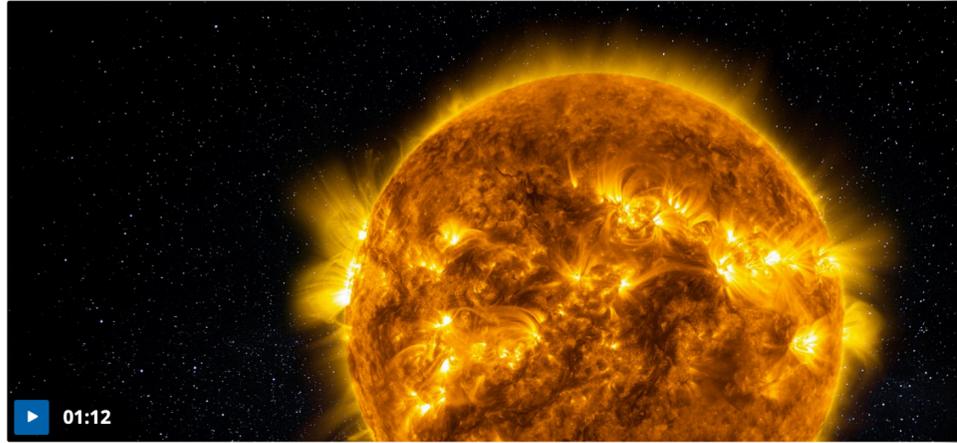


KERNFUSION

Maxim Mai

Universität Bern — The George Washington University

Outreach — 06.08.2024 — Rotaract Club Bonn



01:12

KERNFUSION
Dresden, Rostock und der Mittelpunkt der Erde:
Eine neue Fusion soll die Energie der Sonne
freisetzen



KERNFUSION

Wie lässt sich eine Sonne auf der Erde bauen?

Von Stephan Finsterbusch

15.05.2024, 14:35 Lesezeit: 4 Min.

Nuclear fusion breakthrough – what is it and how does it work?

Share

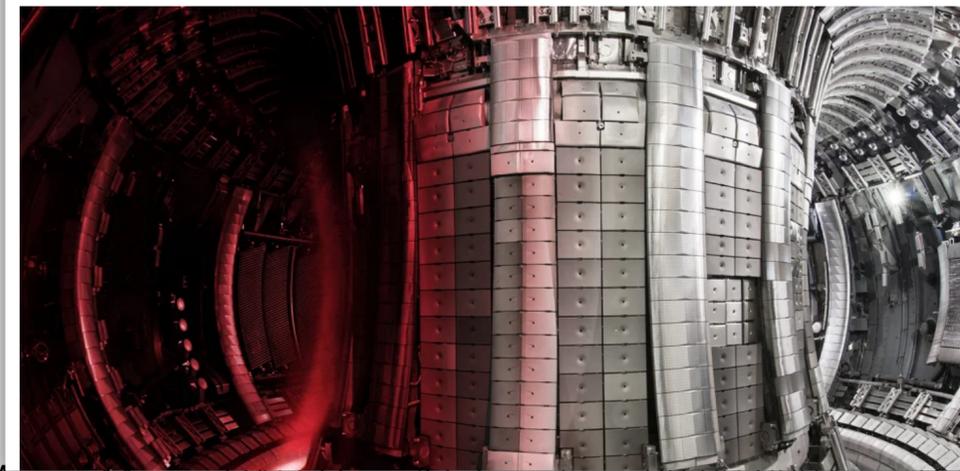


World / Climate

Scientists just set a nuclear fusion record in a step toward unleashing the limitless, clean energy source

By Angela Dewan, CNN

3 minute read · Updated 6:03 PM EST, Thu February 8, 2024



WISSENSCHAFT ENERGIEGEWINNUNG

Forscher knacken Weltrekord – Größte Energiemenge, die je in Fusionsexperiment erreicht wurde

Veröffentlicht am 13.02.2024 | Lesedauer: 4 Minuten

Von Simone Humml



KERNFUSION

I. Grundidee (Wie?)

Quantenphysik, Kernreaktionen, ...

II. Motivation (Warum?)

Energiedichte, Klimawandel, Sicherheit, ...

III. Umsetzung und Hindernisse (Wann?)

Plasmastabilität, Treibstoffverfügbarkeit, ITER, ...

IV. Zusammenfassung



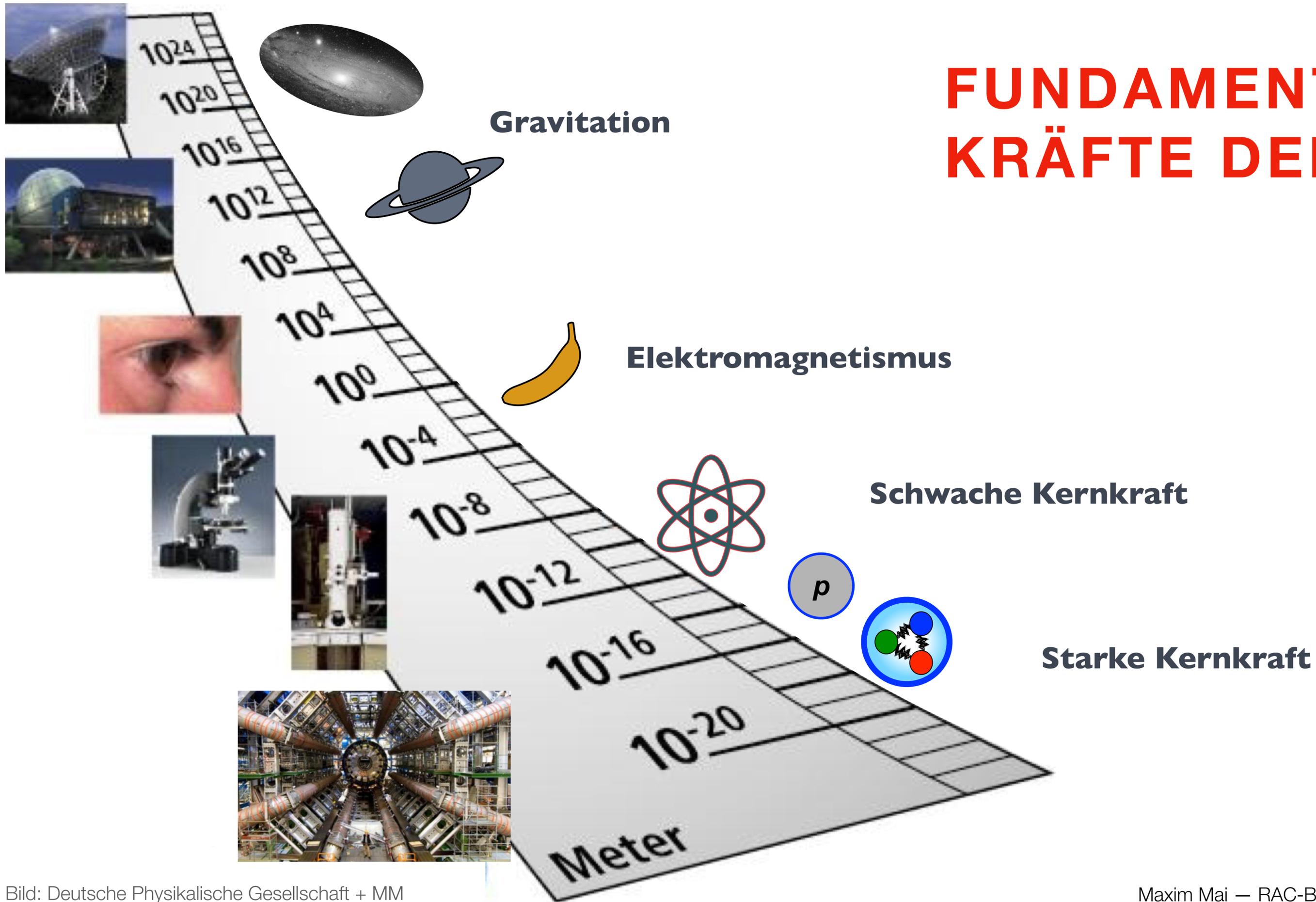
KERNFUSION

Grundidee (Wie?)

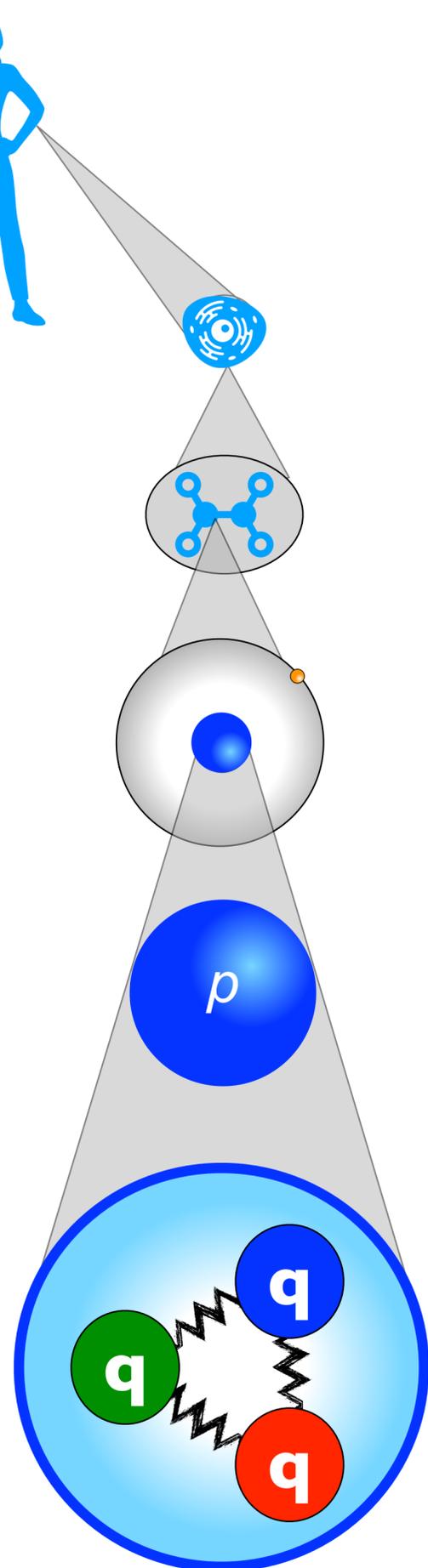
Quantenphysik, Kernreaktionen, ...



FUNDAMENTALE KRÄFTE DER NATUR



BAUSTEINE DER MATERIE



Zelle

Molekül

Atom

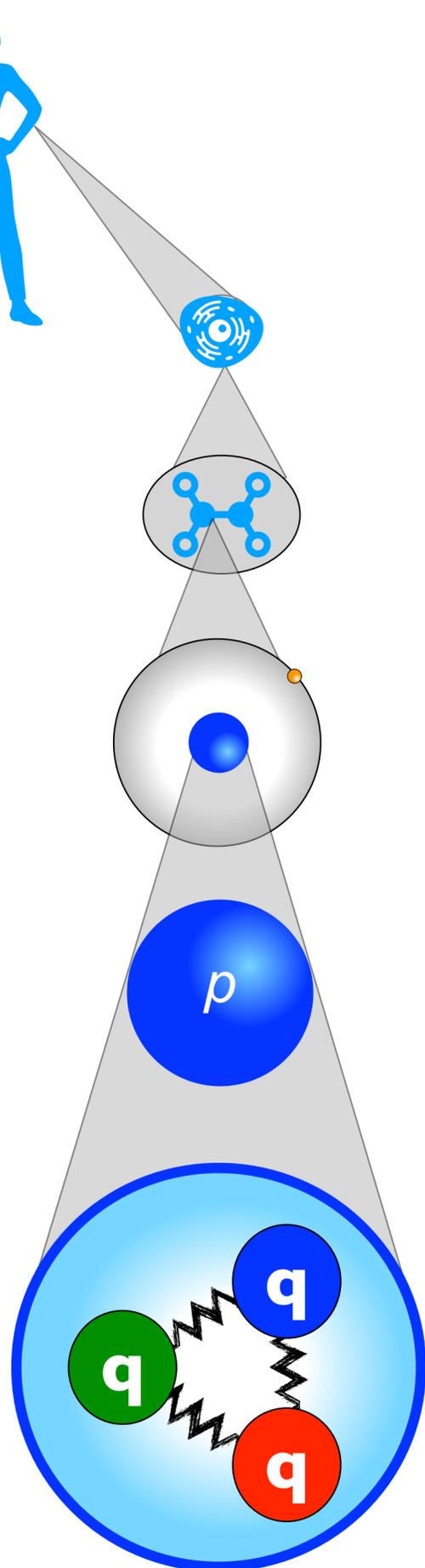
- Gebundenes System aus Proton und Elektron
- Elektromagnetismus
- Bindungsenergie $\approx 10 \text{ eV}$

Proton/Neutron

- Gebundenes System aus Quarks & Gluonen
- Starke Wechselwirkung
- Bindungsenergie: $\sim \text{MeV}$
 $1000\,000 \times$ Elektromagnetismus

EXPERIMENTE

Kleinere Teilchen brauchen größere
“Mikroskope”



