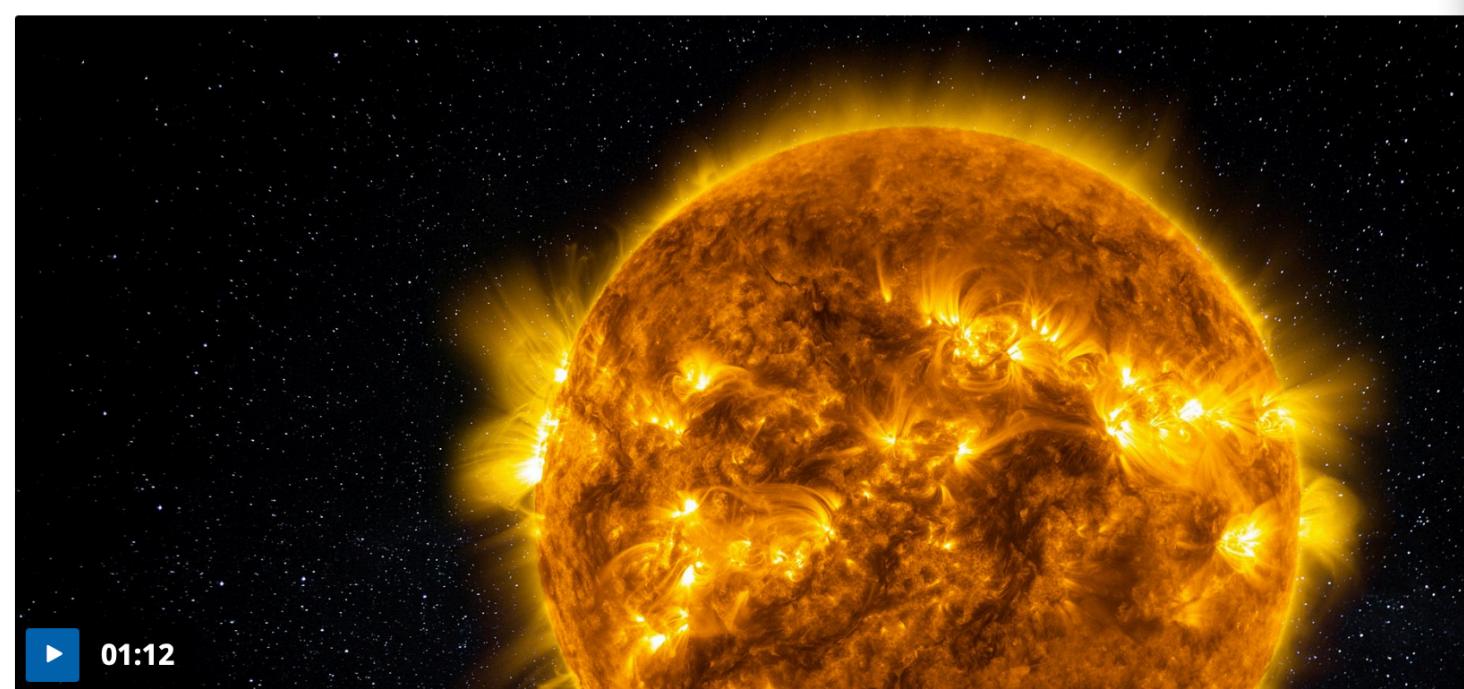


KERNFUSION

Maxim Mai

Universität Bern – The George Washington University

Outreach – 06.08.2024 – Rotaract Club Bonn



KERNFUSION

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

≡ **Frankfurter Allgemeine** Ⓜ

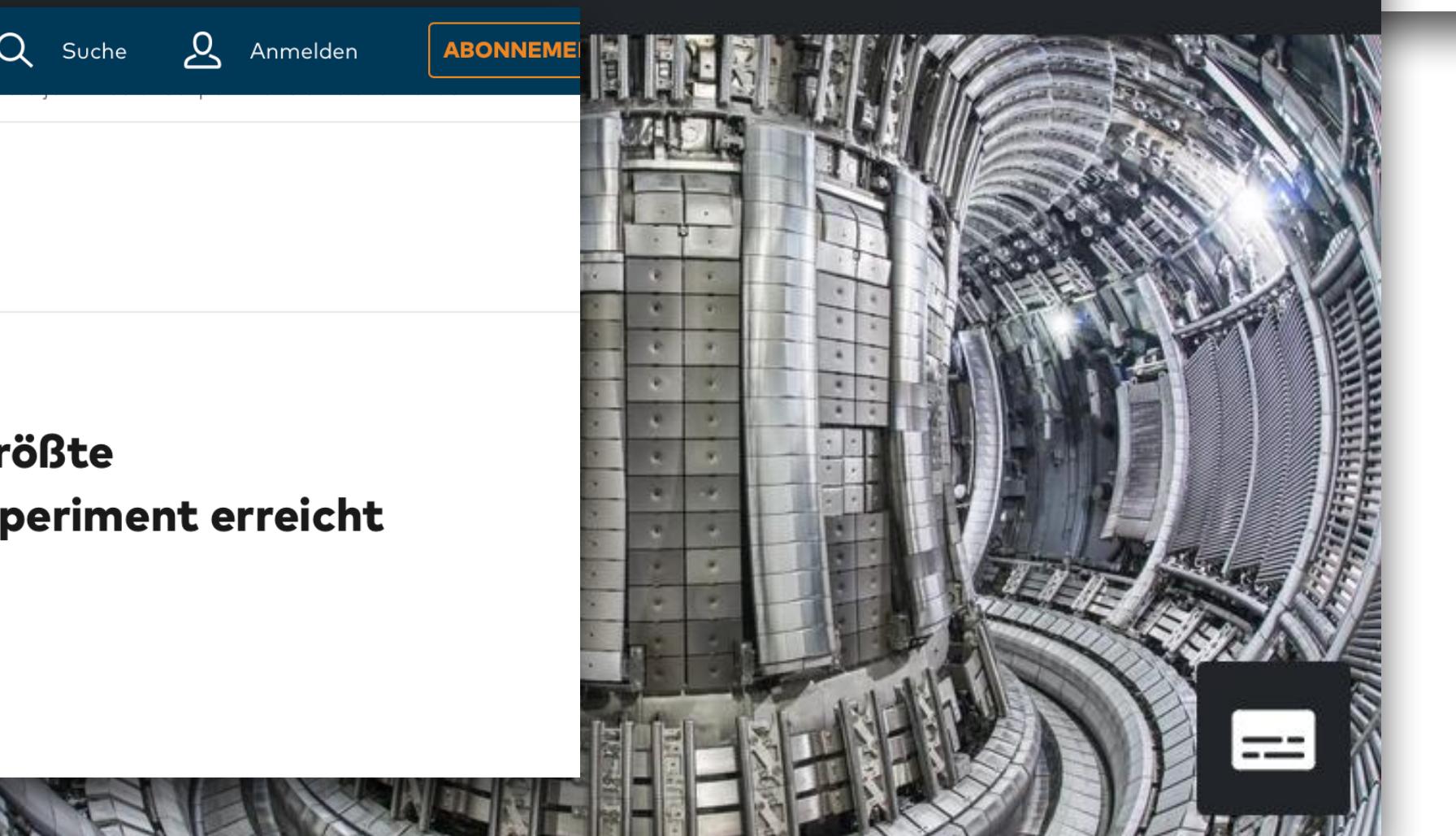
Home > Wirtschaft > Unternehmen > Kernfusion: Wie

KERNFUSION

Wie lässt sich eine Sonne auf der Erde bauen?

Von Stephan Finsterbusch

15.05.2024, 14:35 Lesezeit: 4 Min.



**ar fusion breakthrough – what is it
now does it work?**

Share ↗



what gives the Sun its ex

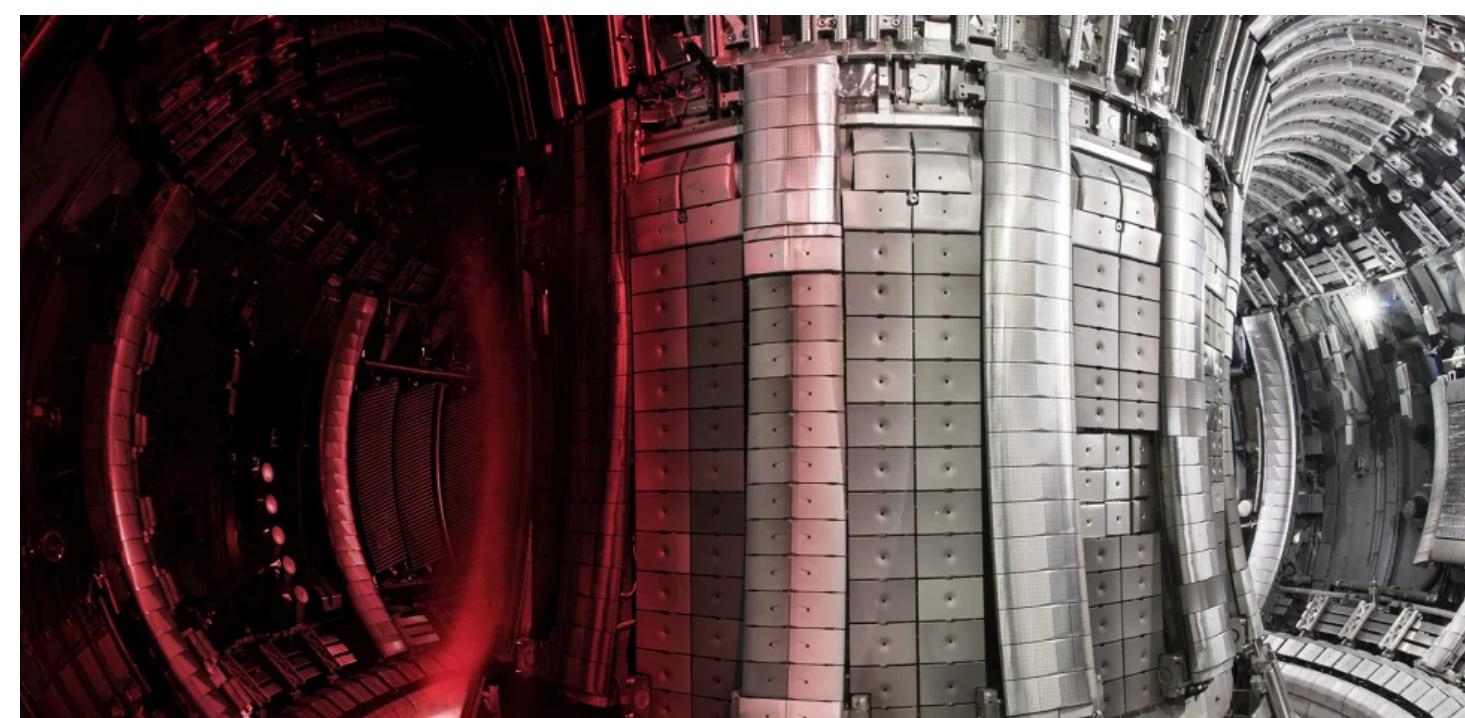
CNN World

World / Climate

**Scientists just set a nuclear fusion record in a s
toward unleashing the limitless, clean energy s**

By Angela Dewan, CNN

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

[f](#) [X](#) [✉](#) [🔗](#)

Maxim Mai — RAC-Bonn/Outreach — 06.08.2024

KERNFUSION

I. Grundidee (Wie?)

Quantenphysik, Kernreaktionen, ...

