkungsoption öffentlicher und privater Forschungsteilnehmer** (ohne Assoziationsbindung) ➔ **gezielte, differenzierte Förderformate**
 - **gezielte Grundlagenförderung** (Heranführung junger Wissenschaftler, Mitwirkung von Hochschulen, Industriepartnerschaften).
 - **regelmäßiges Monitoring.**

mit Bewusstsein für ➔ „kritische Gesamtkonzeptpfade“ (Kraftwerk)

➔ „kritische Zeitpfade“ (Material bei Fusionsbeding. IFMIF, n -Quelle)

- **Technologieinnovationsprogramm** für spezif. mittel- und großskalige Infrastrukturen mit
 - **internationaler Kooperation(-en)*¹**
 - **Leuchtturm-Projekte** (Ausschreibung mit Angaben: Verwertungspläne, Laufzeiten, Betriebskosten, Risikoabschätzung mit Einbeziehung Privatwirtschaft),
 - **Risikoforschungspool** mit kurzzeitigen Forschungsvorhaben (max. 3 Jahre); Industrie mit Hochschulen.

➔ **Fusion einzigartige Option einer künftigen Energieversorgung.**

➔ **Selbst wenn BRD kein Fusionskraftwerk baut, beinhaltet es alle High-Tech-Technologien der Zukunft .**

* (<https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.html>)

*¹ enthebt nicht der Formulierung eines deutschen Fusionsprogramms

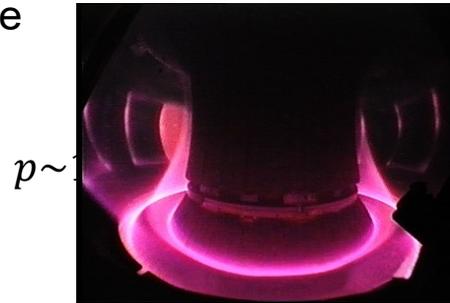
ZUSATZFOLIEN

Herausforderung Magnetfusion (MCF)

■ Brennendes Magneteinschlussplasma vs. Verbrennung?

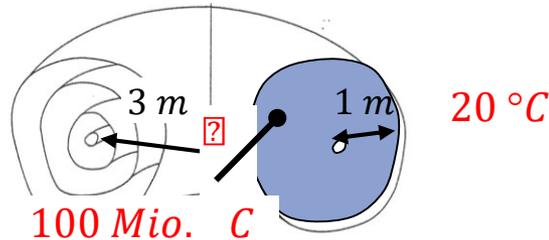
Magnetfusion

- 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

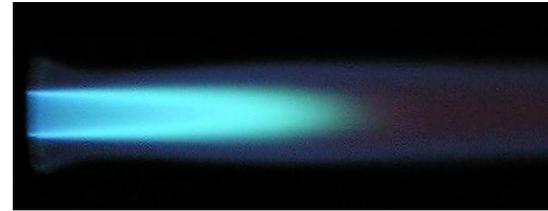
1m Magnetfeld
120m² Oberfläche
(JET torus)
➔ 20 MW



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

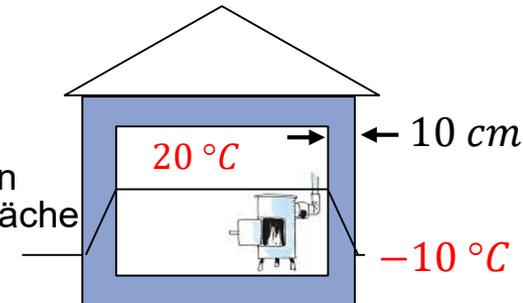
Thermische Verbrennung

- 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

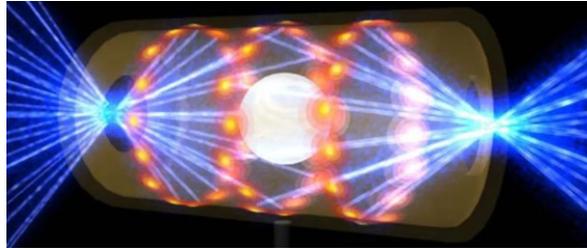
- ➔ stationäres Plasmagleichgewicht bei hinreichendem Leistungsniveau
- ➔ guter Einschluss = hohe thermische Isolation

Herausforderung Trägheitsfusion (ICF)

■ brennendes Trägheitsplasma vs. instationäre Verbrennung?

Trägheitsfusion

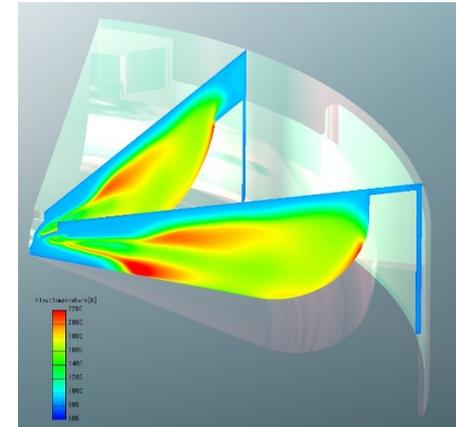
- Einschluss bei extremen Temperaturen ($10keV$)
- Zündenergie $> 1MJ$ (Laser)
- Einschluss der He -Ionen ($3.5 MeV$)
- gewaltige Teilchendichte
 $n > 10^{28}m^{-3}$
- riesiger Druck



- 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)