Zelle 1665

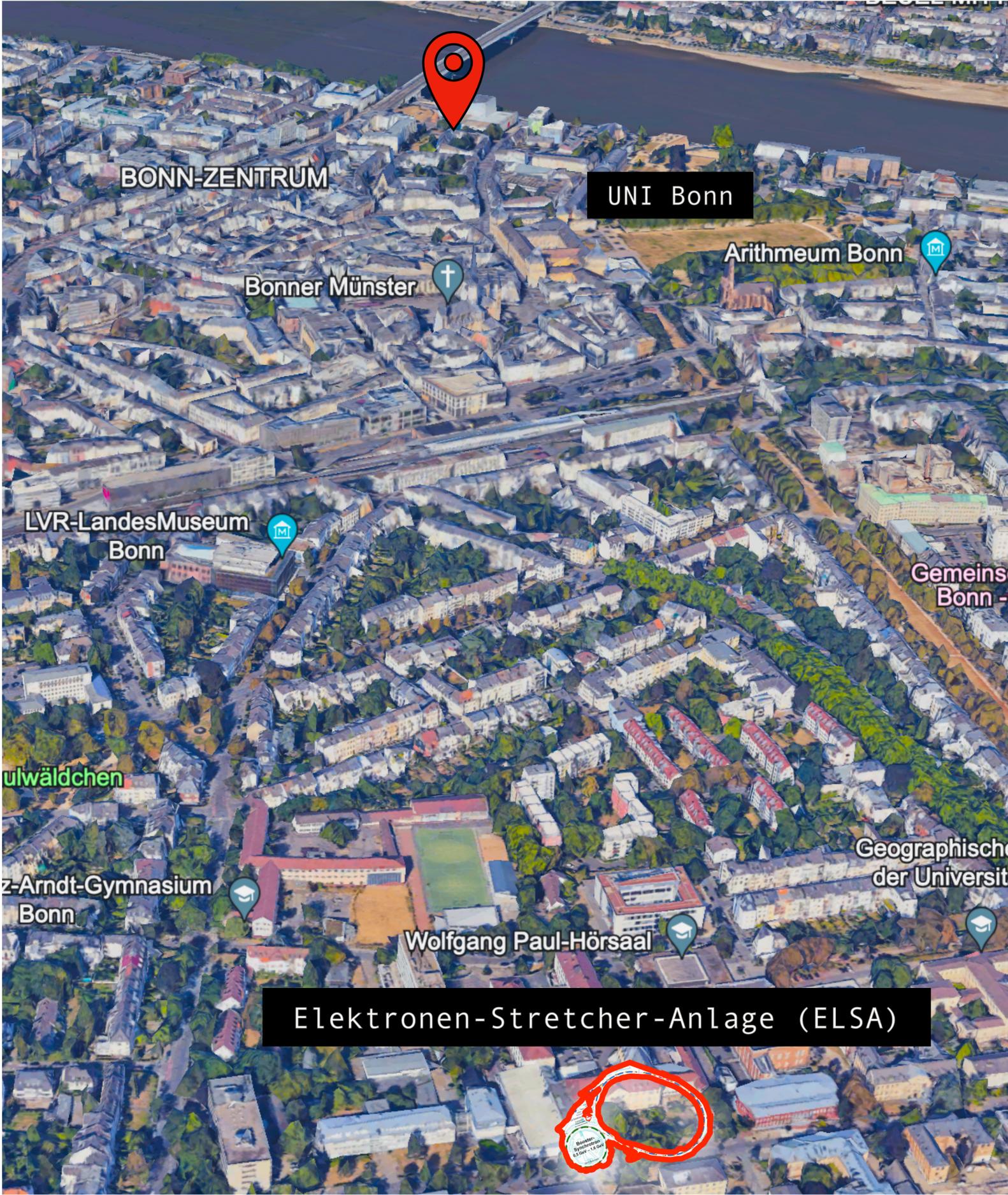
Molekül 1811

Atom 1897

- Gebundenes System aus Proton und Elektron
- Elektromagnetismus
- Bindungsenergie $\approx 10 \text{ eV}$

Proton/Neutron 1911

- Gebundenes System aus Quarks & Gluonen 1968
- Starke Wechselwirkung
- Bindungsenergie: $\sim \text{MeV}$
 $1000\,000 \times$ Elektromagnetismus



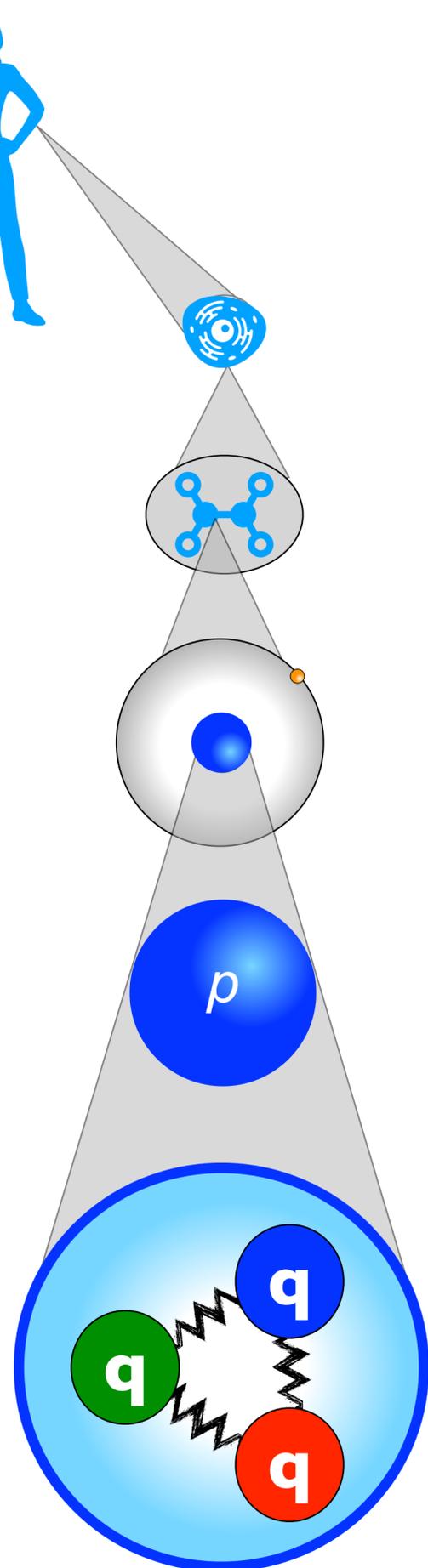
EXPERIMENTE

Kleinere Teilchen brauchen größere
“Mikroskope”

Moderne Beschleuniger:

SLAC, CERN, ..., ELSA(Bonn)

THEORETISCHE GRUNDPRINZIPIEN



Zelle

Molekül

Atom

- Gebundenes System aus Proton und Elektron
- Elektromagnetismus
- Bindungsenergie $\approx 10 \text{ eV}$

Proton/Neutron

- Gebundenes System aus Quarks & Gluonen
- Starke Wechselwirkung
- Bindungsenergie: $\sim \text{MeV}$
 $1000\,000 \times$ Elektromagnetismus

Spezielle Relativitätstheorie

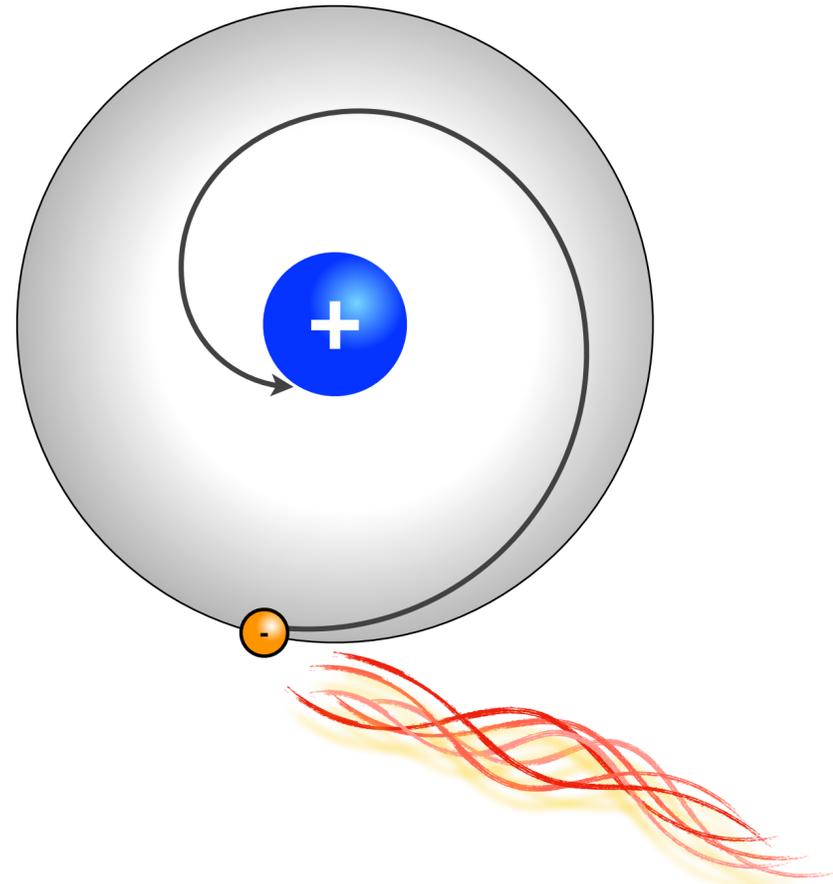
- Energie-Masse-Äquivalenz
- $E = mc^2$

Quantenmechanik

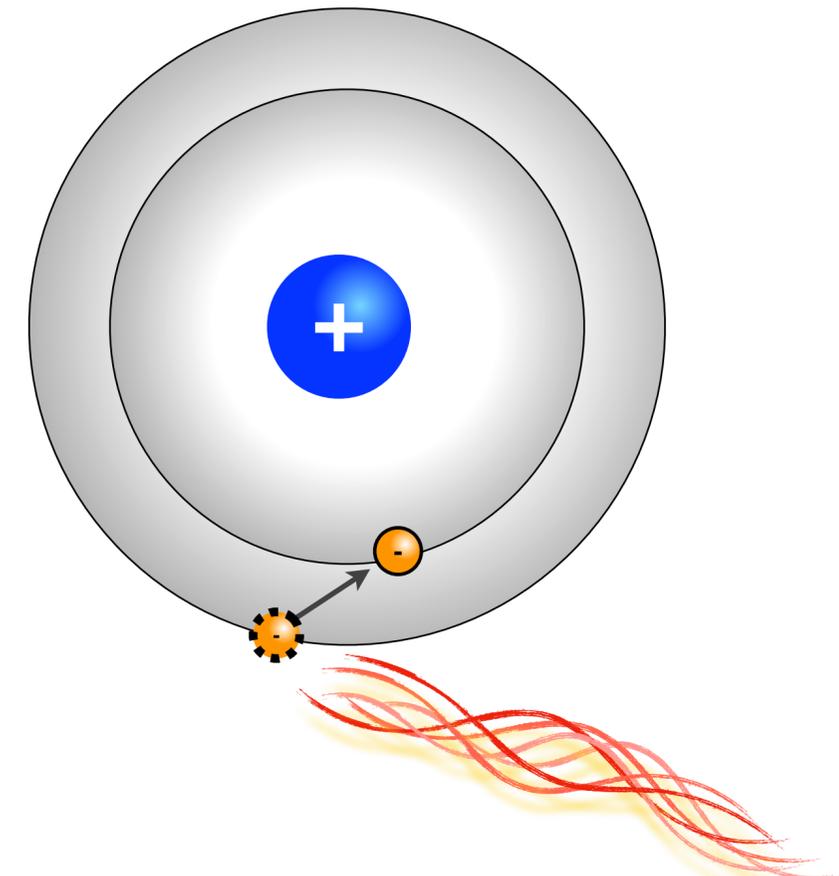
- diskrete Energiezustände der subatomaren Welt
- Neue Sprache der Natur

QUANTEN

Kontinuierliche Abstrahlung (klassisch)

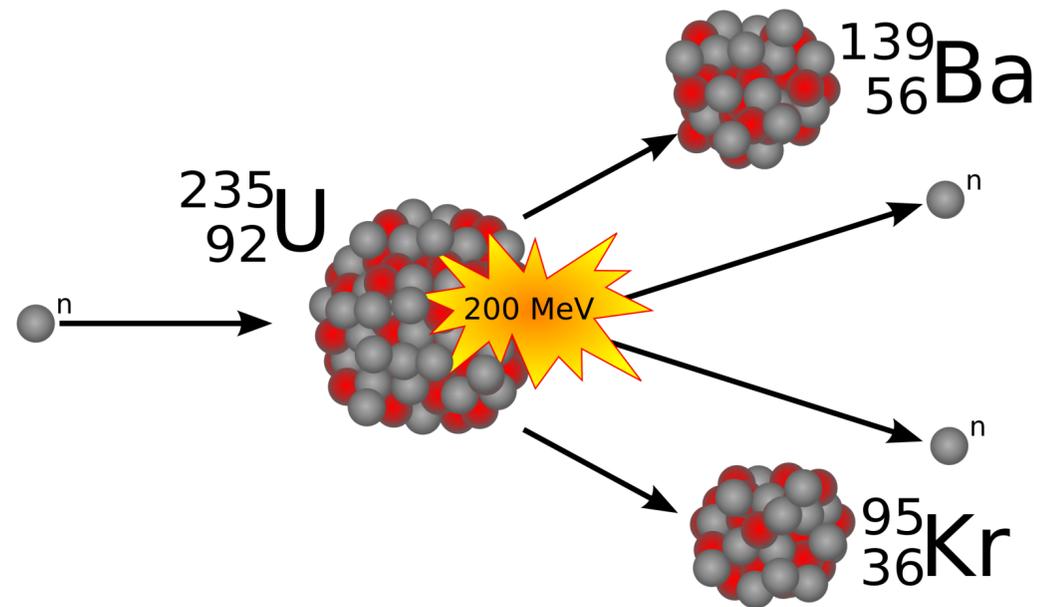


Diskrete Abstrahlung (Quanten)

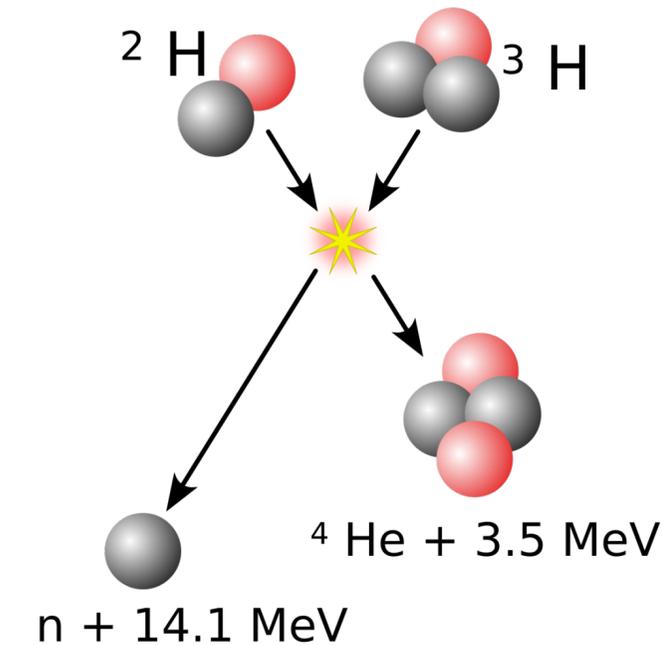


KERNENERGIE

KERNSPALTUNG^[1]