II. Motivation (Warum?)

Energiedichte, Klimawandel, Sicherheit, ...

III. Umsetzung und Hindernisse (Wann?)

Plasmastabilität, Treibstoffverfügbarkeit, ITER, ...

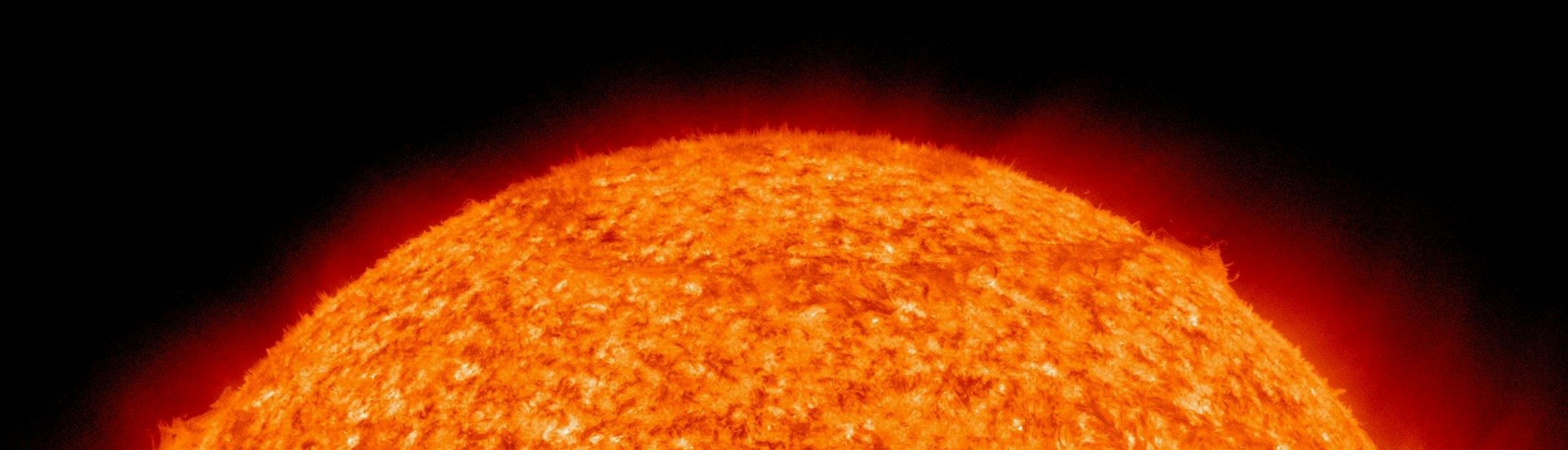
IV. Zusammenfassung



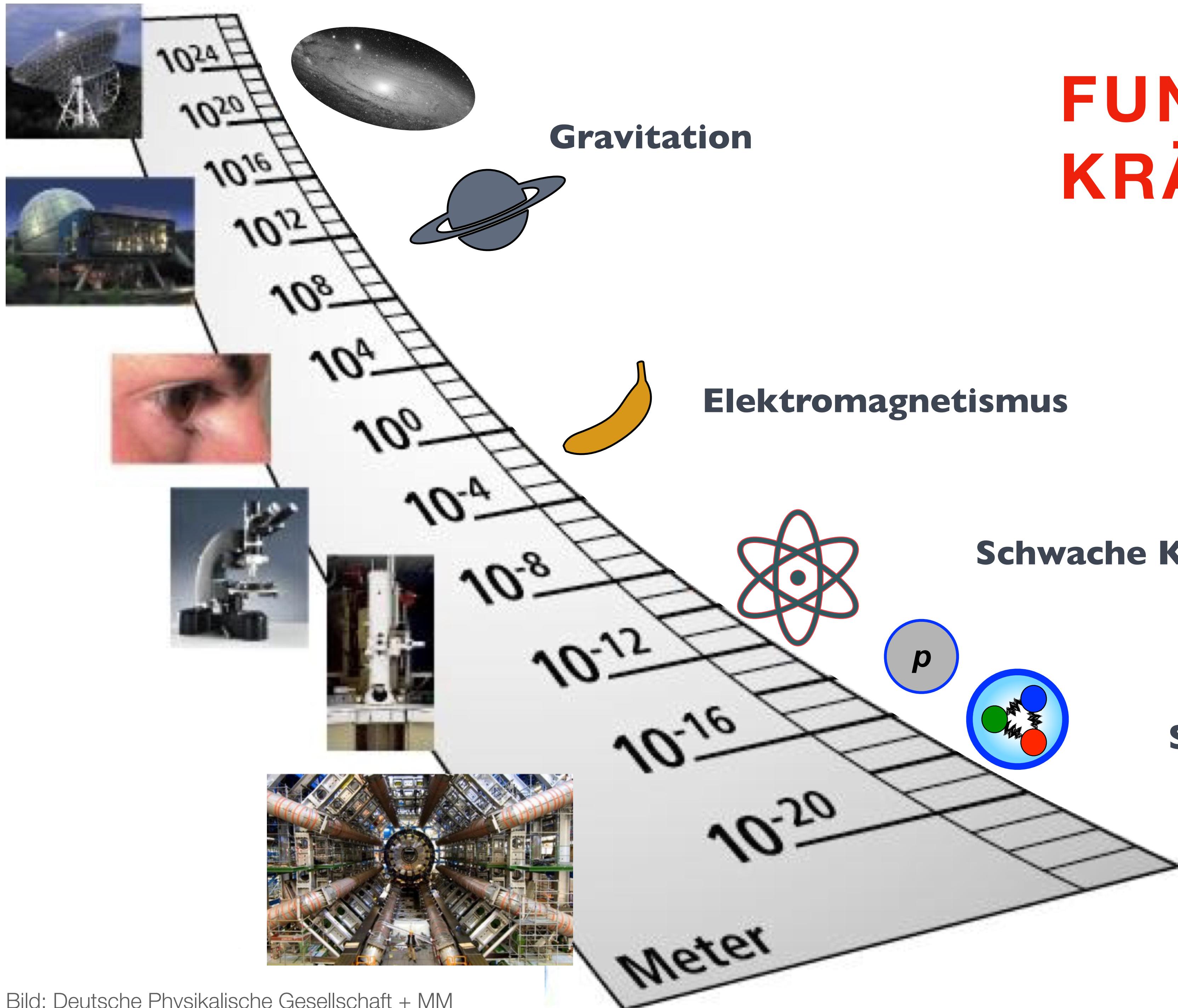
KERNFUSION

Grundidee (Wie?)

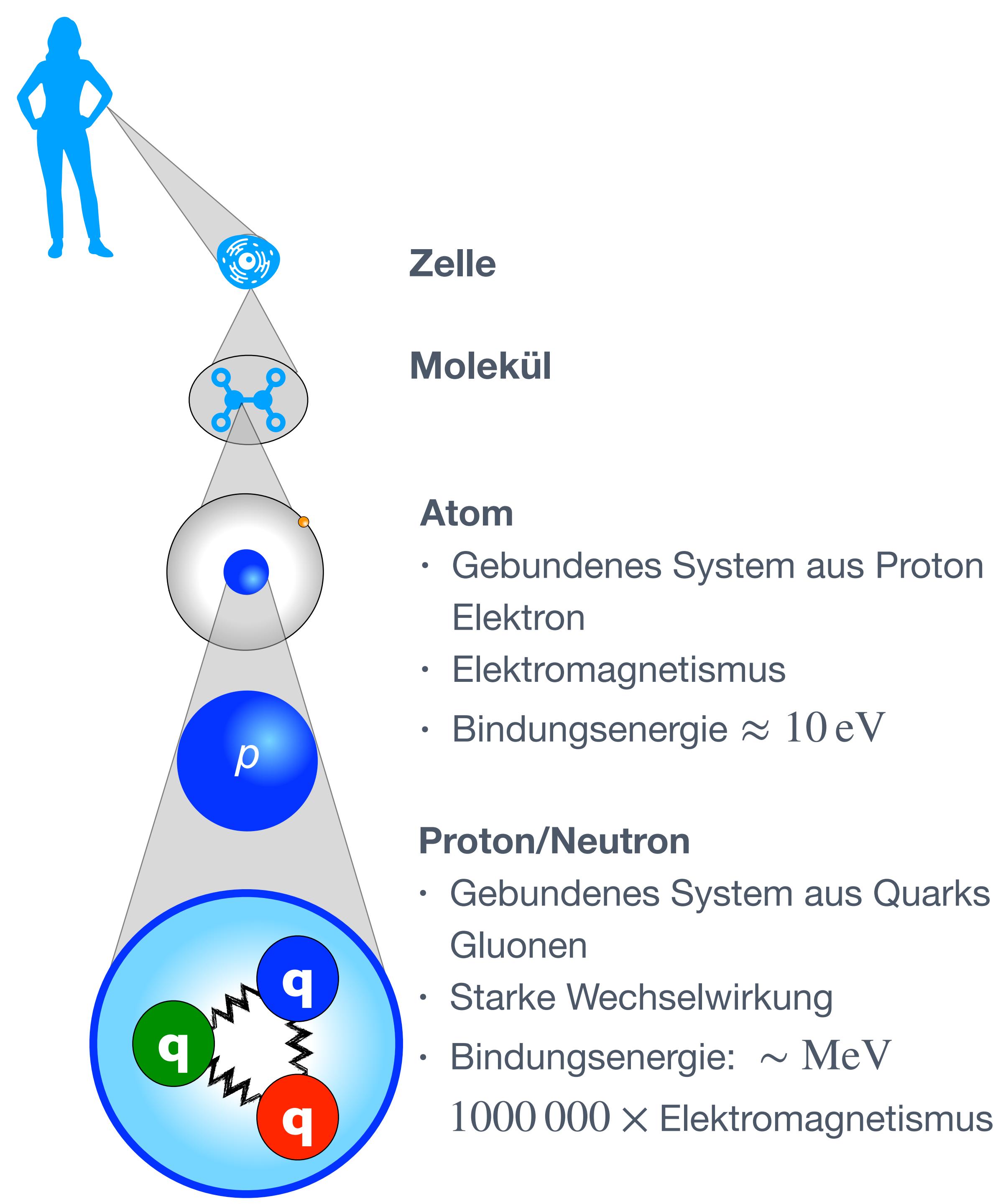
Quantenphysik, Kernreaktionen, ...