KERNFUSION



Die Zahl der Protonen und Neutronen ist konstant aber ...

die Endprodukte sind leichter als die Anfangsprodukte^[2]

Massendifferenz → Energieüberschuss → Dampfturbine → Strom

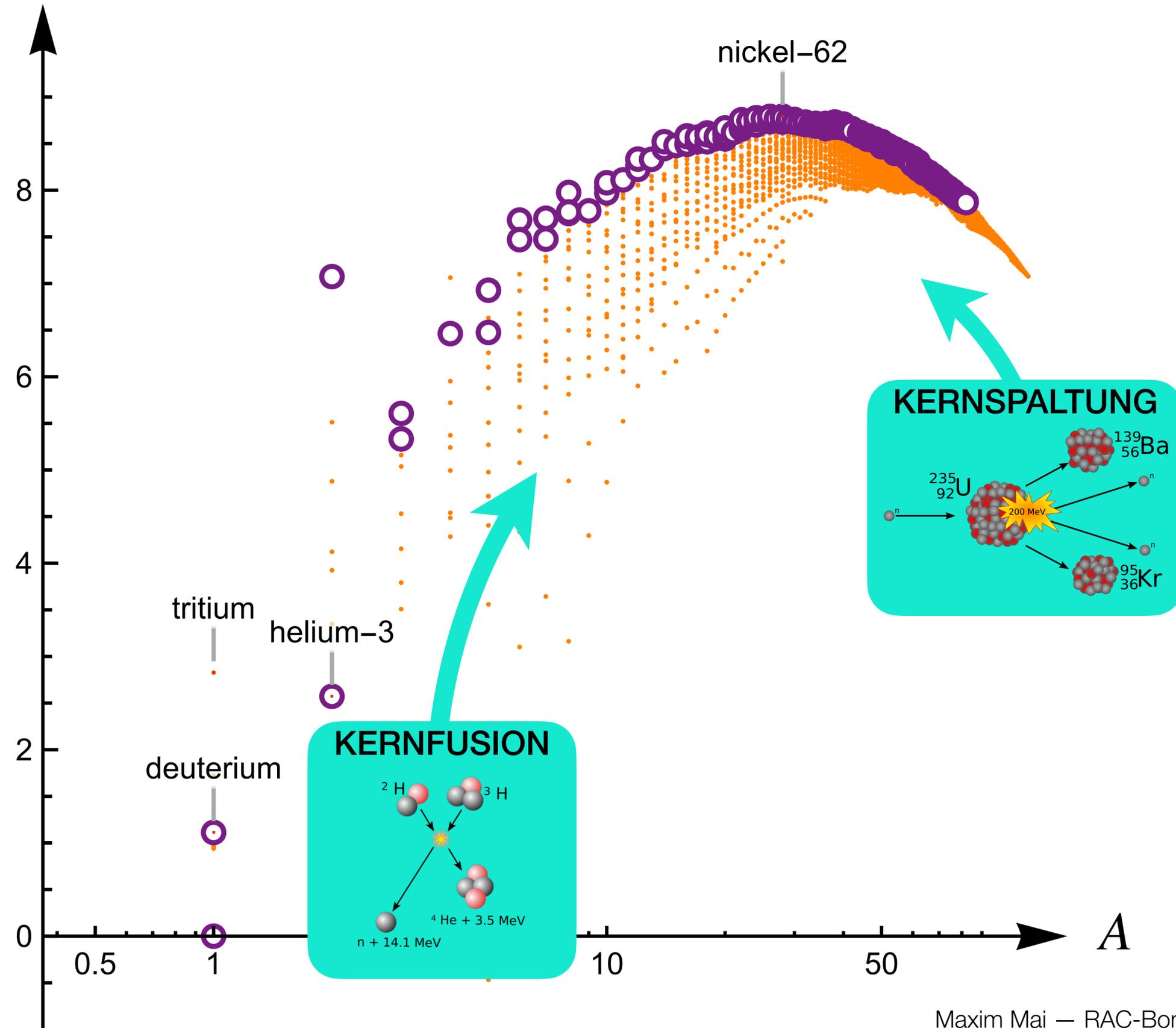
Proton 
Neutron 

[1] Synonym zu Kernenergie, Atomenergie, Atomkraft, Kernkraft oder Nuklearenergie

[2] Massen/Zerfallskanäle der Isotope der Atomkerne z.B. <https://periodictable.com/index.html>

[Bilder]: Wikipedia

$(B/A)/\text{MeV}$



KERNFUSION

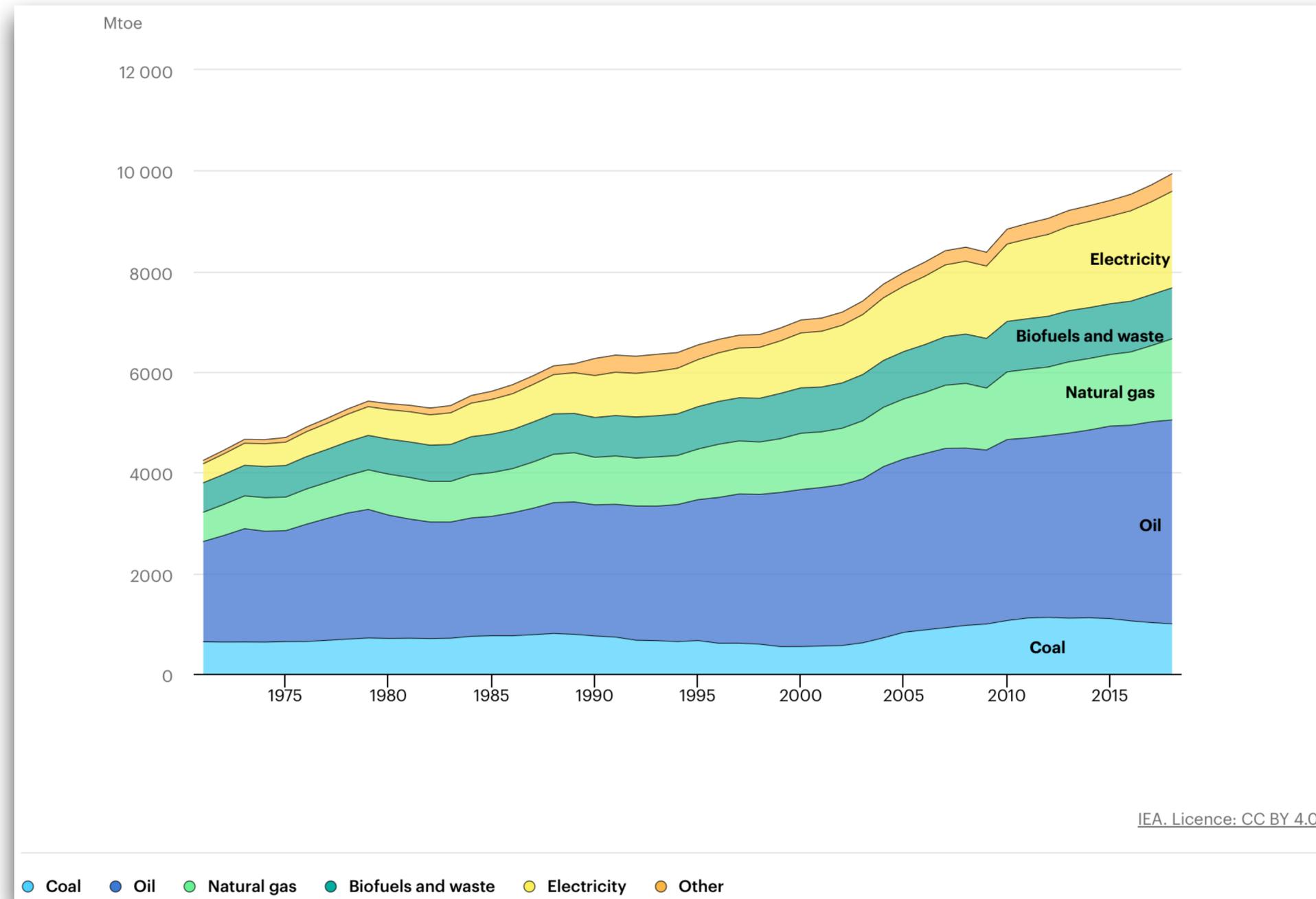
Motivation (Warum?)

Energiedichte, Klimawandel, Sicherheit, ...

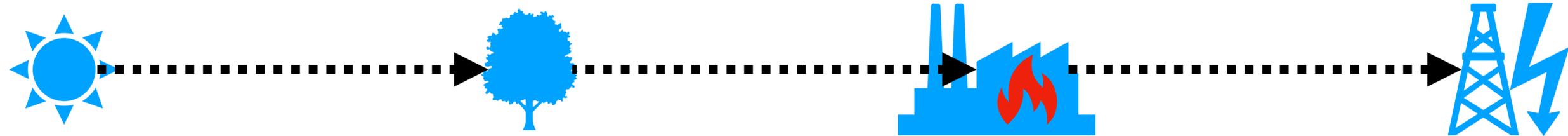


ENERGIEBEDARF DER ERDE

- Verdoppelt seit 1970s
- Meistens aus fossilen Quellen



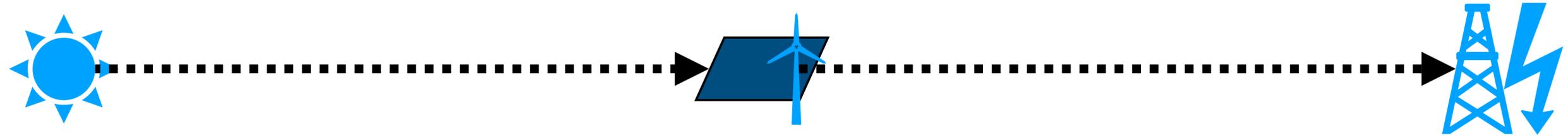
MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



Fossile Treibstoffe

Bekannt/Eingesetzt:	seit ~1880s (Stromproduktion)
Einsatzmöglichkeiten	flexibel
Restverfügbarkeit	60-900 Jahre
Gefahren/Probleme	CO ² -Ausstoß, Klimawandel

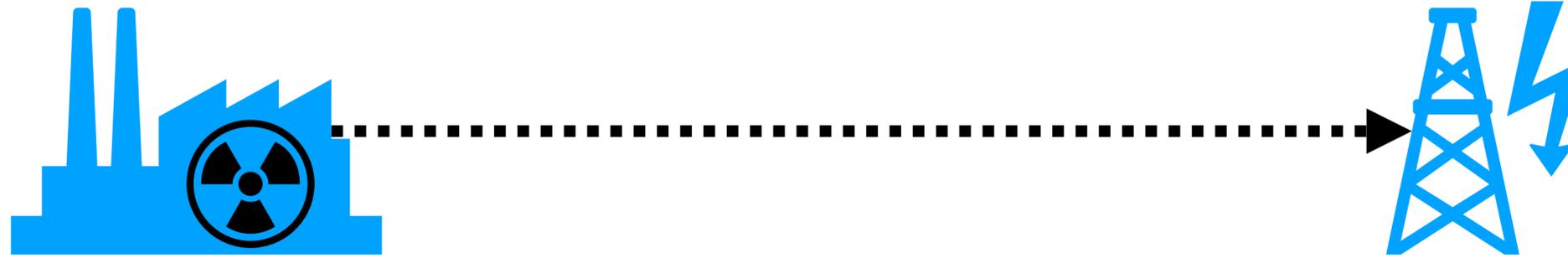
MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



Erneuerbare (Solar/Wind/...)

Bekannt/Eingesetzt:	Seit ~1890s (Stromproduktion)
Einsatzmöglichkeiten	Ortsgebunden
Restverfügbarkeit	Unbegrenzt
Gefahren/Probleme	Stochastische Verfügbarkeit

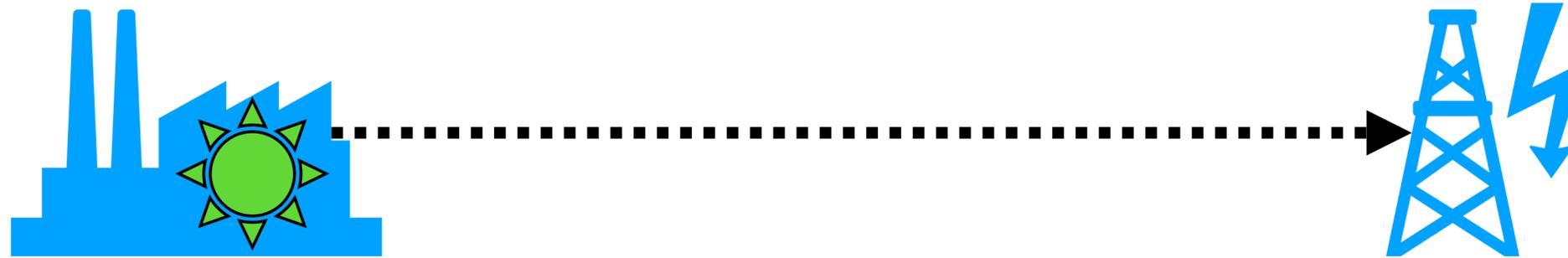
MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



Kernkraft (Spaltung)

Bekannt/Eingesetzt:	Seit ~1950s (Stromproduktion)
Einsatzmöglichkeiten	Flexibel
Restverfügbarkeit	200+ Jahre
Gefahren/Probleme	Radioaktiver Abfall / Waffenproduktion

MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



Kernfusion

Bekannt/Eingesetzt:

???