FUNDAMENTALE KRÄFTE DER NATUR



BAUSTEINE DER MATERIE



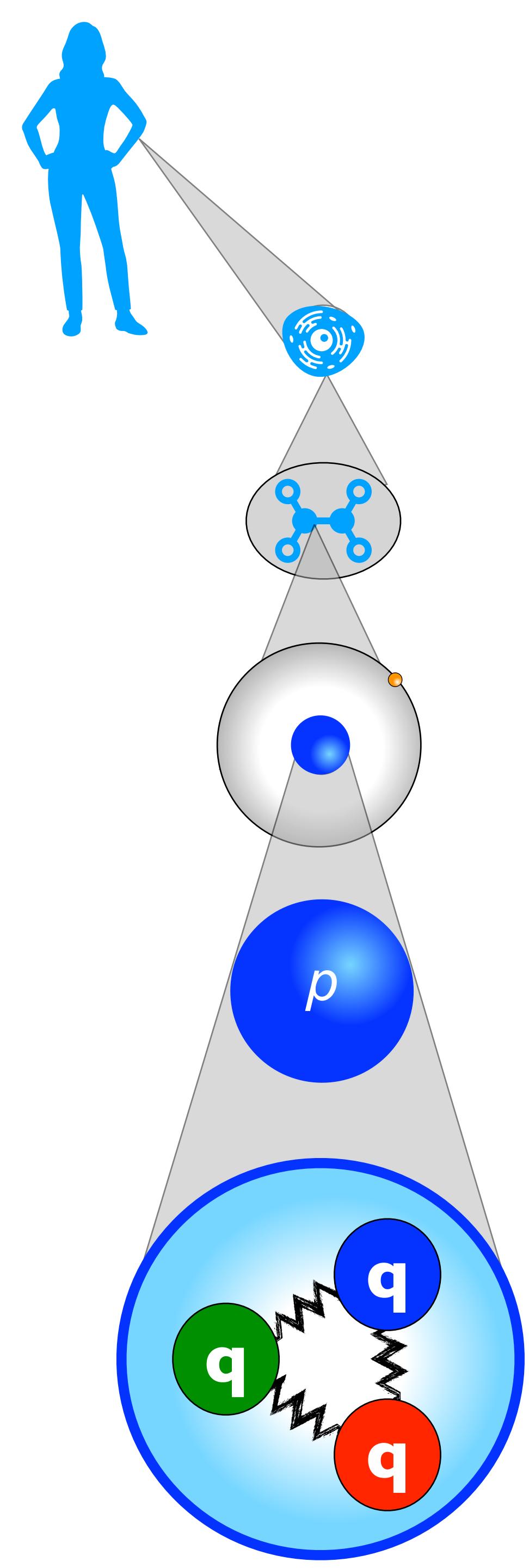
Atom

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

Proton/Neutron

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

EXPERIMENTE



Zelle 1665

Molekül 1811

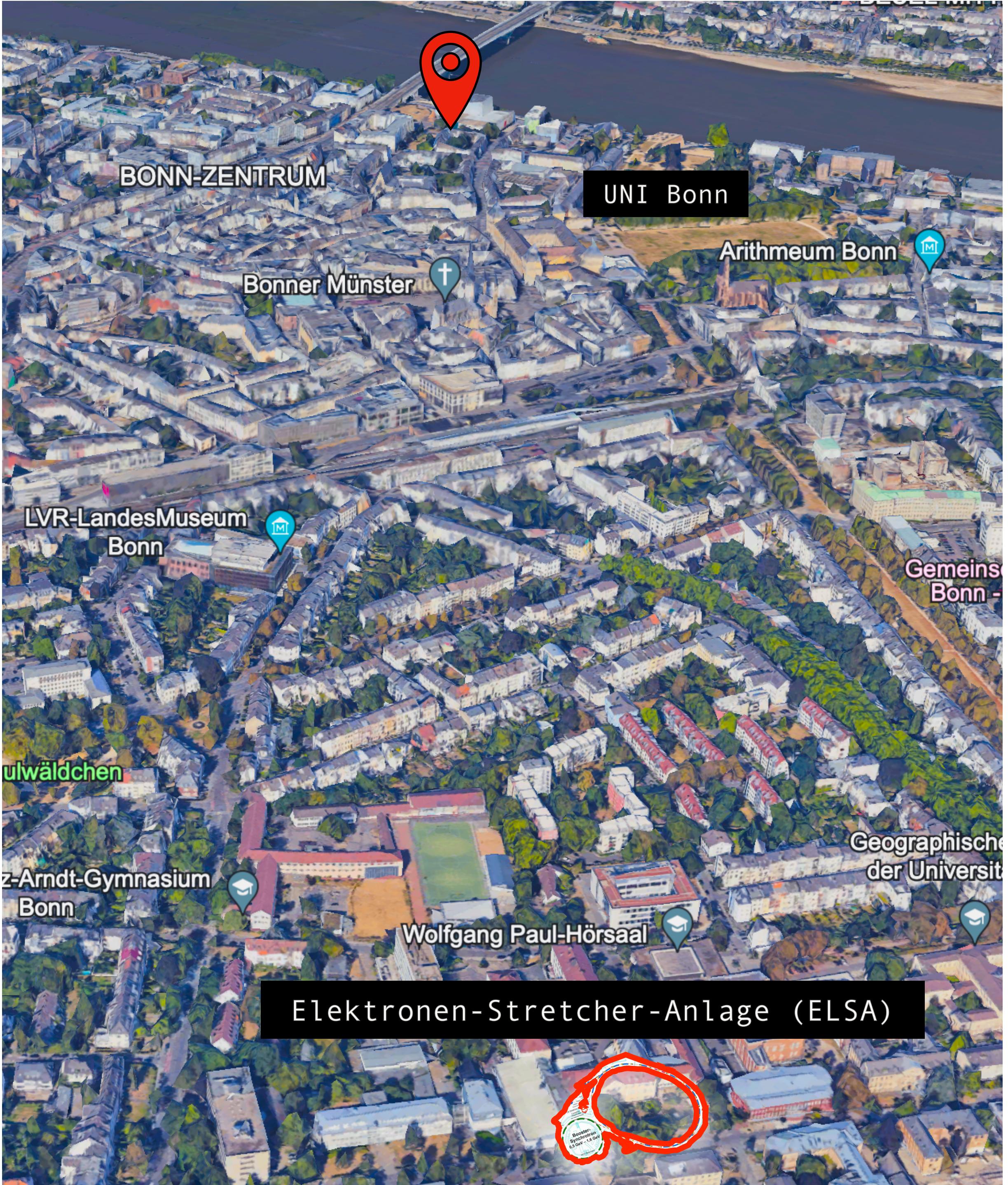
Atom 1897

- 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

Kleinere Teilchen brauchen größere
“Mikroskope”

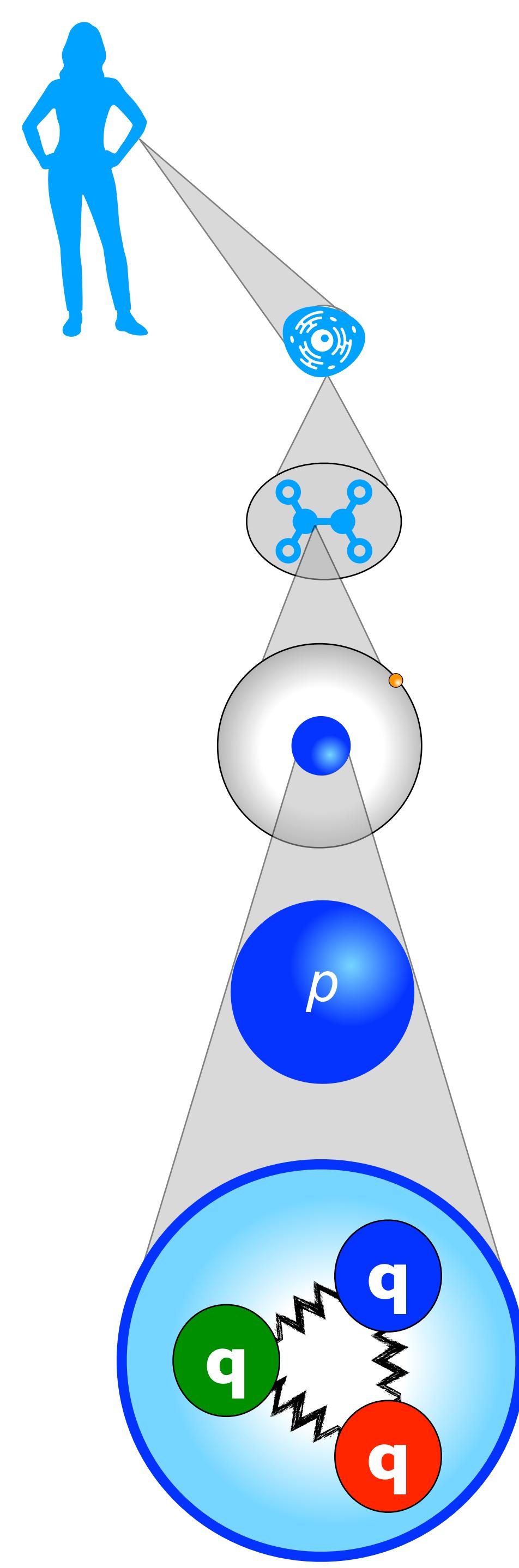


EXPERIMENTE

Kleinere Teilchen brauchen größere
“Mikroskope”

Moderne Beschleuniger:

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



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: $\sim \text{MeV}$
 $1000\,000 \times \text{Elektromagnetismus}$