Einsatzmöglichkeiten

Flexibel

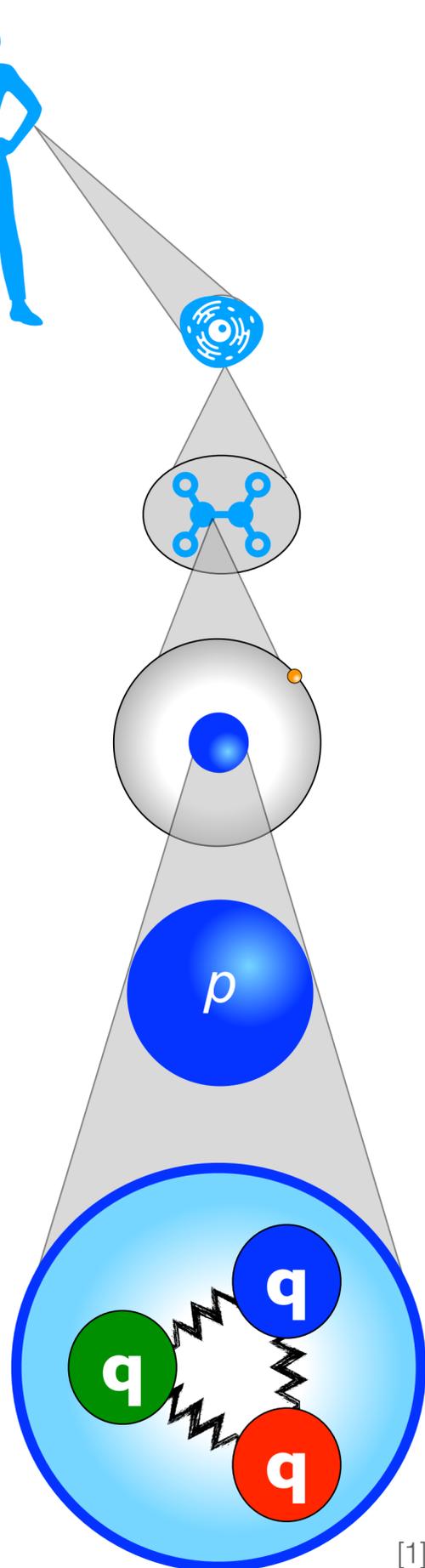
Restverfügbarkeit

Unbegrenzt

Gefahren/Probleme

komplexe Technologie

ENERGIEDICHTE



Zelle

Molekül

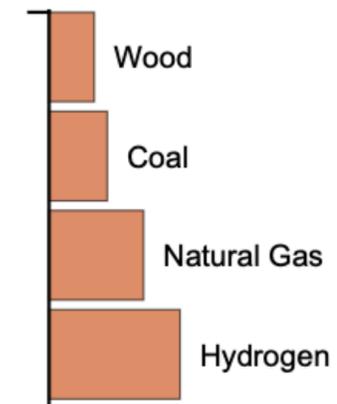
Atom

- Gebundenes System aus Proton und Elektron
- Elektromagnetismus
- Bindungsenergie $\approx 10 \text{ eV}$

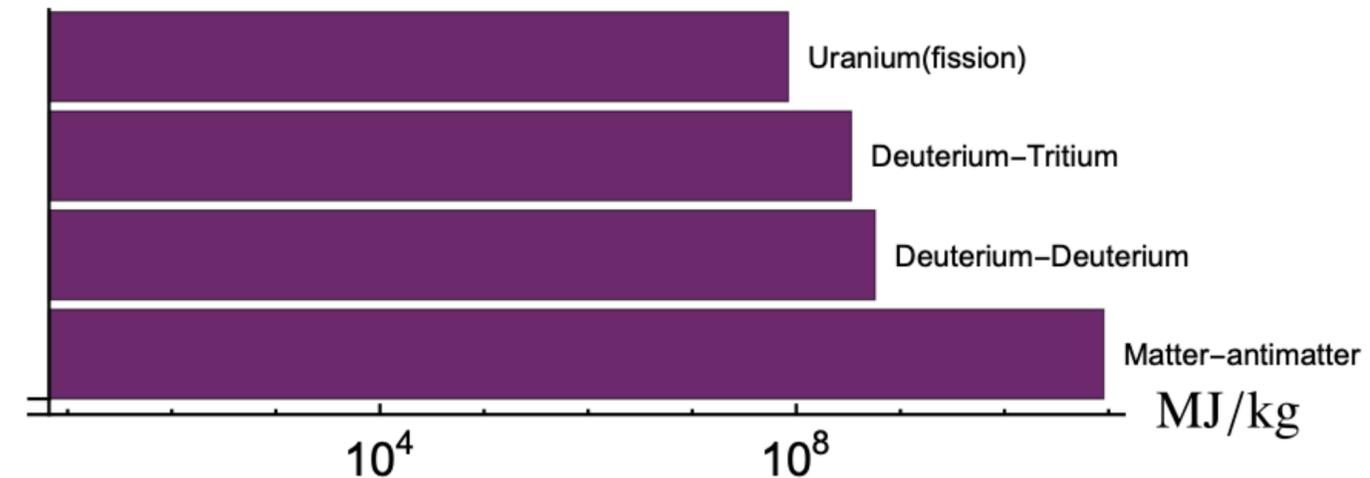
Proton/Neutron

- Gebundenes System aus Quarks & Gluonen
 - Starke Wechselwirkung
 - Bindungsenergie: $\sim \text{MeV}$
- $1000\ 000 \times$ Elektromagnetismus

Chemische Energieträger^[1]



Kernfusion/spaltung^[1]

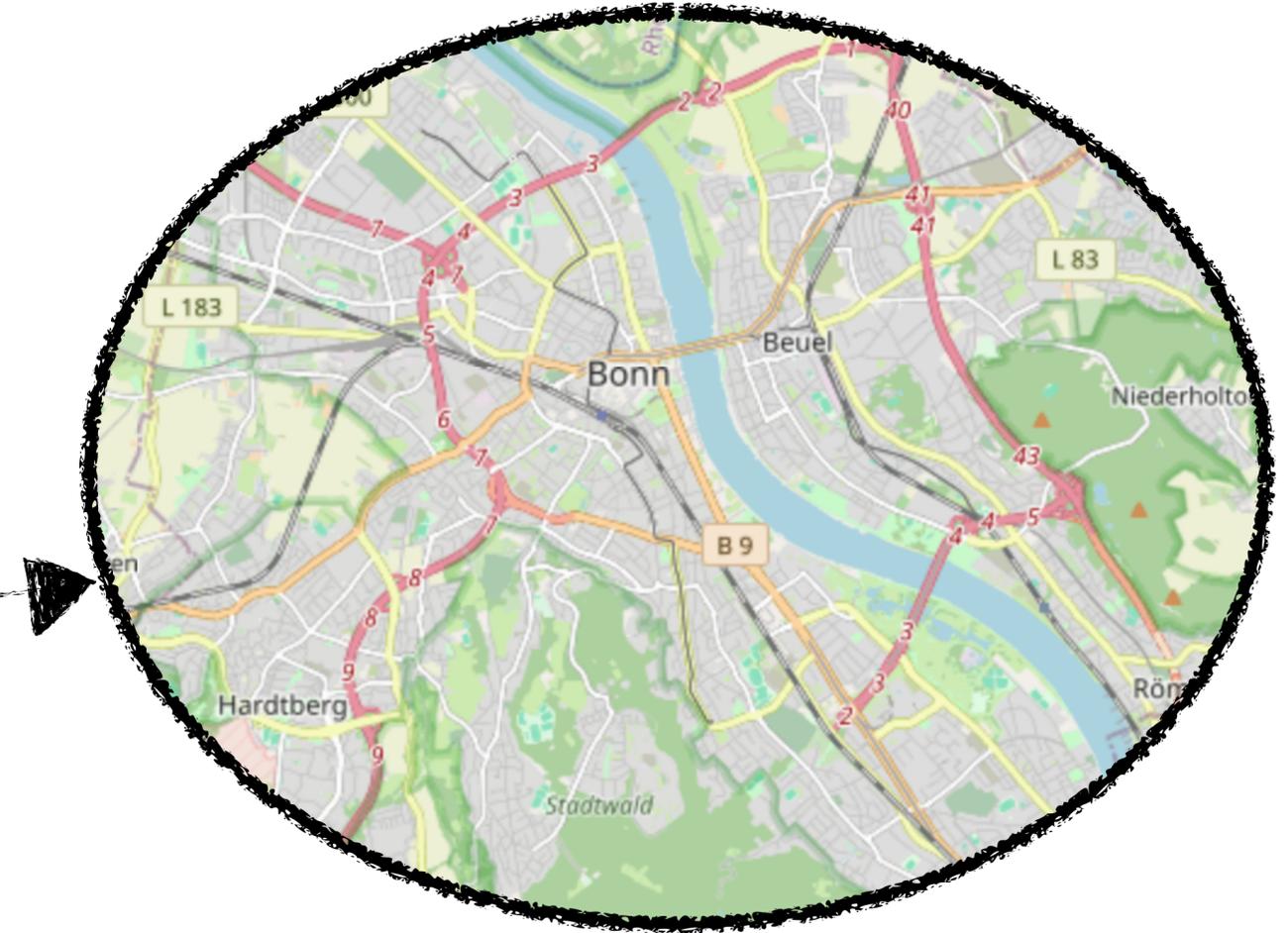
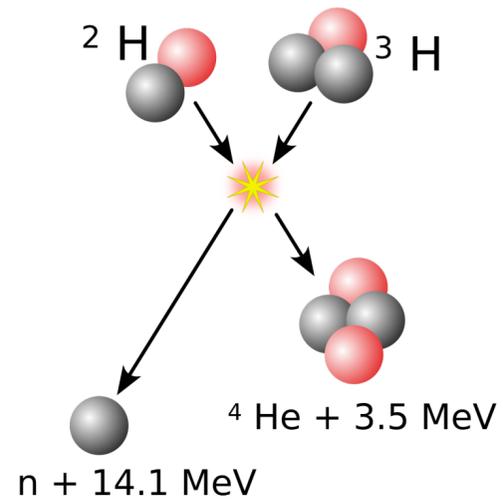


[1] International Energy Agency (IEA), Department of Energy (DOE), Nuclear Energy Agency (NEA)

... Gute Nachrichten

Deuterium-Tritium-Fusion hat eine sehr große Energiedichte ($\approx 4 \cdot 10^8$ MJ/kg)

Jahresstromverbrauch (Bonn) ~ 16kg Tritium (^3H)



KERNFUSION

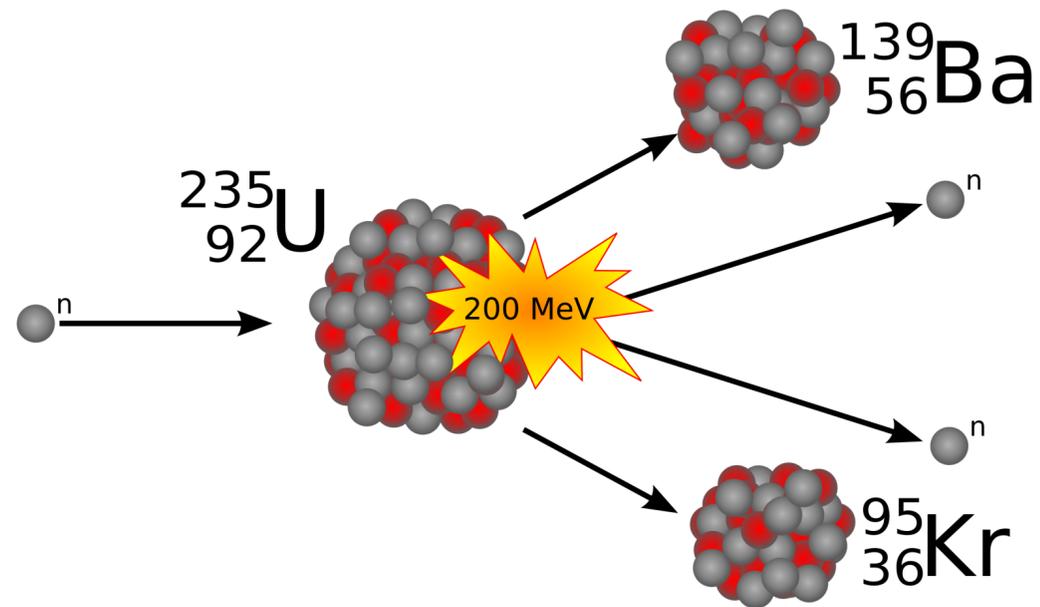
Umsetzung und Hindernisse (Wann?)

Plasmastabilität, Treibstoffverfügbarkeit, ITER, ...



UMSETZUNG?

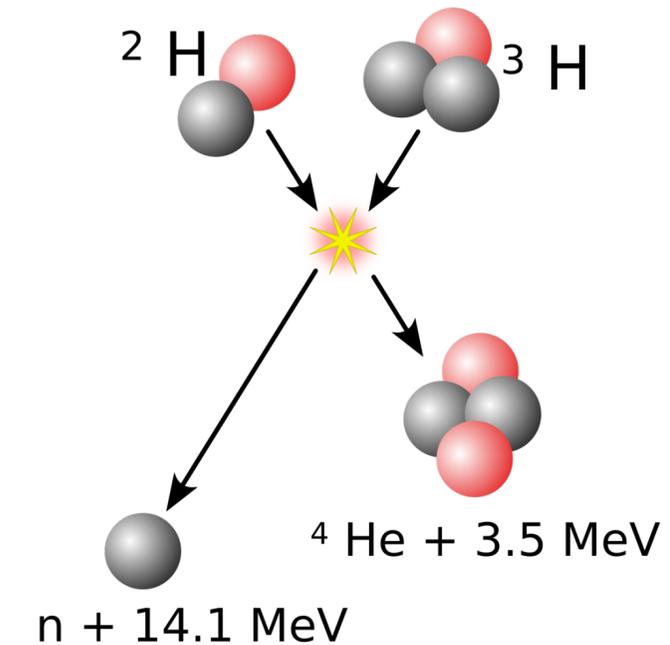
KERNSPALTUNG



Unkontrolliert: Atomwaffen (1945)

Kontrolliert: Atomkraftwerke (1951)

KERNFUSION



Unkontrolliert: Kernfusionswaffen (1952)

Kontrolliert: Sterne, Fusionskraftwerke (20??)

Proton ●
Neutron ●

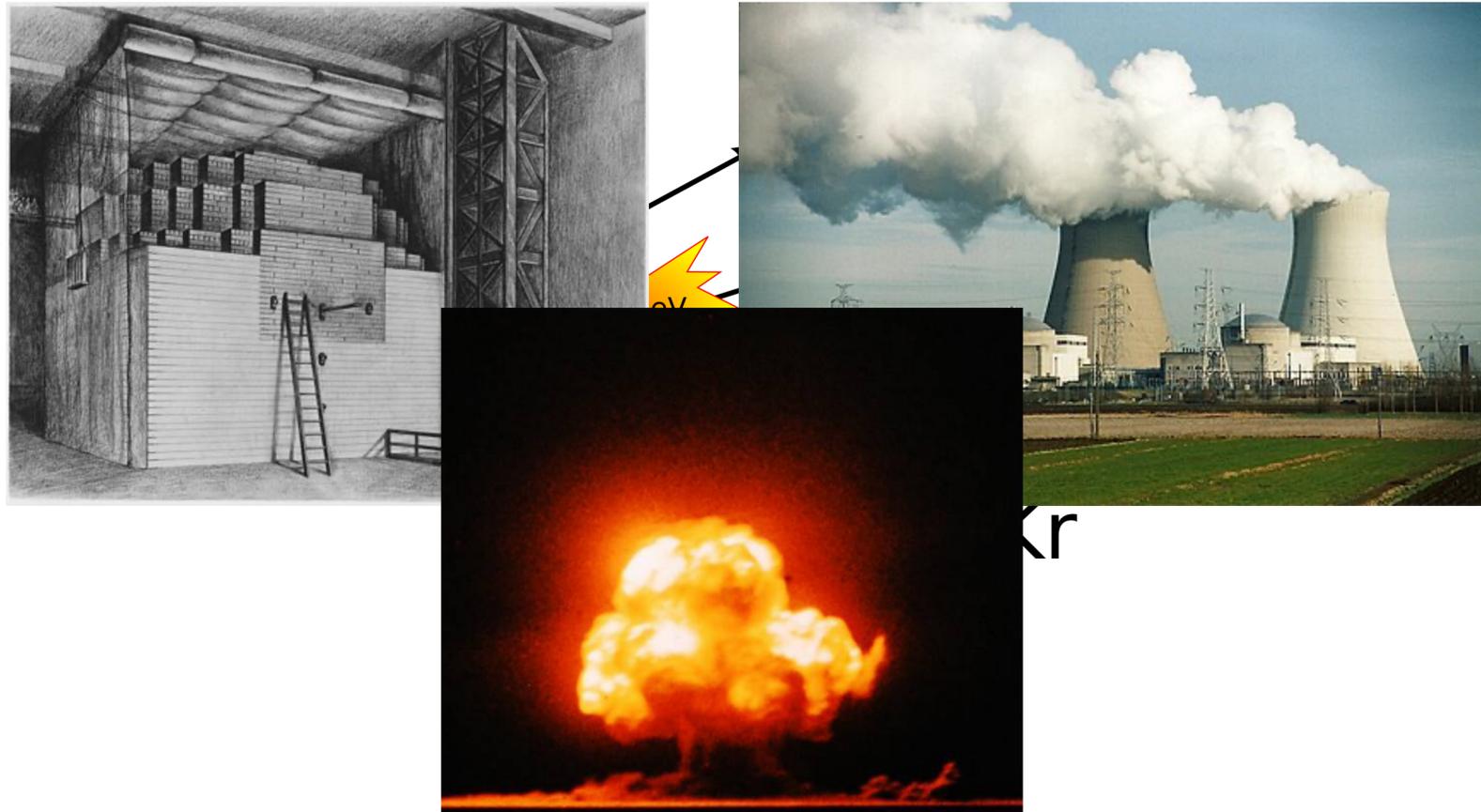
[1] Synonym zu Kernenergie, Atomenergie, Atomkraft, Kernkraft oder Nuklearenergie

[2] z.B. <https://periodictable.com/index.html>

[Bilder] Wikipedia

UMSETZUNG?

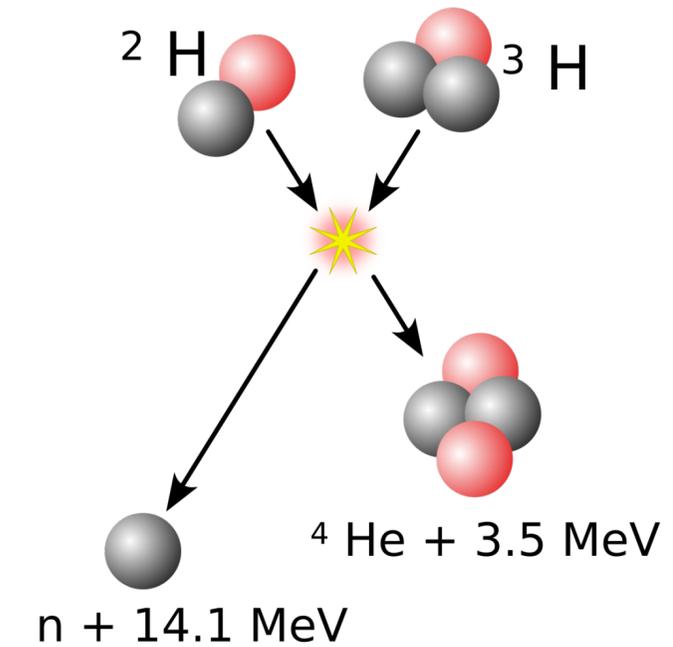
KERNSPALTUNG



Unkontrolliert: Atomwaffen (1945)

Kontrolliert: Atomkraftwerke (1951)

KERNFUSION



Unkontrolliert: Kernfusionswaffen (1952)

Kontrolliert: Sterne, Fusionskraftwerke (20??)

Proton ●
Neutron ●

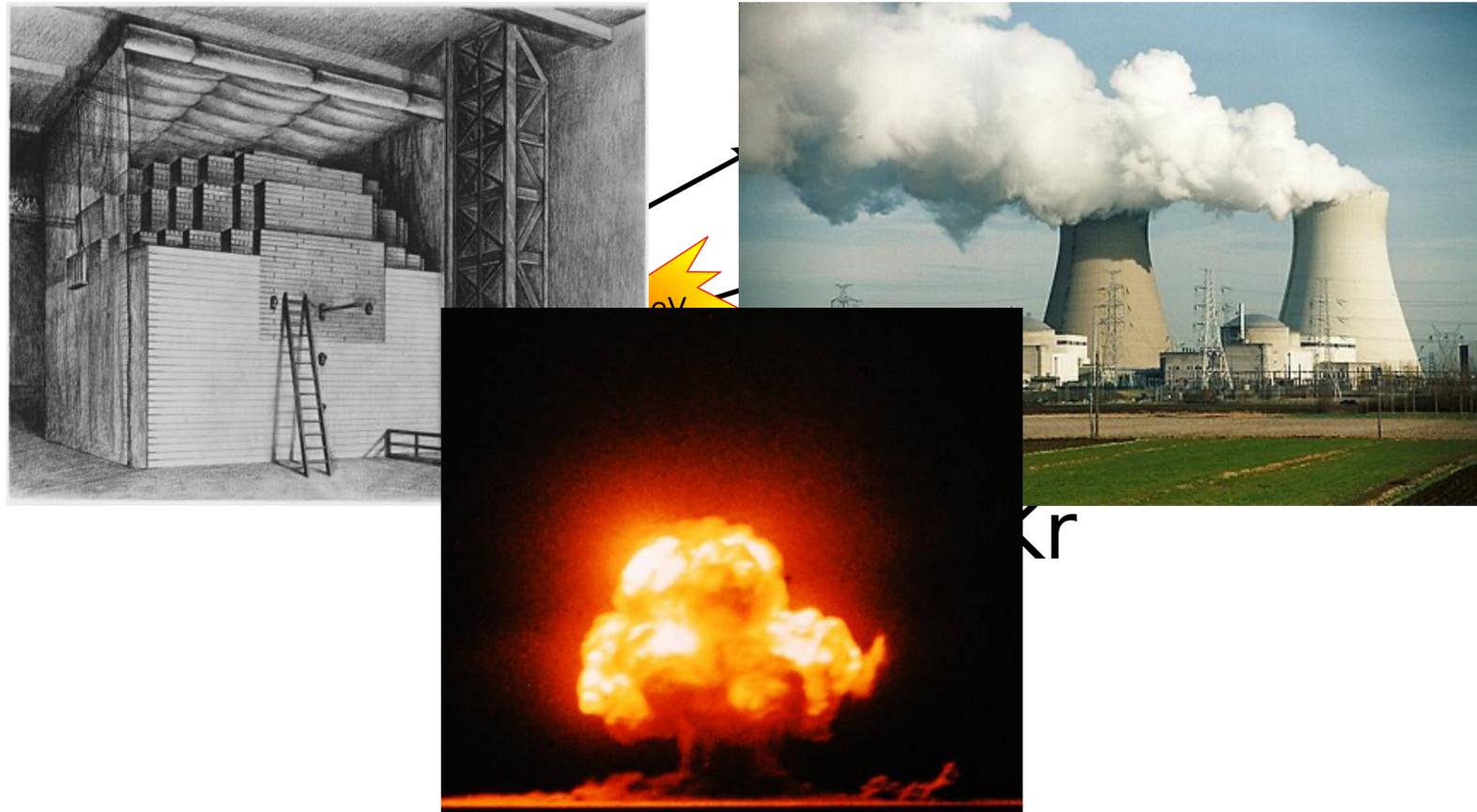
[1] Synonym zu Kernenergie, Atomenergie, Atomkraft, Kernkraft oder Nuklearenergie

[2] z.B. <https://periodictable.com/index.html>

[Bilder] Wikipedia

UMSETZUNG?

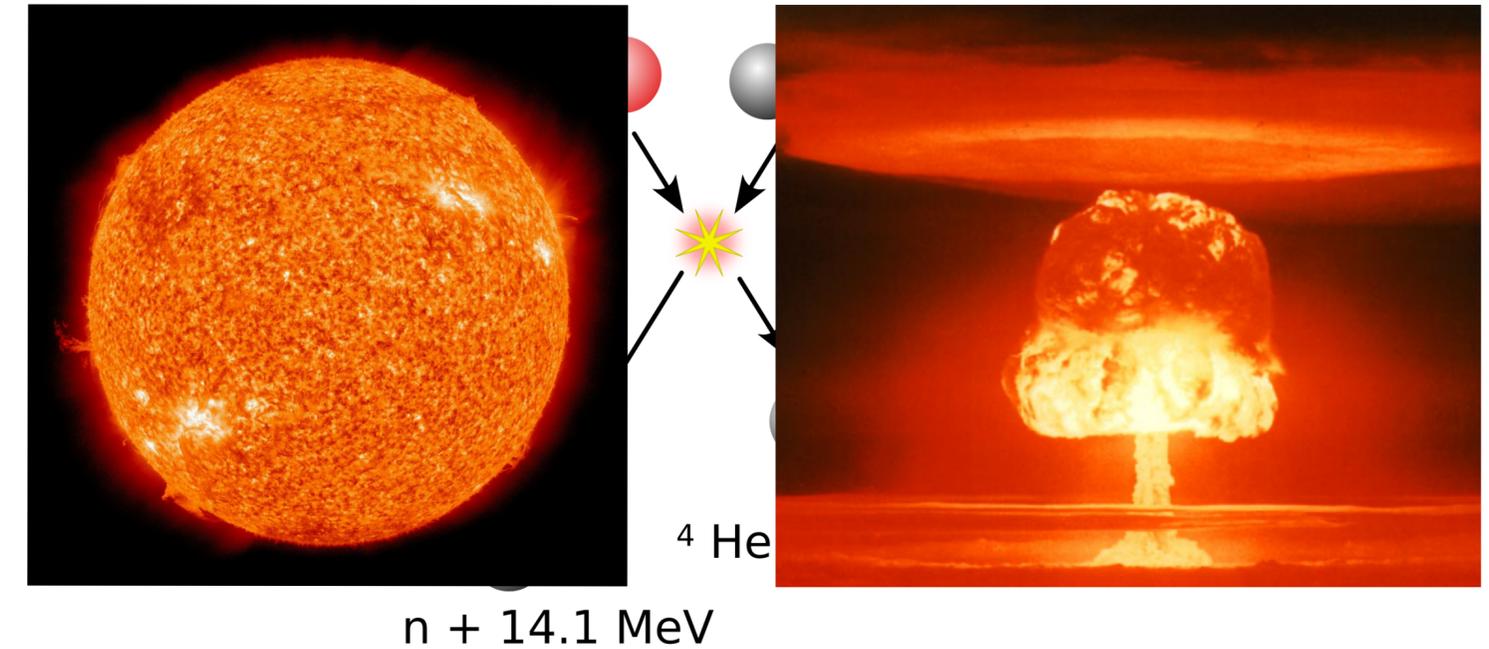
KERNSPALTUNG



Unkontrolliert: Atomwaffen (1945)

Kontrolliert: Atomkraftwerke (1951)

KERNFUSION



Unkontrolliert: Kernfusionswaffen (1952)

Kontrolliert: Sterne, Fusionskraftwerke (20??)