THEORETISCHE GRUNDPRINZIPIEN

Spezielle Relativitätstheorie

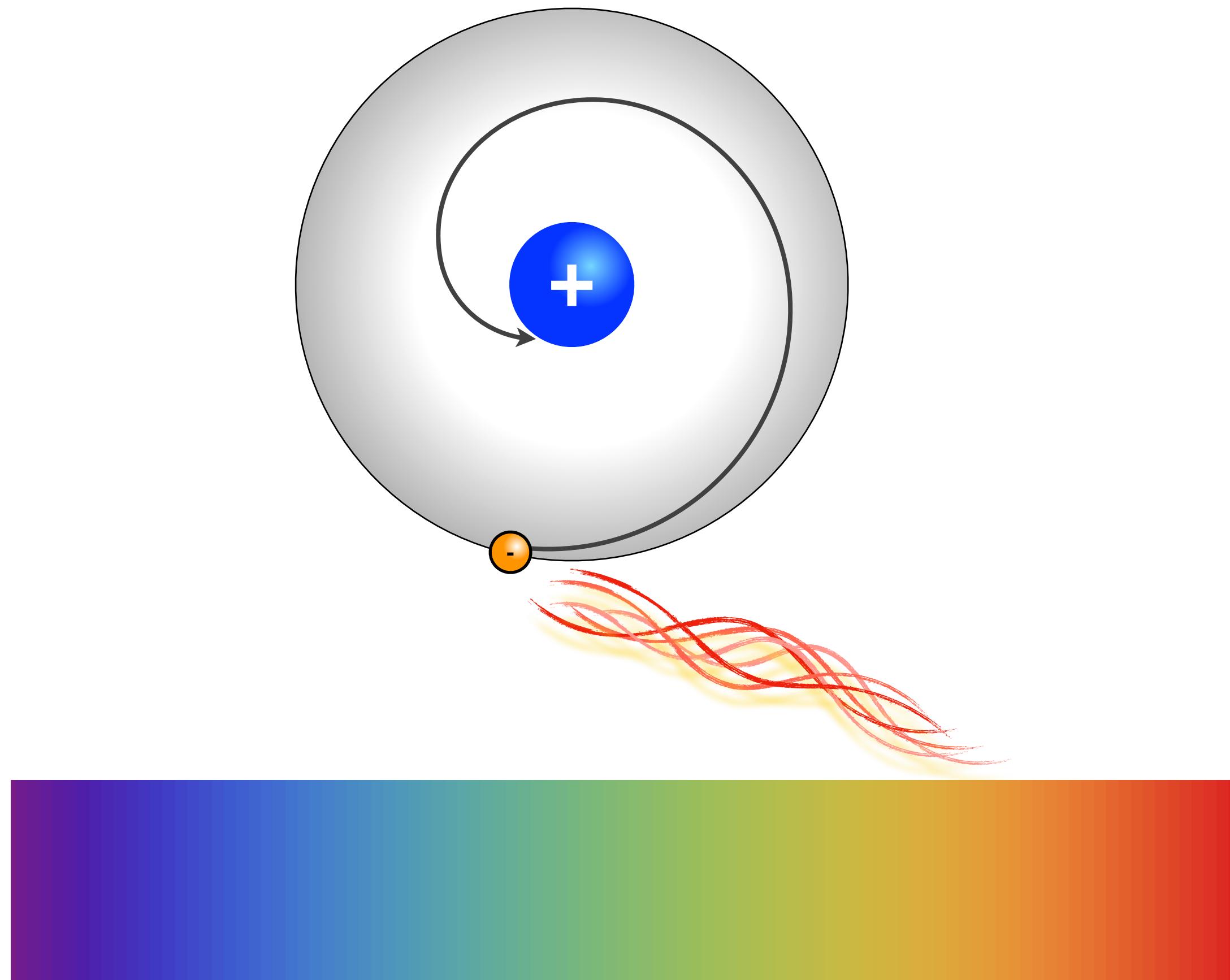
- Energie-Masse-Äquivalenz
- $E = mc^2$

Quantenmechanik

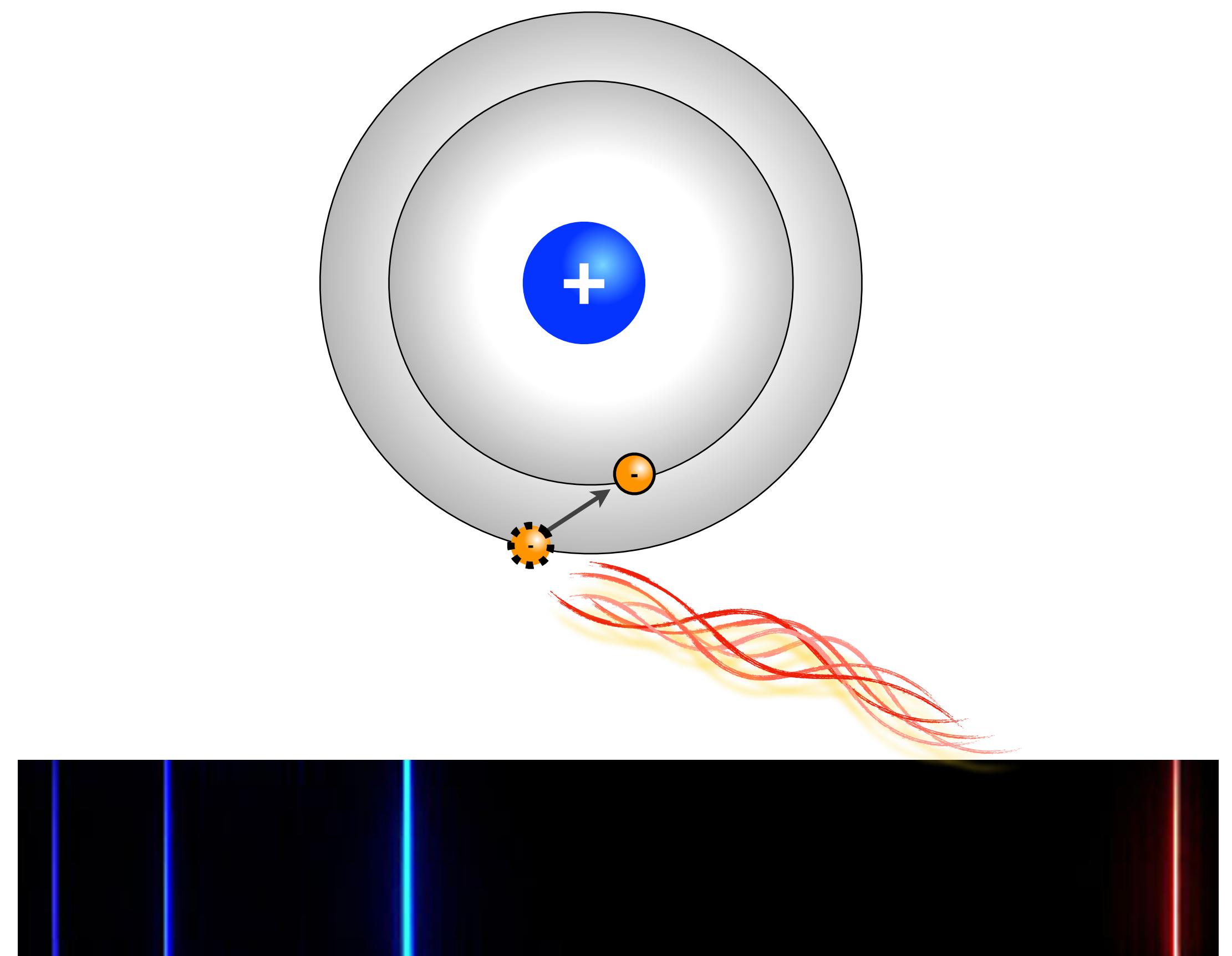
- diskrete Energiezustände der subatomaren Welt
- Neue Sprache der Natur

QUANTEN

Kontinuierliche Abstrahlung (klassisch)

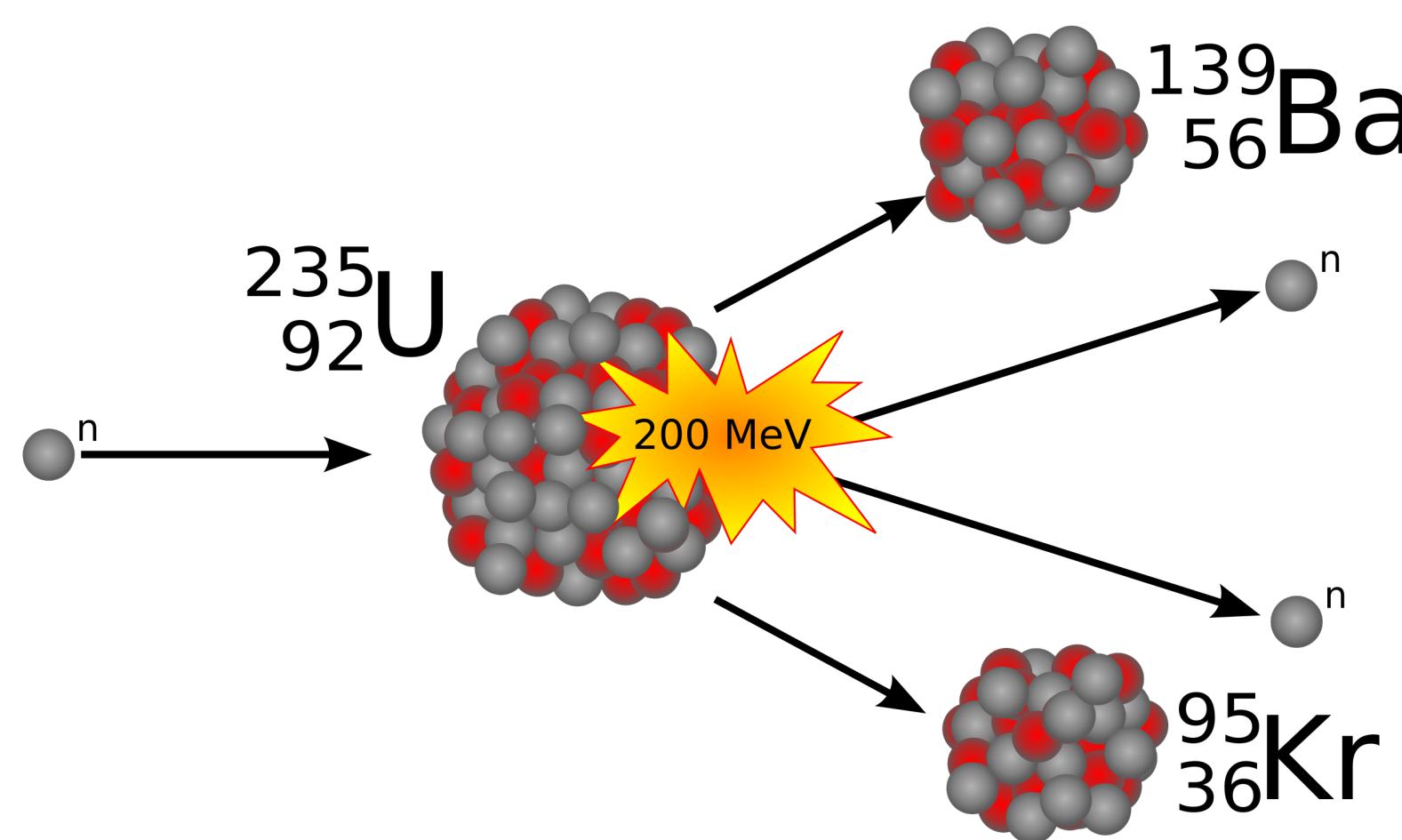


Diskrete Abstrahlung (Quanten)