Proton ●
Neutron ●

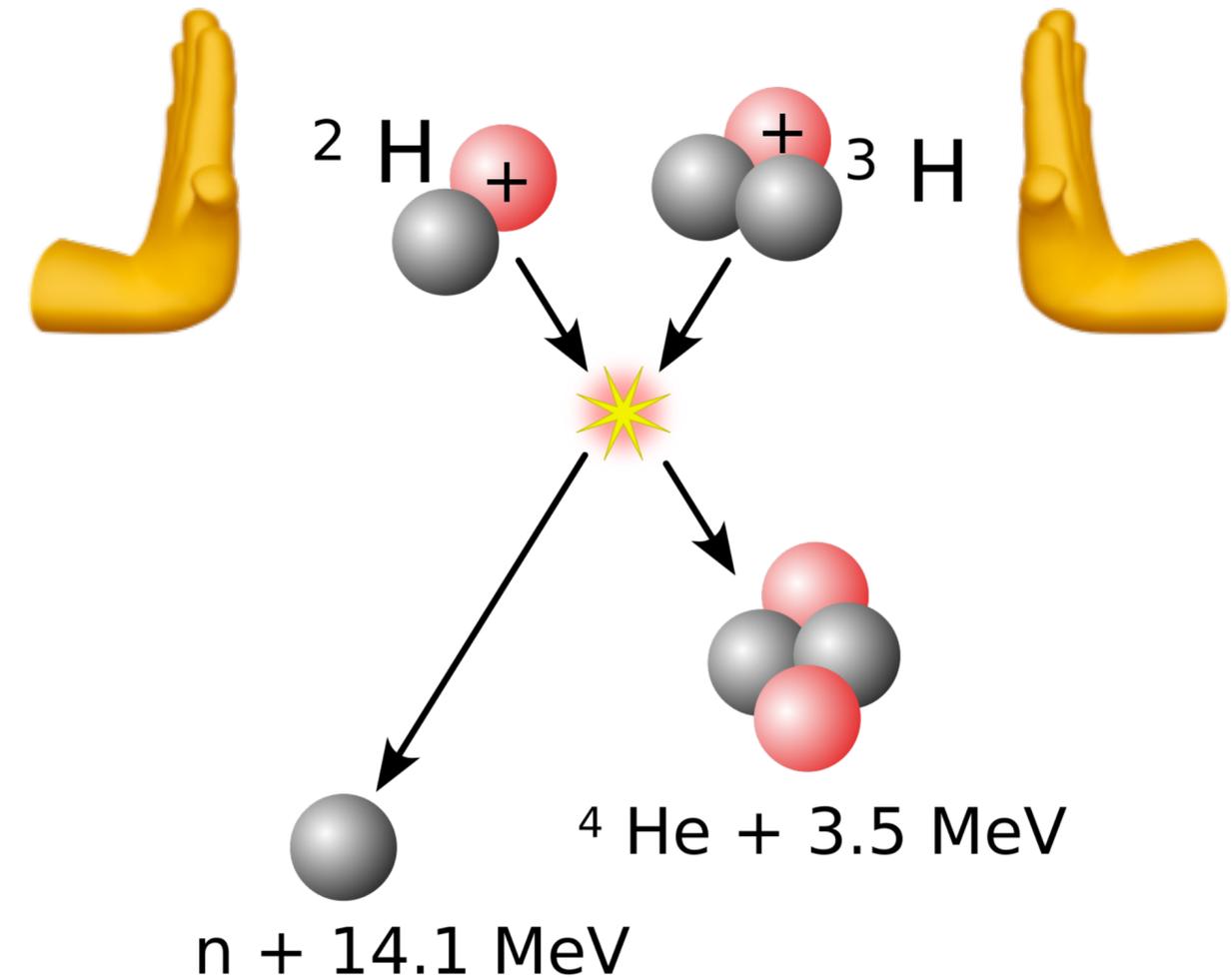
[1] Synonym zu Kernenergie, Atomenergie, Atomkraft, Kernkraft oder Nuklearenergie

[2] z.B. <https://periodictable.com/index.html>

[Bilder] Wikipedia

PROBLEM

- Reaktionsteilnehmer sind positiv geladen
- Elektrostatische Abstoßung muss überwunden werden
 - ➔ Hohe Temperaturen notwendig (~500 Millionen °C)

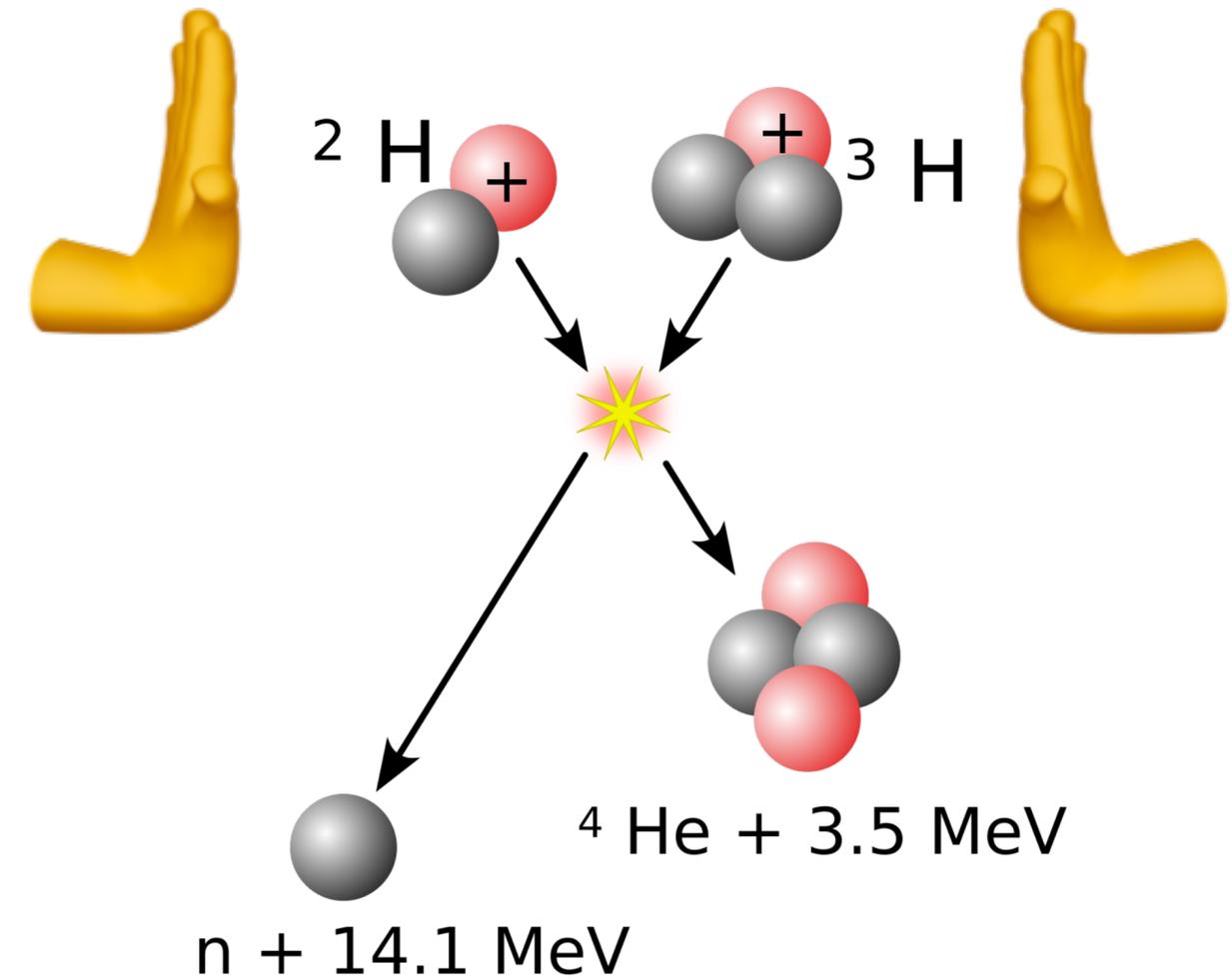


PROBLEM

- Reaktionsteilnehmer sind positiv geladen
- Elektrostatische Abstoßung muss überwunden werden
 - ➔ Hohe Temperaturen notwendig (~500 Millionen °C)

Wie heizt man das?

Wie schliesst man es ein? (Confinement)

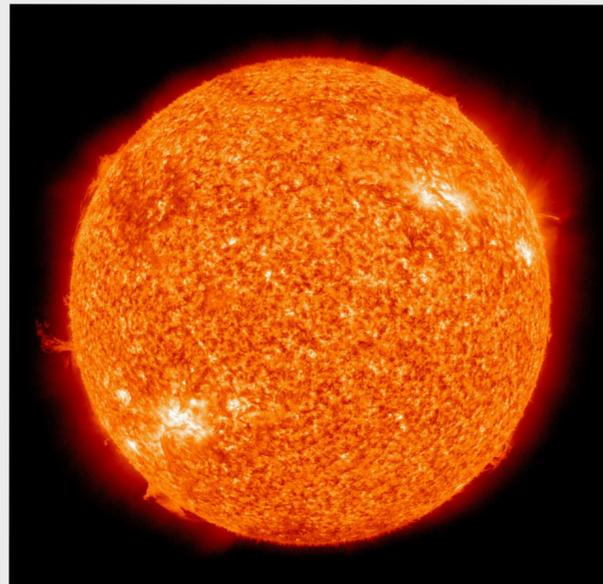


PROBLEM – LÖSUNGEN

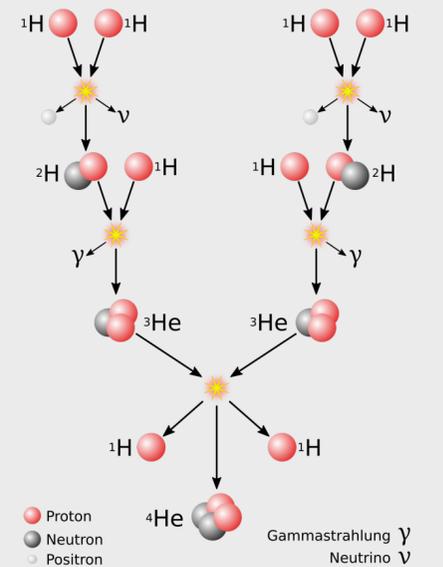
Gravitativer Einschluss

Sterne

- [+] Einfaches Design
- [+] Plasma Selbstheizung
- [–] Grosse Masse und Abstand notwendig



ESA



Wikipedia

PROBLEM – LÖSUNGEN

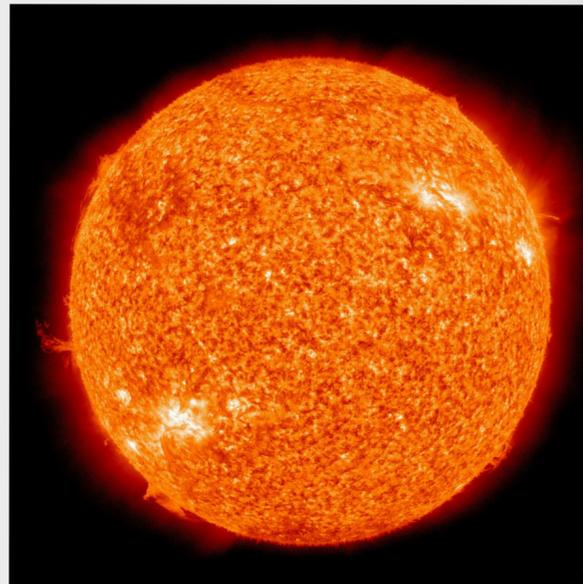
Gravitativer Einschluss

Sterne

Trägheitsfusion (ICF Inertial Confinement Fusion)

Laser induzierte Schockwellen in kleinen Gefäßen (~ 1 mm)

- [+] Einfaches Design
- [+] Plasma Selbstheizung
- [–] Grosse Masse und Abstand
- [+] Nur kleiner Bereich muss aufgeheizt werden
- [+] Plasma Selbstheizung
- [+] Energiegewinn: 3.15/2.05 (2022NIF^[2])
- [–] Sehr kurze Einschlusszeit (~ 20 ns)
- [–] Explodiert im Prozess – Reaktordesign?



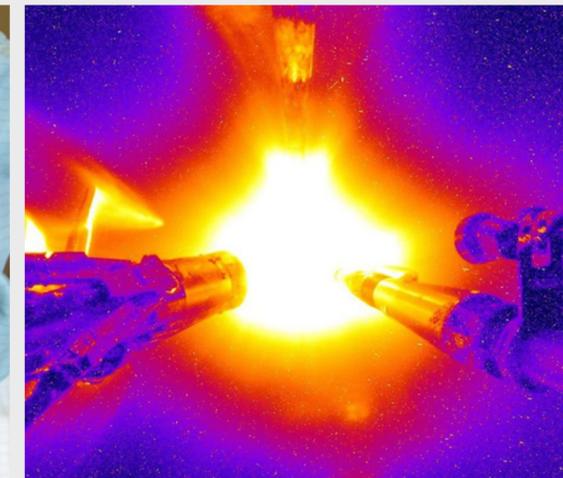
ESA



Nova Laser Bay



Target



NIF "Big Foot" deuterium-tritium (DT) implosion

PROBLEM – LÖSUNGEN

Gravitativer Einschluss

Sterne

Trägheitsfusion (ICF Inertial Confinement Fusion)

Laser induzierte Schockwellen in kleinen Gefäßen (~ 1 mm)

[+] Nur kleiner Bereich muss aufgeheizt werden

[+] Plasma Selbstheizung

[+] Energiegewinn: 3.15/2025 (2022 ICF)

[-] Sehr kurze Einschluss

[-] Explodiert im Prozess

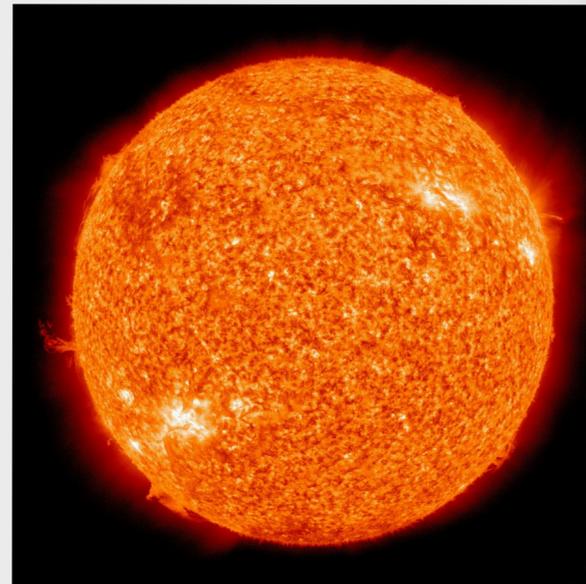
Magnetischer Einschluss (MCF Magnetic Confinement Fusion)

Geladenes Plasma im starken torroidalen Magnetfeld

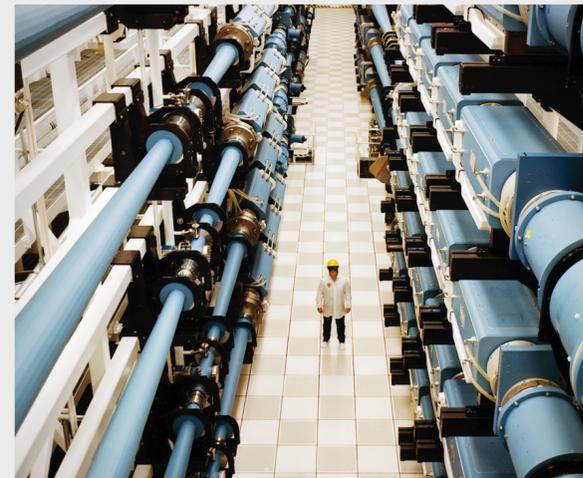
[+] Selbst-heizende Plasma (~ 10 min)^[2]

[+] Semi-realistische Reaktorkonfigurationen existieren

[-] Komplizierte Konfiguration: Abschirmung, Kühlung, Plasmastabilität



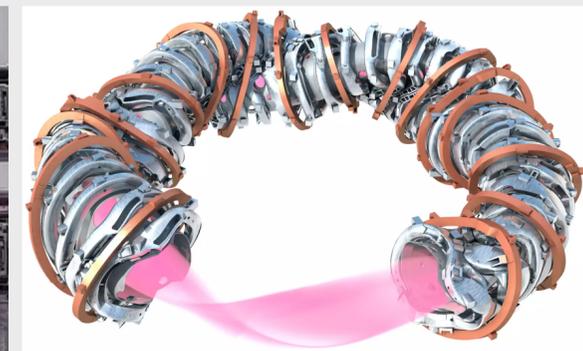
ESA



Nova Laser Bay

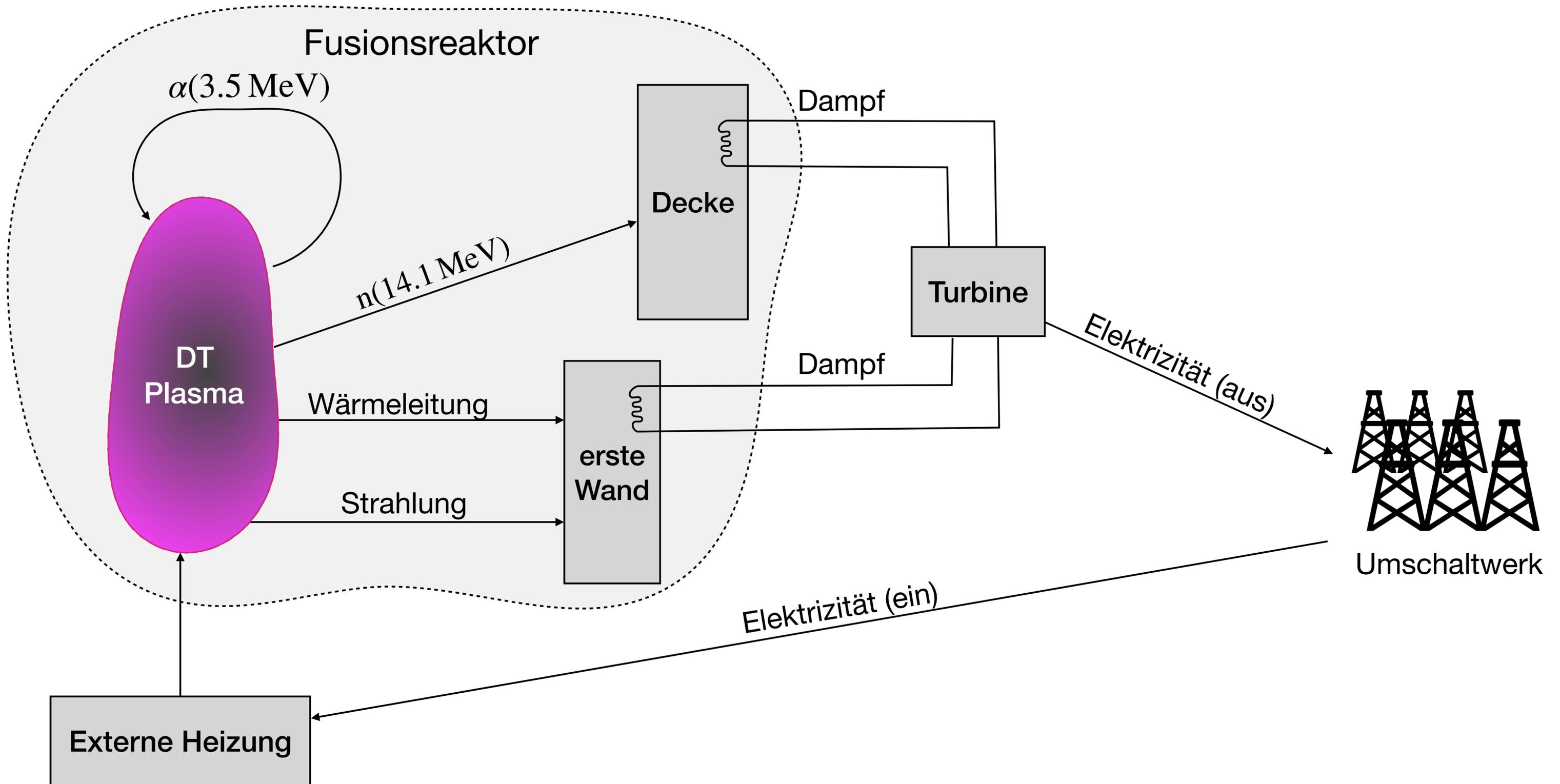


ITER (Tokamak)

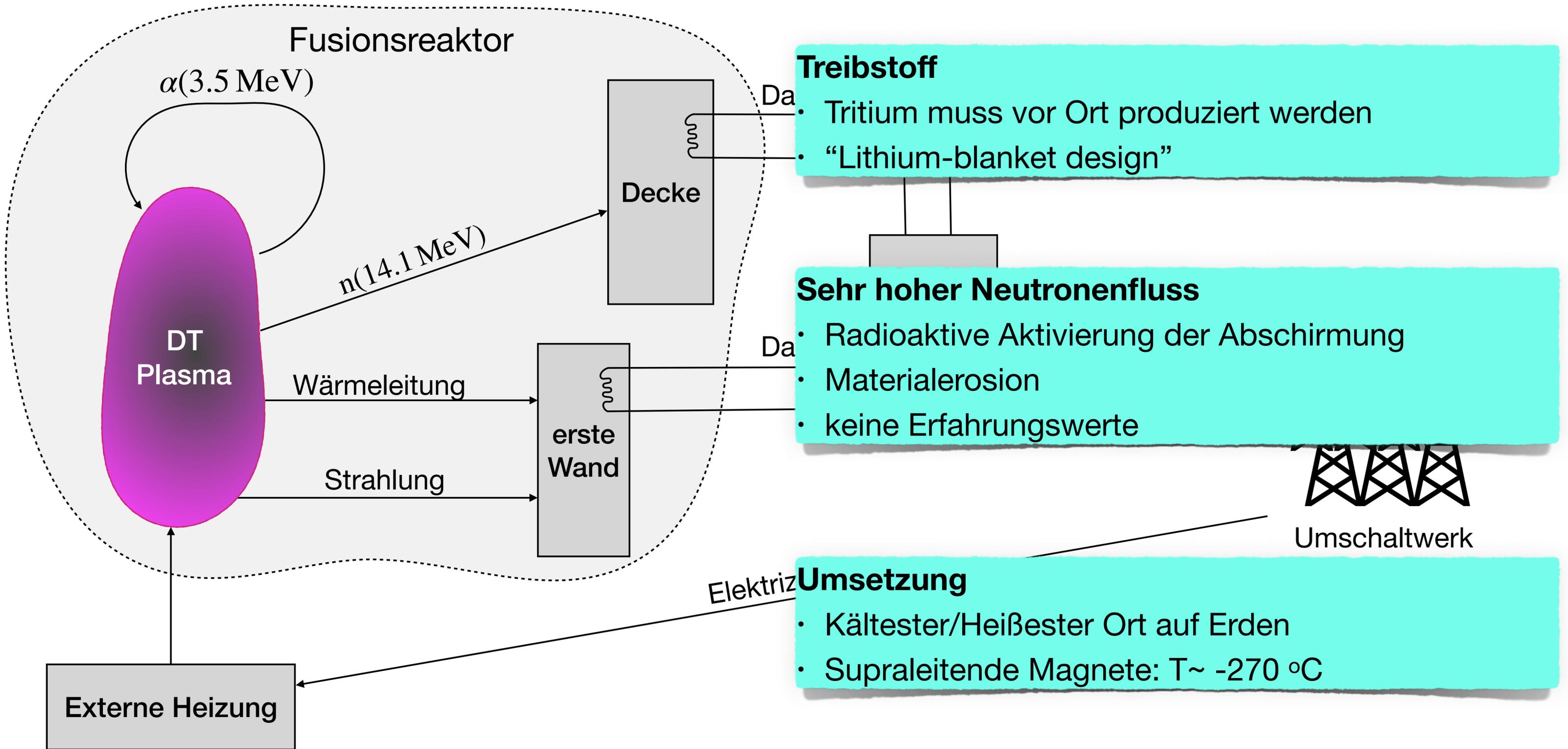


Wendelstein7-X (Stellarator)

GRUNDDESIGN



HERAUSFORDERUNGEN



Treibstoff

- Tritium muss vor Ort produziert werden
- "Lithium-blanket design"

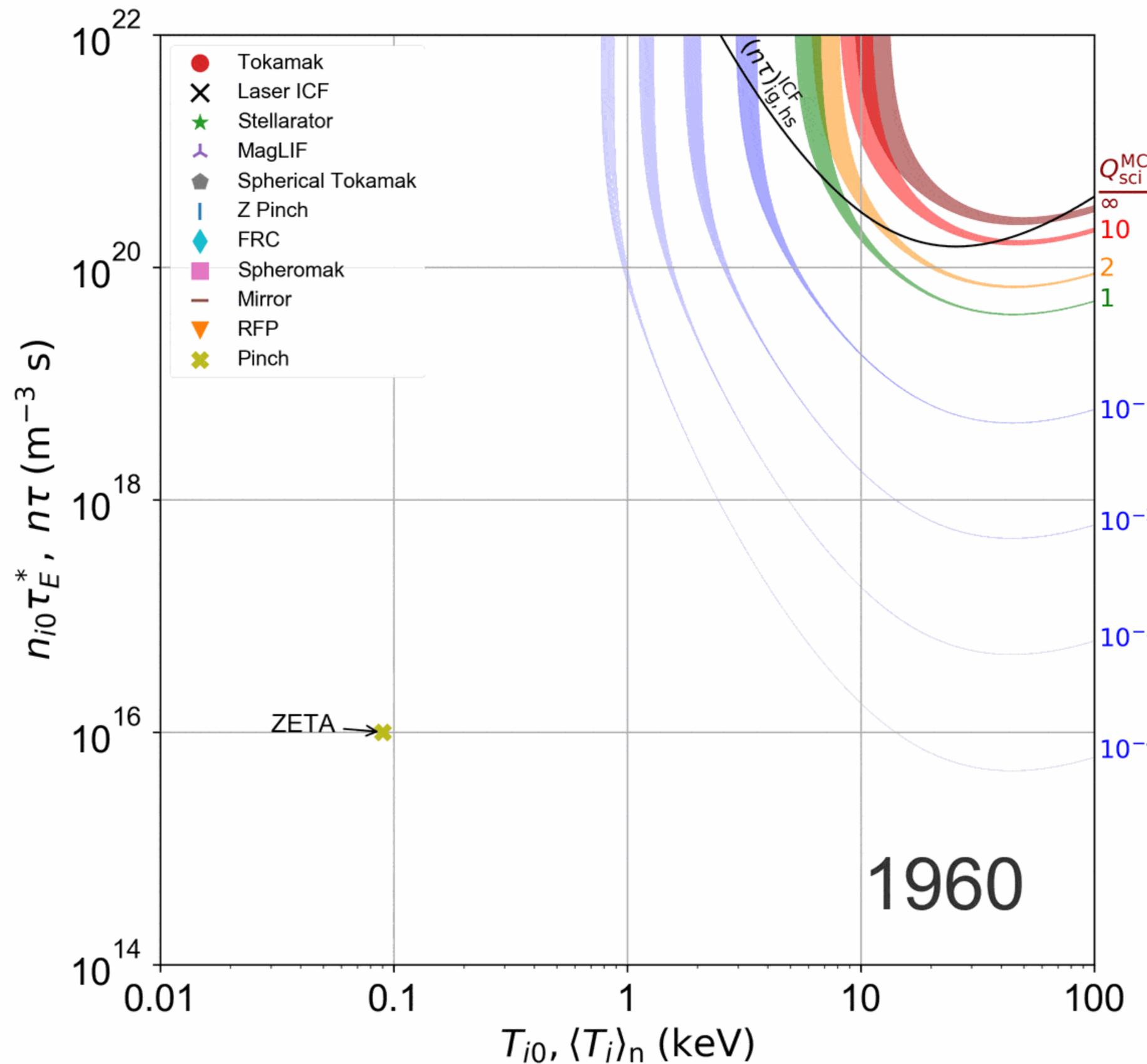
Sehr hoher Neutronenfluss

- Radioaktive Aktivierung der Abschirmung
- Materialerosion
- keine Erfahrungswerte

Umsetzung

- Kältester/Heißester Ort auf Erden
- Supraleitende Magnete: $T \sim -270 \text{ }^\circ\text{C}$