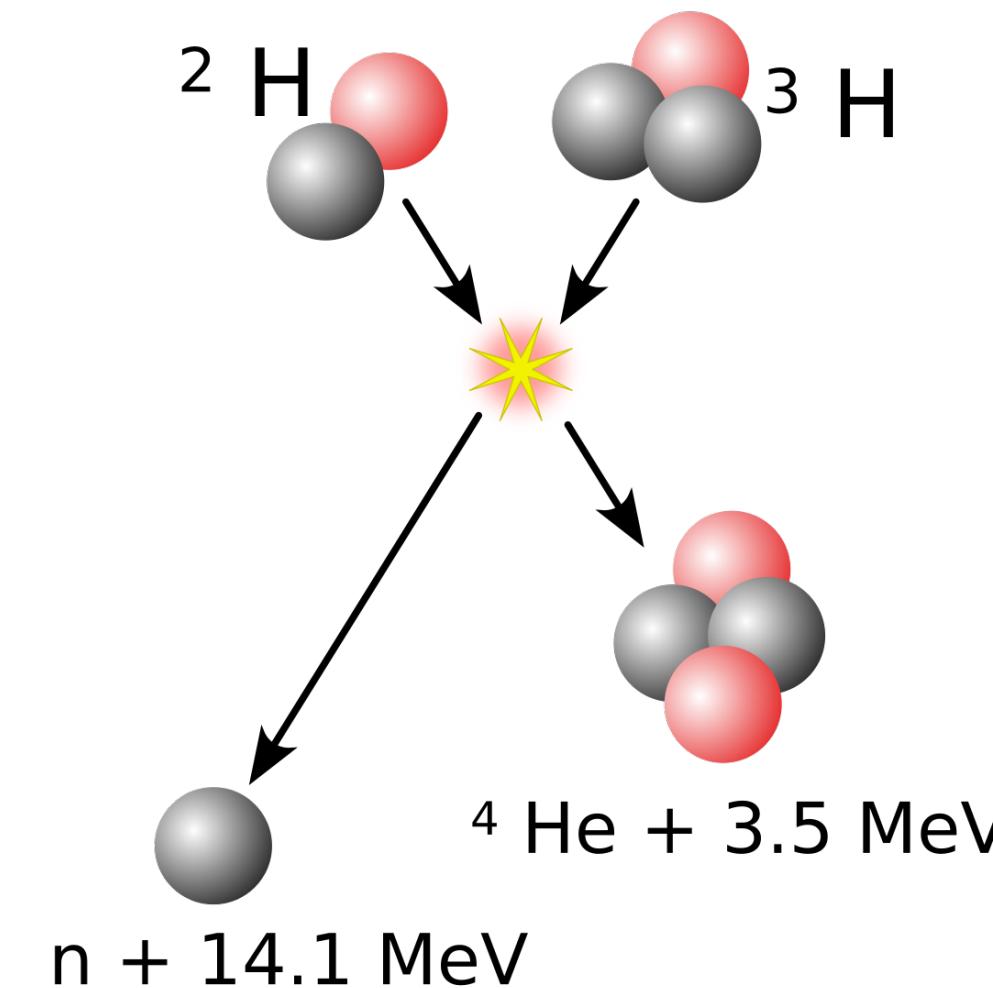


KERNENERGIE

KERNSPALTUNG [1]



KERNFUSION



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

die Endprodukte sind leichter als die Anfangsprodukte [2]

Massendifferenz → Energieüberschuss → Dampfturbine → Strom

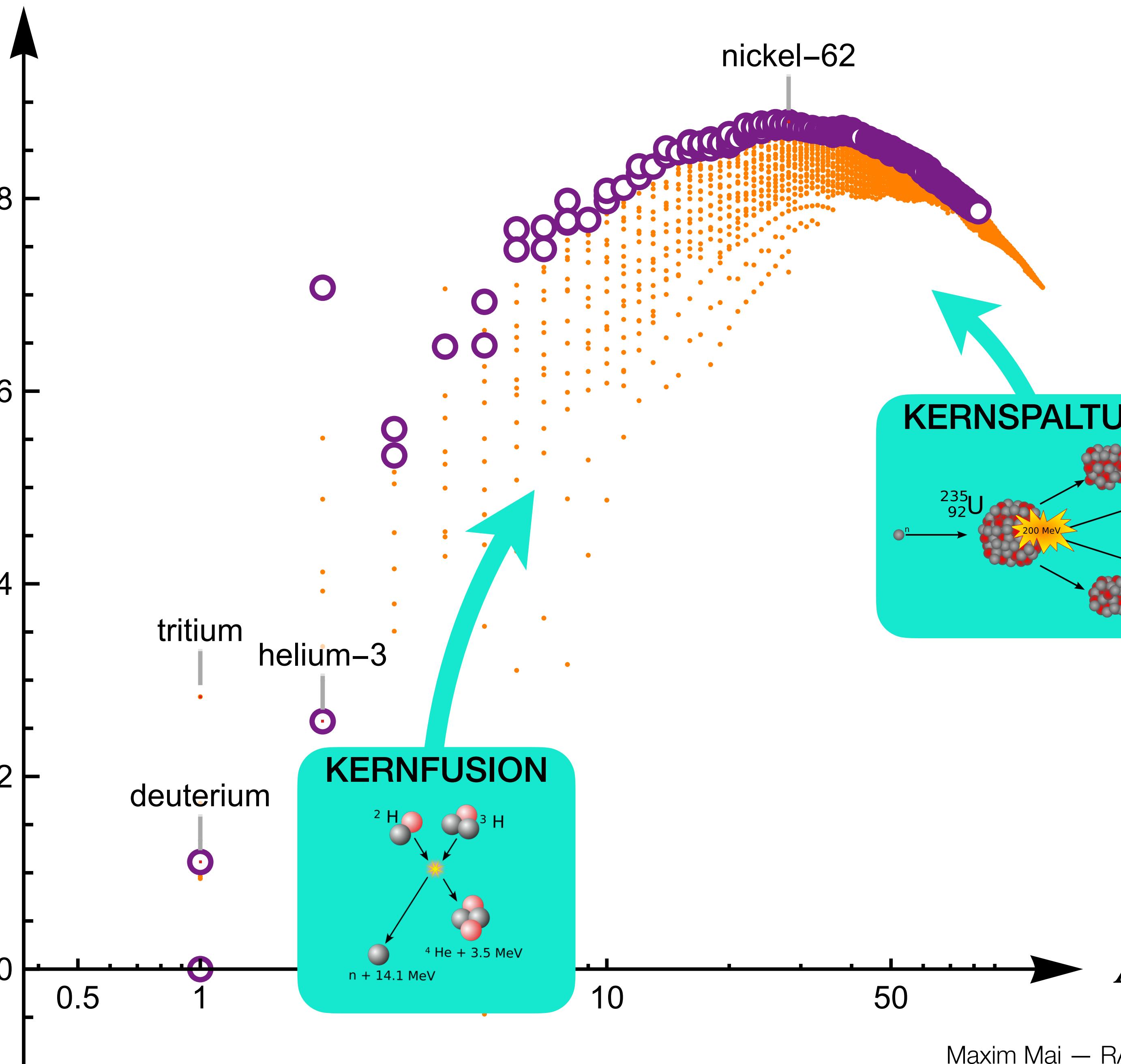
Proton

Neutron

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

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

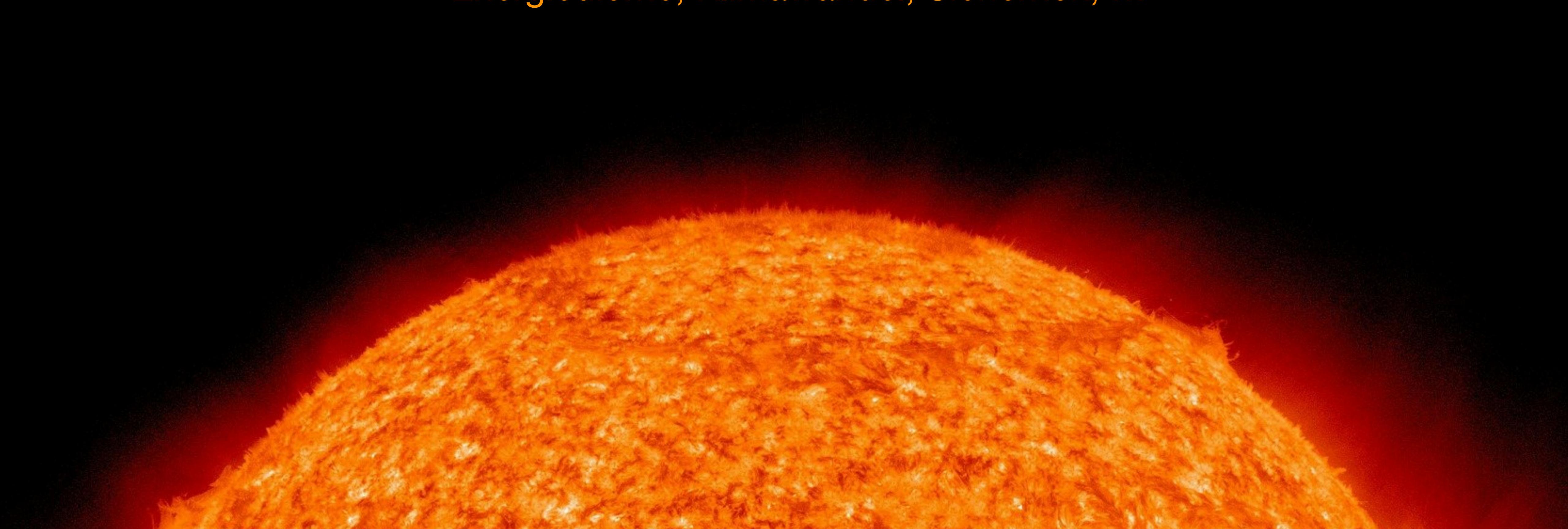
$(B/A)/\text{MeV}$



KERNFUSION

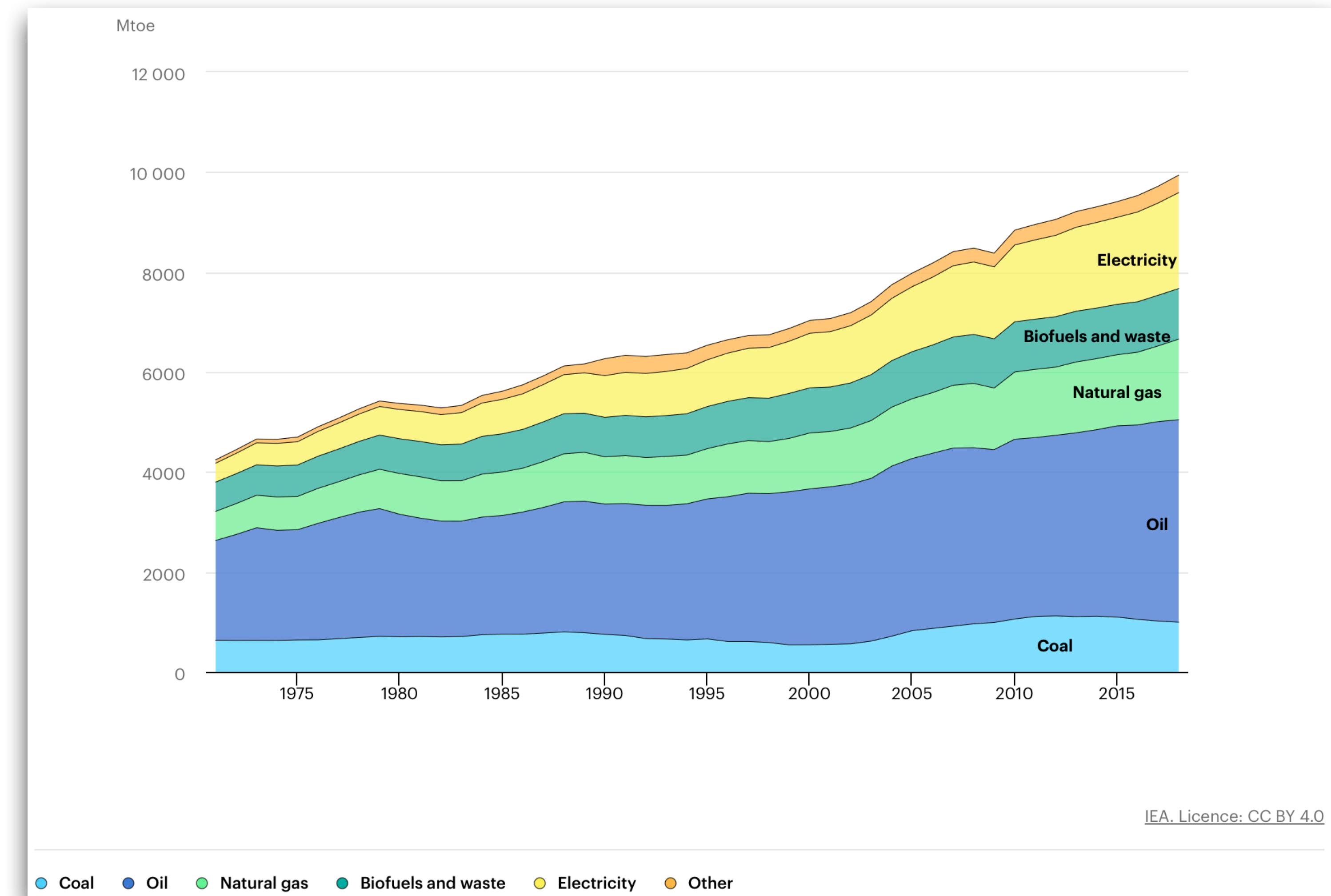
Motivation (Warum?)

Energiedichte, Klimawandel, Sicherheit, ...

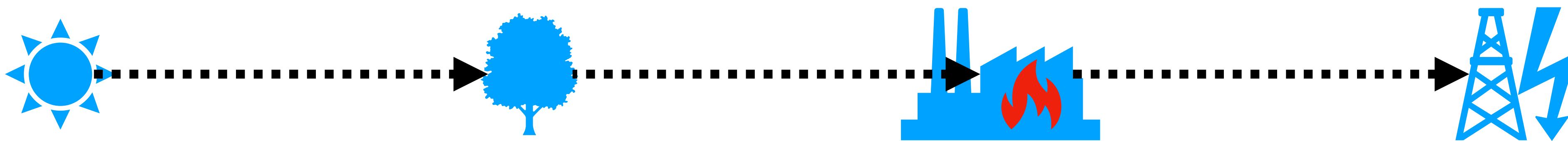


ENERGIEBEDARF DER ERDE

- Verdoppelt seit 1970s
- Meistens aus fossilen Quellen



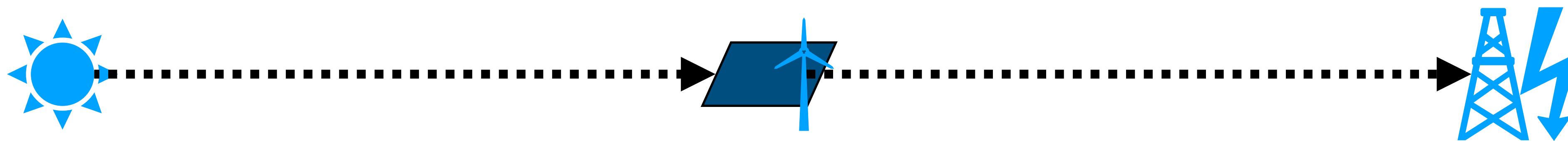
MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



Fossile Treibstoffe

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

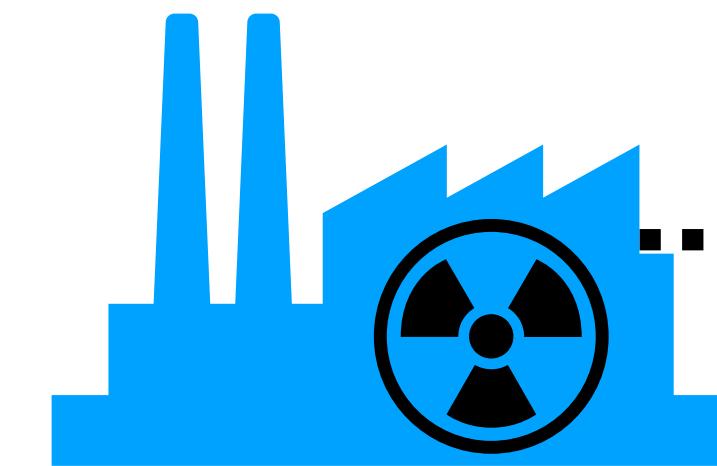
MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



Erneuerbare (Solar/Wind/...)

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

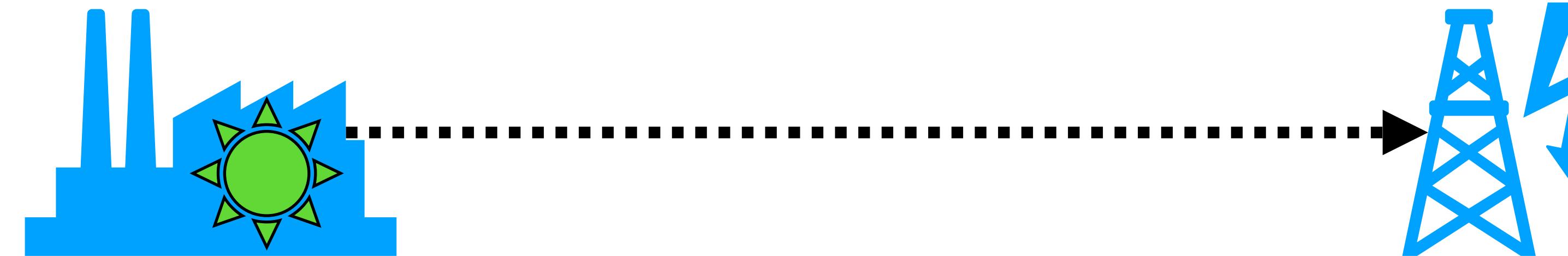
MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



Kernkraft (Spaltung)

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

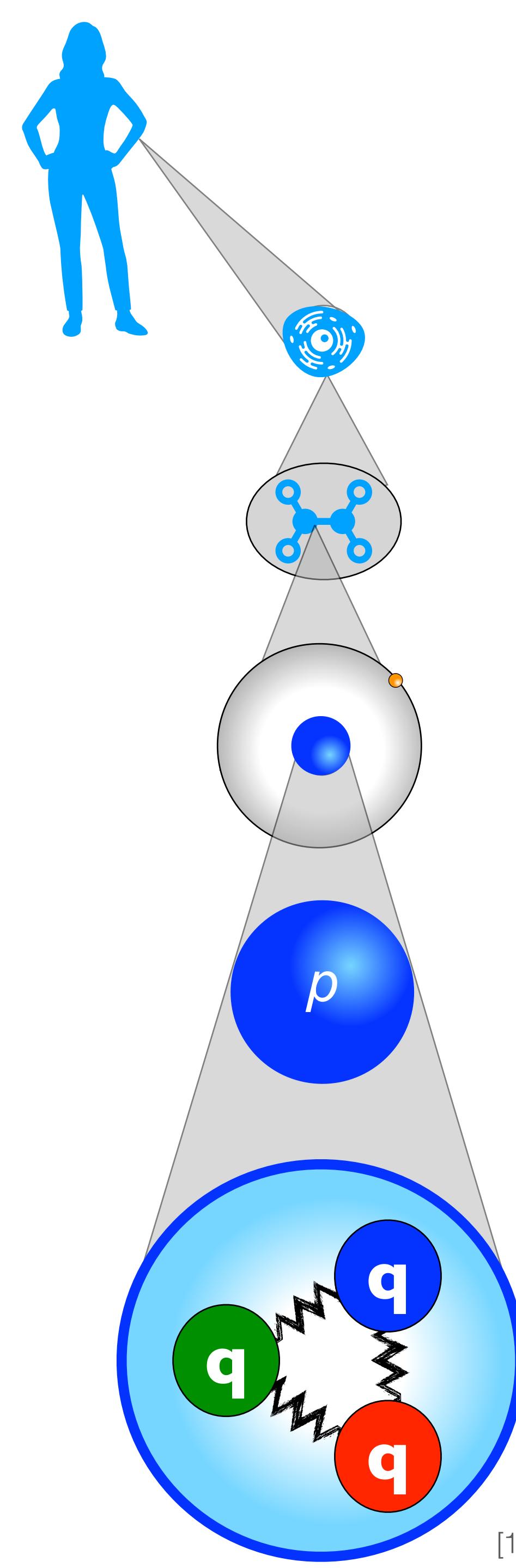
MÖGLICHE ENERGIEQUELLEN



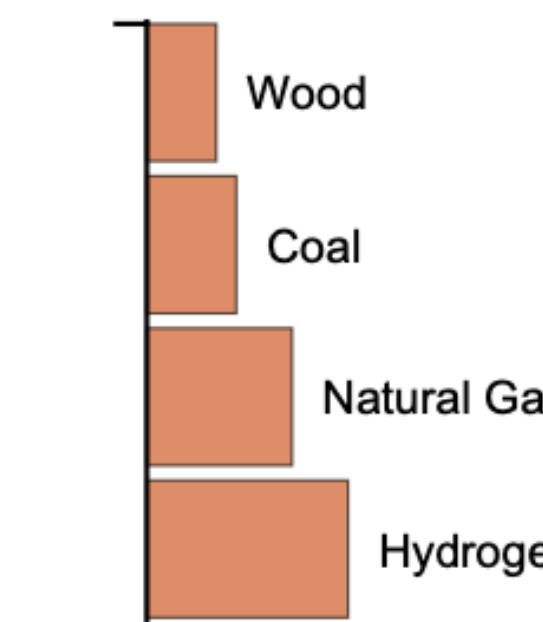
Kernfusion

Bekannt/Eingesetzt:	???
Einsatzmöglichkeiten	Flexibel
Restverfügbarkeit	Unbegrenzt
Gefahren/Probleme	komplexe Technologie