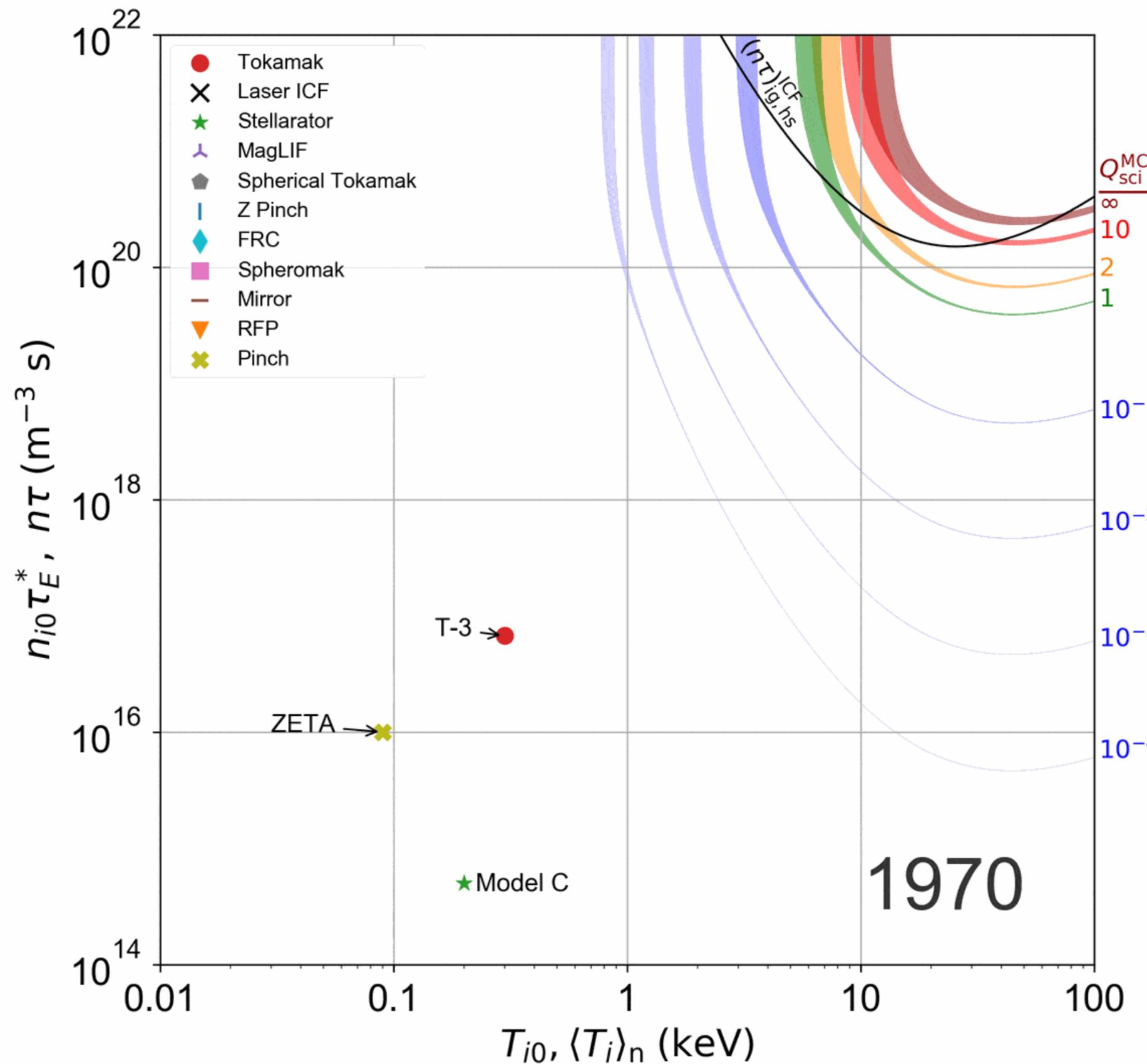
FORTSCHRITT



$$Q_{sci}^{MCF} = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aussere Heizung}}$$

- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs . $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt

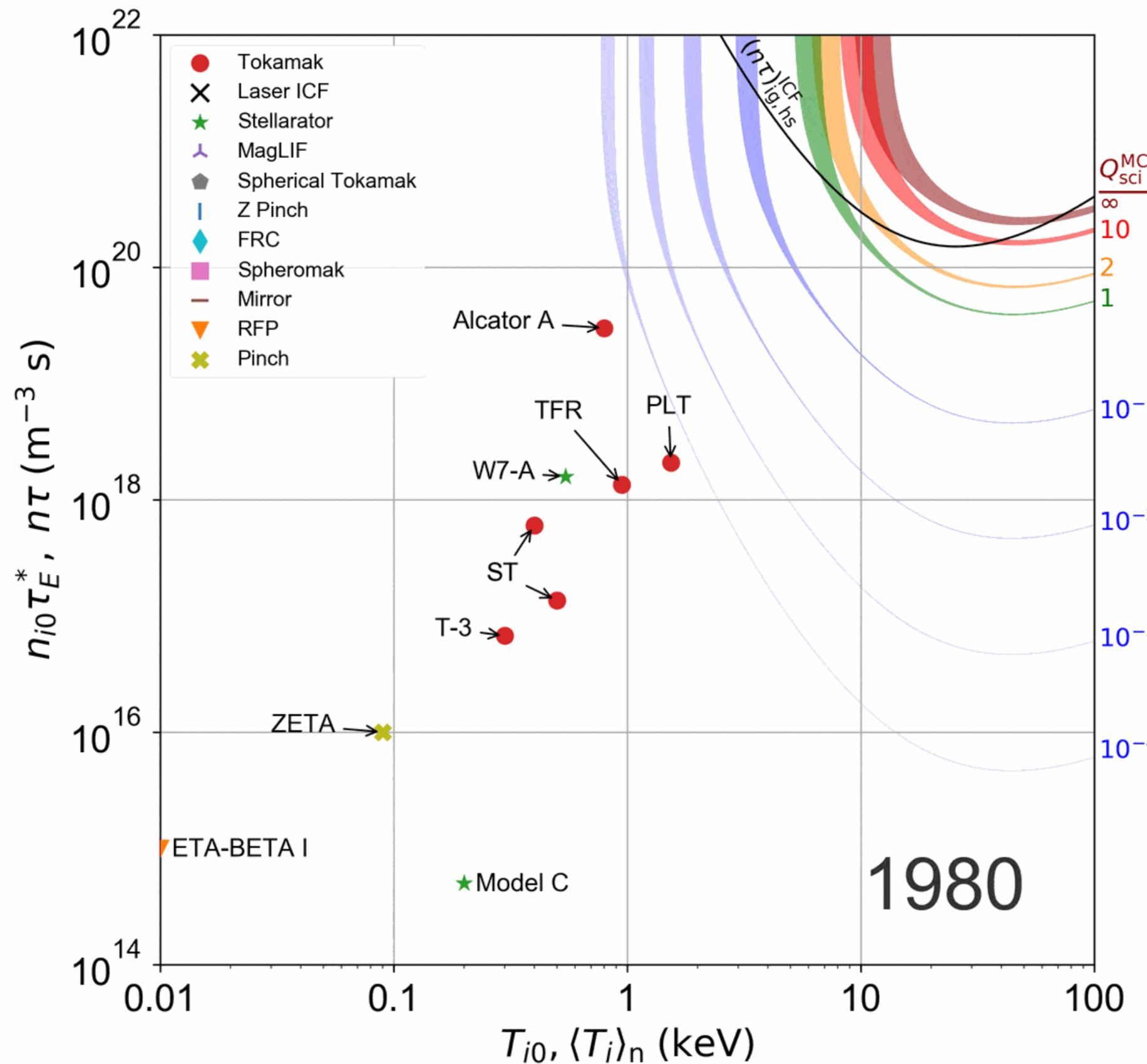
FORTSCHRITT



$$Q_{\text{sci}}^{\text{MCF}} = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aessere Heizung}}$$

- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs . $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt

FORTSCHRITT

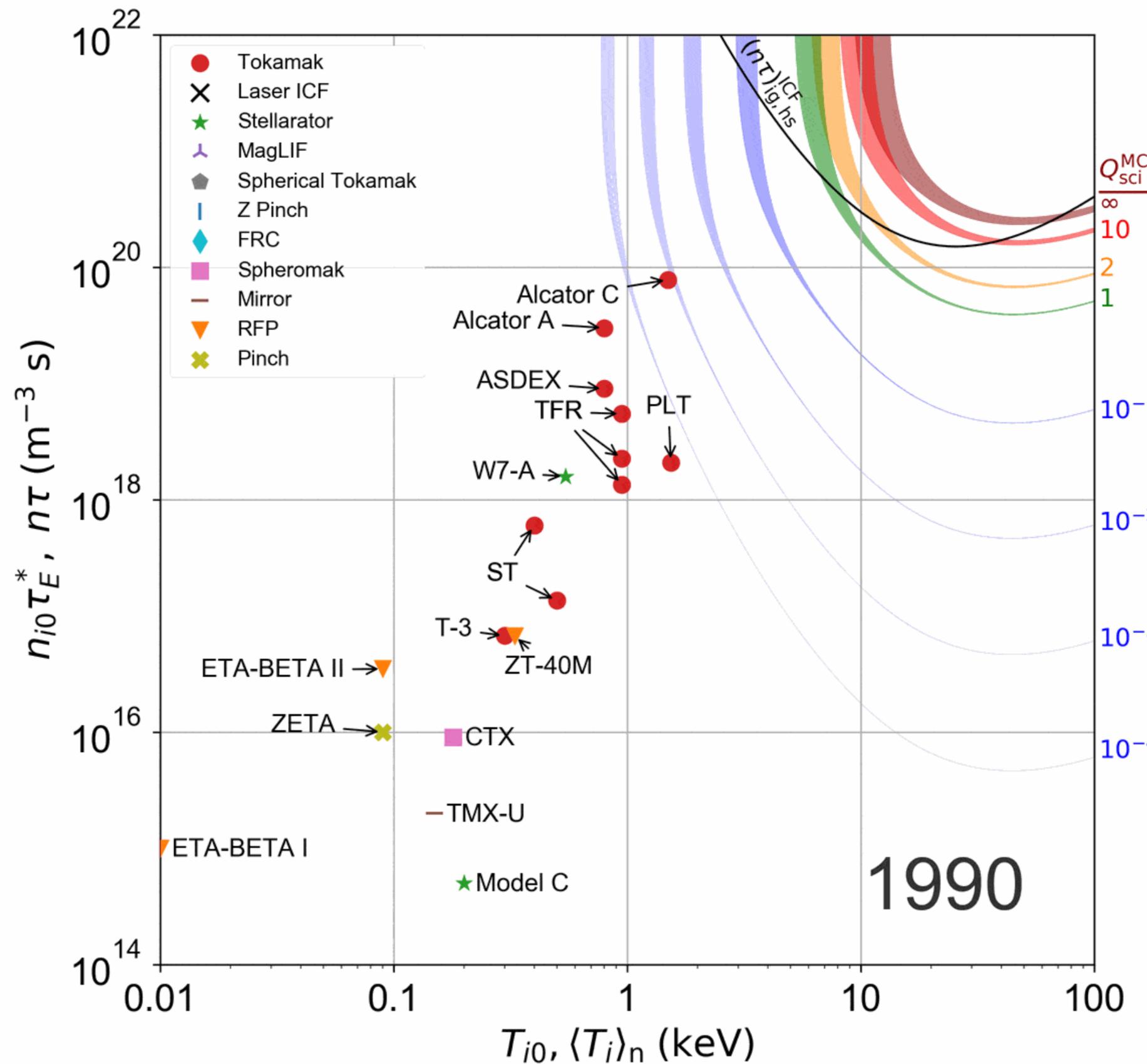


$$Q_{sci}^{MCF} = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aessere Heizung}}$$

- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs . $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt

1980

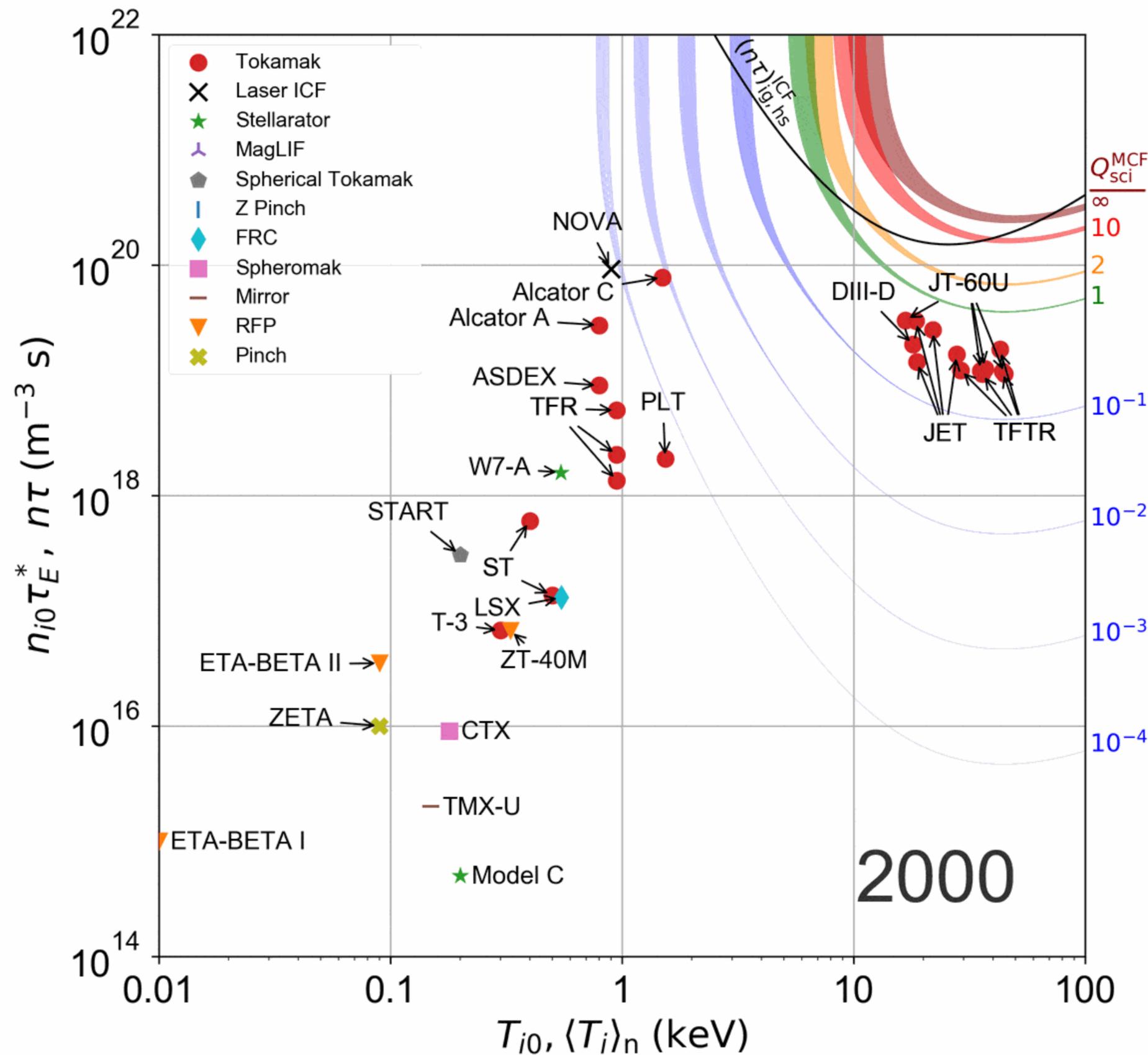
FORTSCHRITT



$$Q_{\text{sci}}^{\text{MCF}} = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aessere Heizung}}$$

- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs . $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt

FORTSCHRITT



$$Q_{\text{sci}}^{\text{MCF}} = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aessere Heizung}}$$

- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs . $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt

KERNFUSION

“KERNFUSION – ERSTAUNLICH EINFACH UND ERSTAUNLICH KOMPLEX”

DANKE FÜR DAS ZUHÖREN