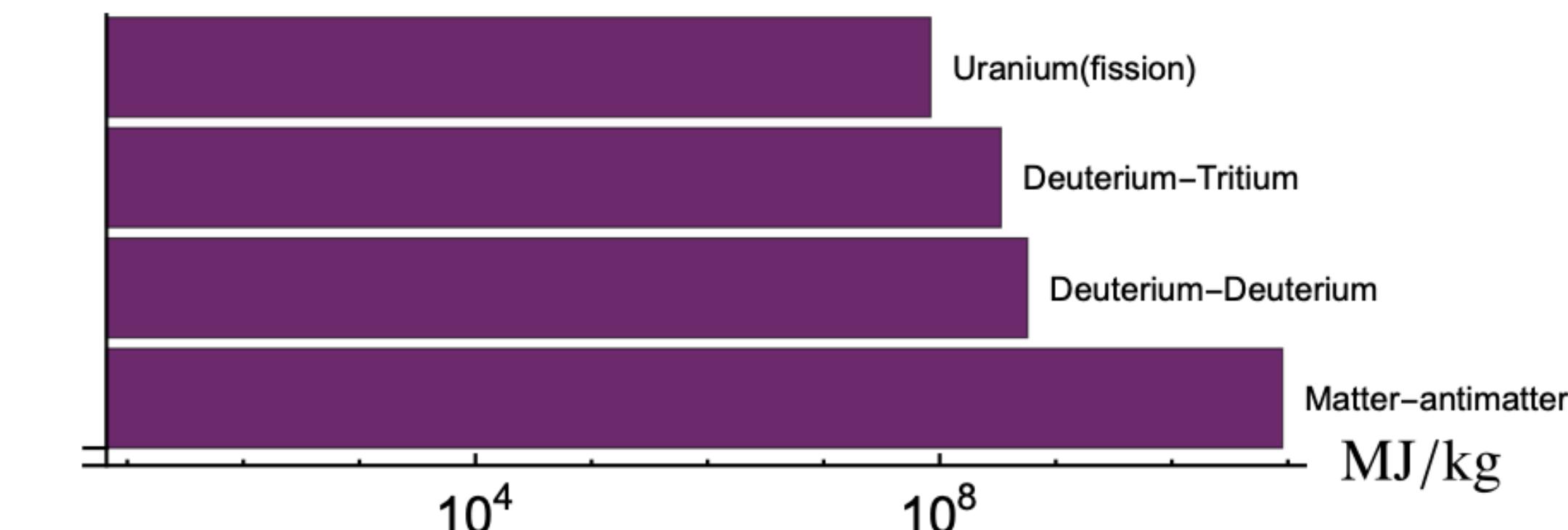
ENERGIEDICHTE



Chemische Energieträger^[1]



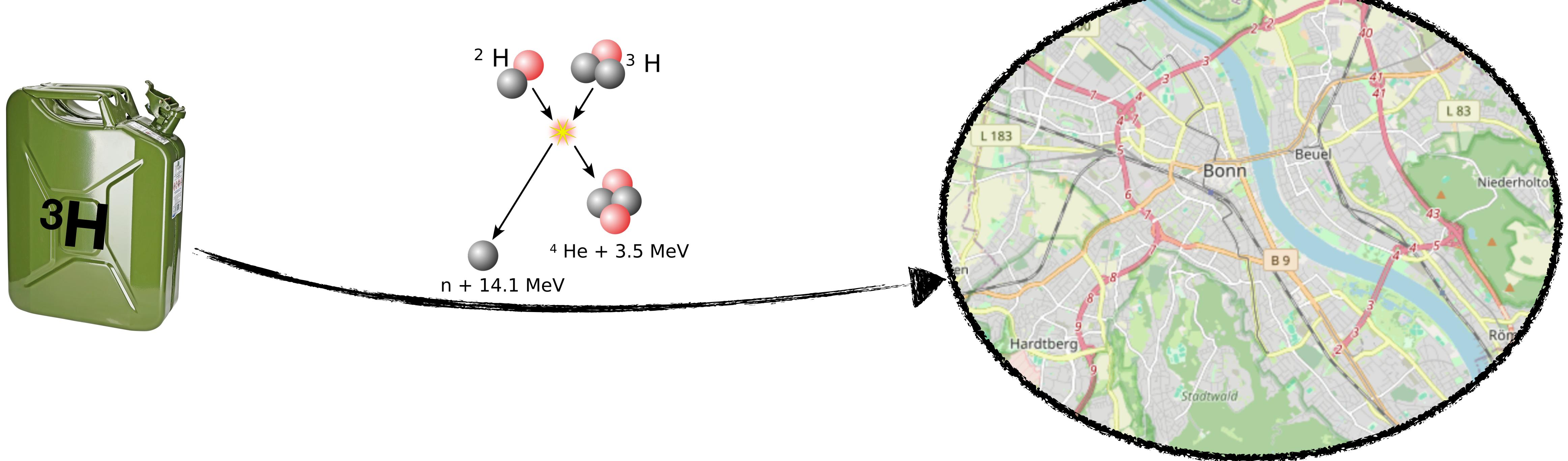
Kernfusion/spaltung^[1]



... Gute Nachrichten

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

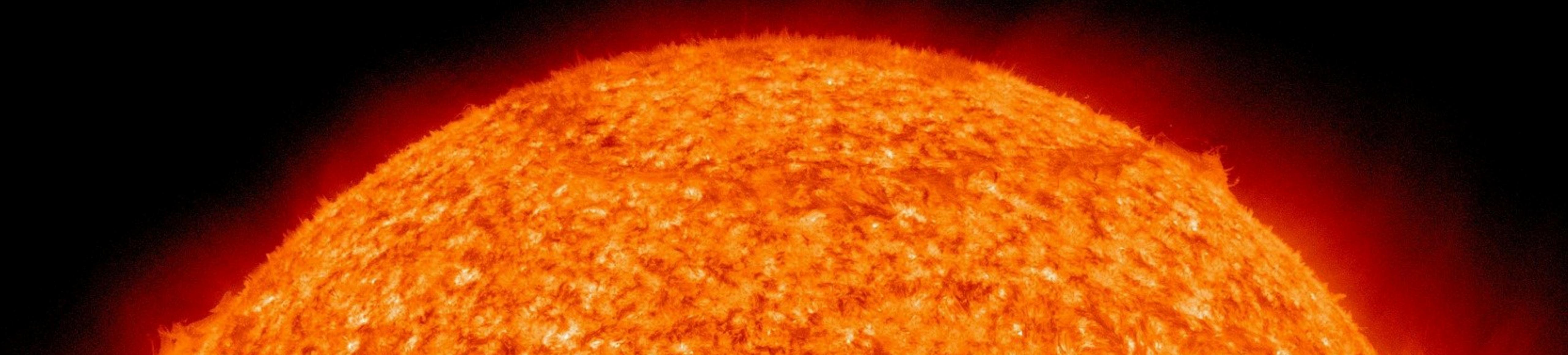
Jahresstromverbrauch (Bonn) $\sim 16\text{kg Tritium } ({}^3\text{H})$



KERNFUSION

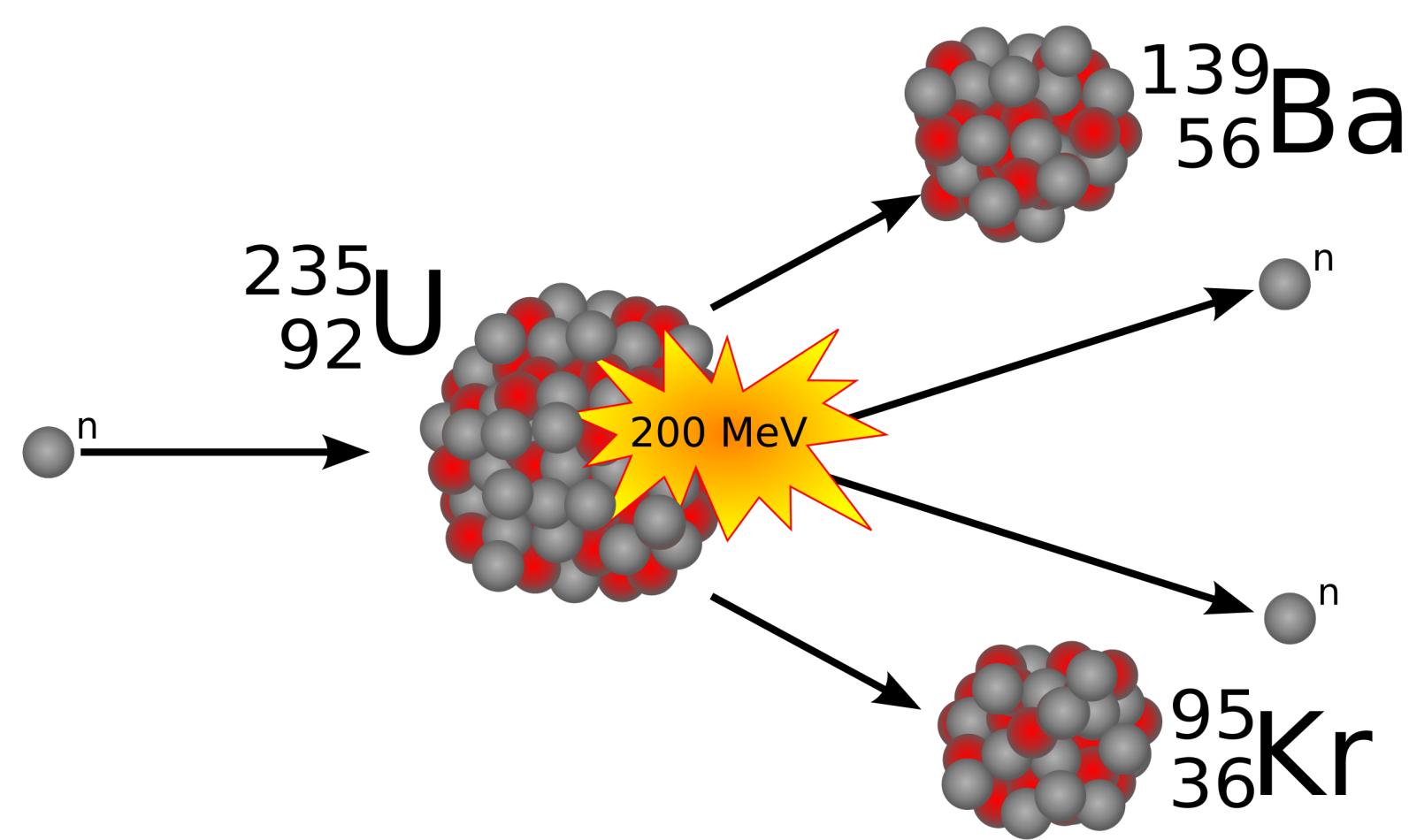
Umsetzung und Hindernisse (Wann?)

Plasmastabilität, Treibstoffverfügbarkeit, ITER, ...



UMSETZUNG?

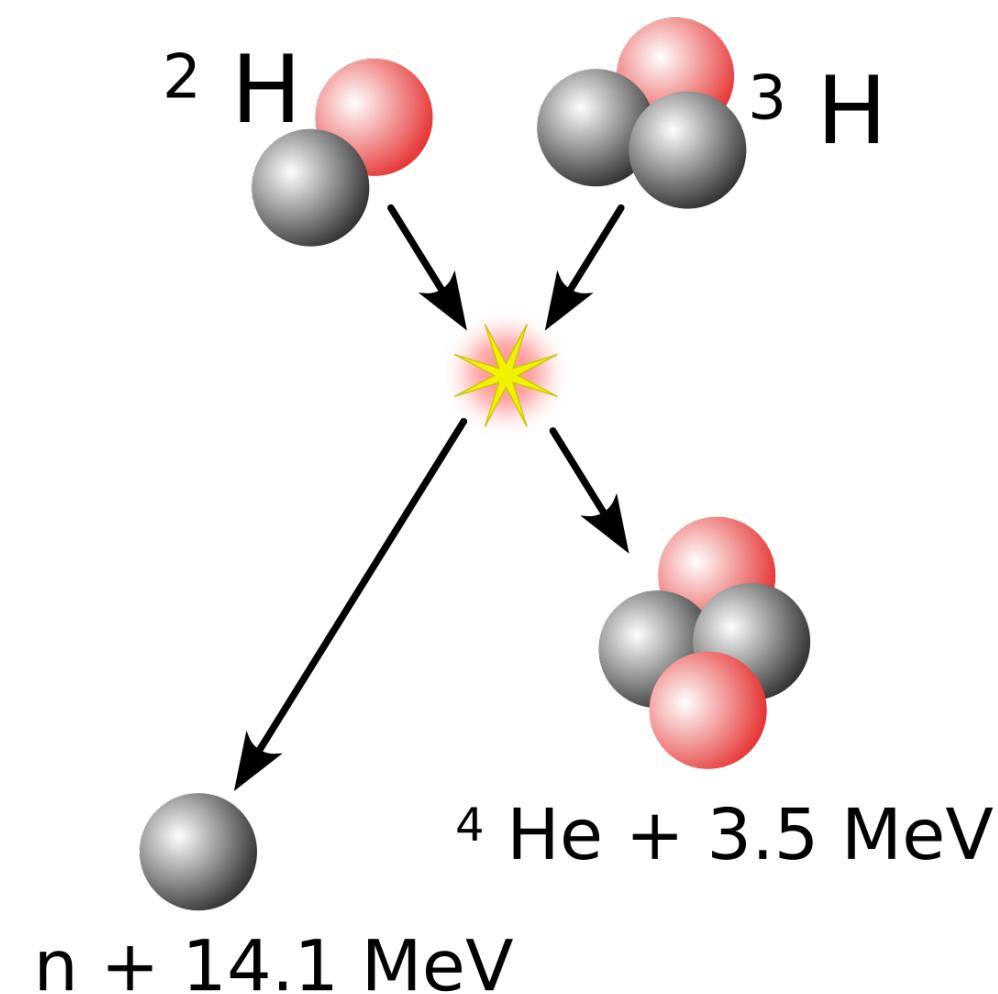
KERNSPALTUNG



Unkontrolliert: Atomwaffen (1945)

Kontrolliert: Atomkraftwerke (1951)

KERNFUSION



Unkontrolliert: Kernfusionswaffen (1952)

Kontrolliert: Sterne, Fusionskraftwerke (20???)

Proton

Neutron

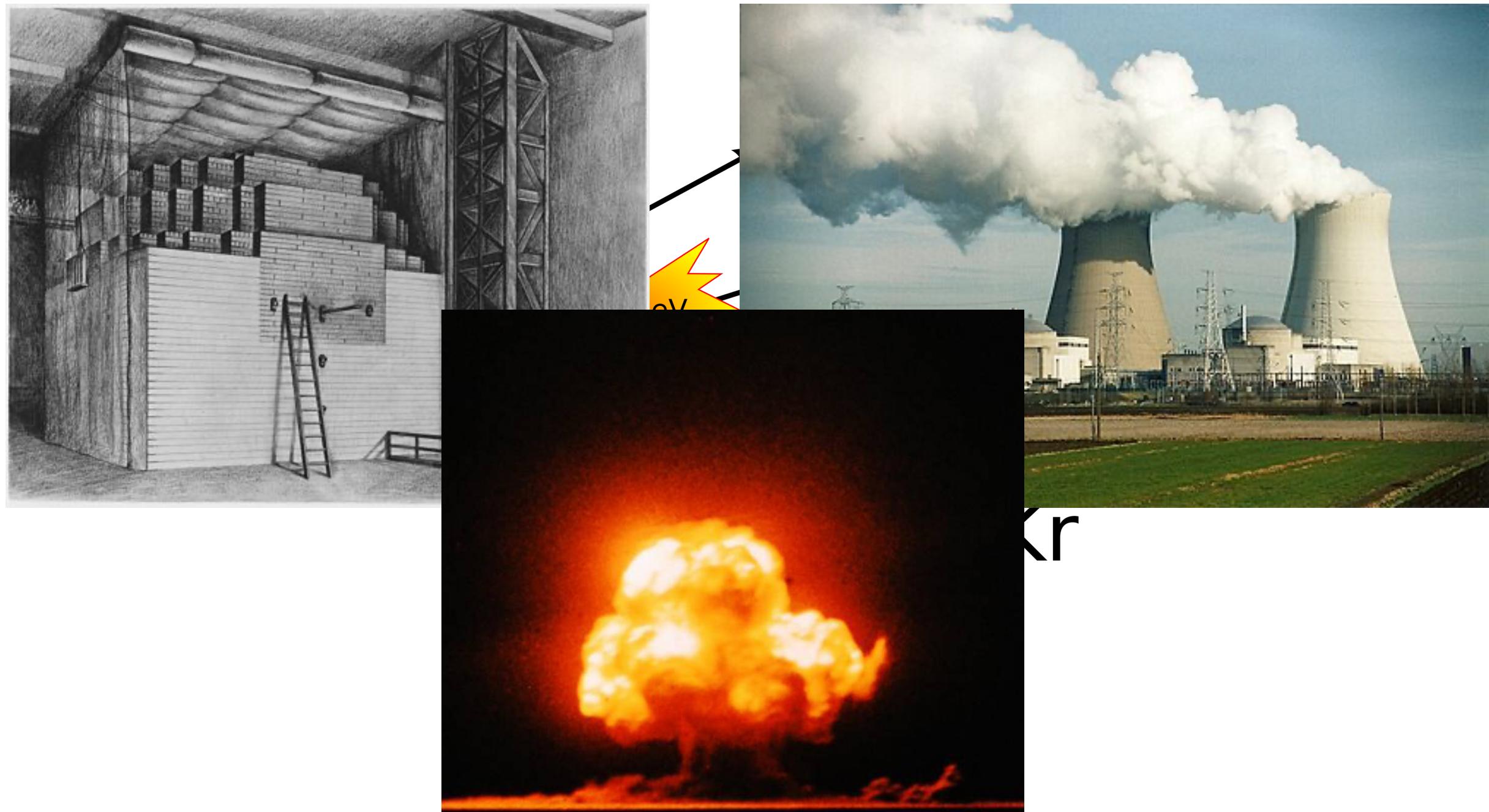
[1] Synonym zu Kernenergie, Atomenergie, Atomkraft, Kernkraft oder Nuklearenergie

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

[Bilder] Wikipedia

UMSETZUNG?

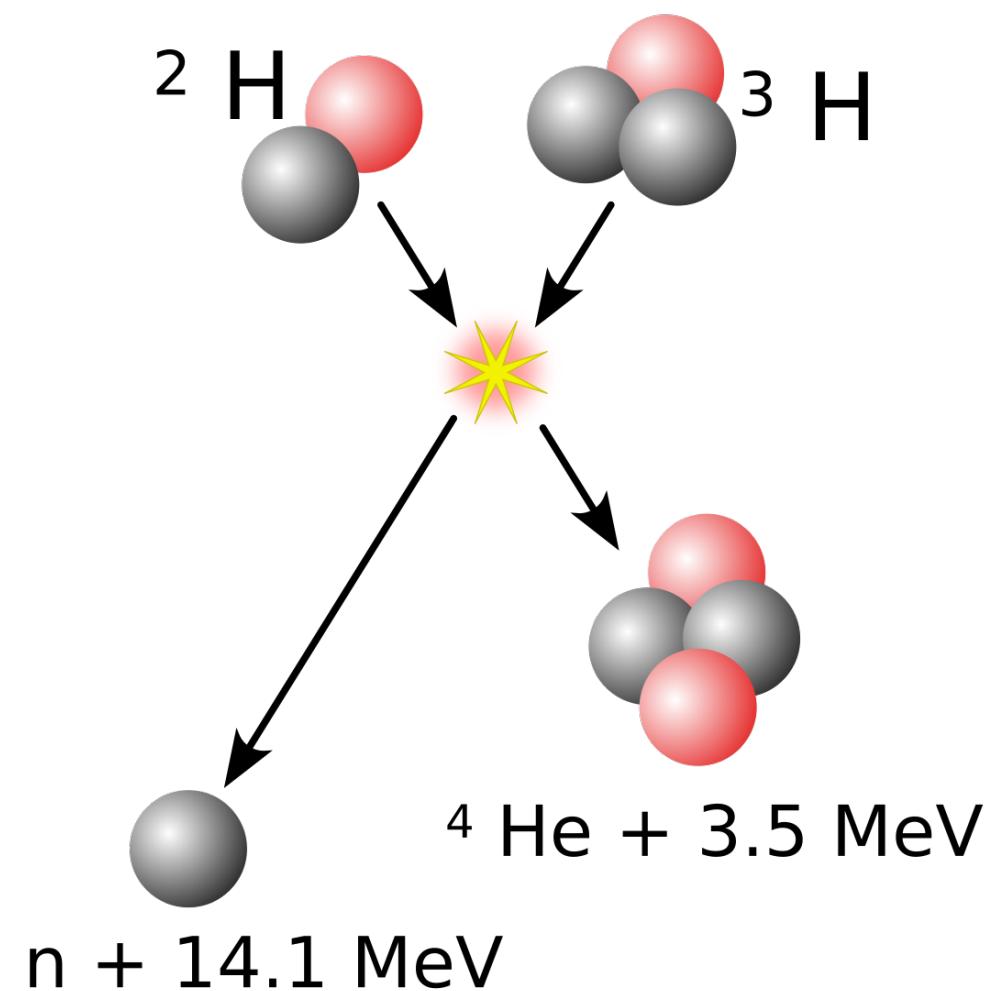
KERNSPALTUNG



Unkontrolliert: Atomwaffen (1945)

Kontrolliert: Atomkraftwerke (1951)

KERNFUSION



Unkontrolliert: Kernfusionswaffen (1952)

Kontrolliert: Sterne, Fusionskraftwerke (20??)

Proton

Neutron

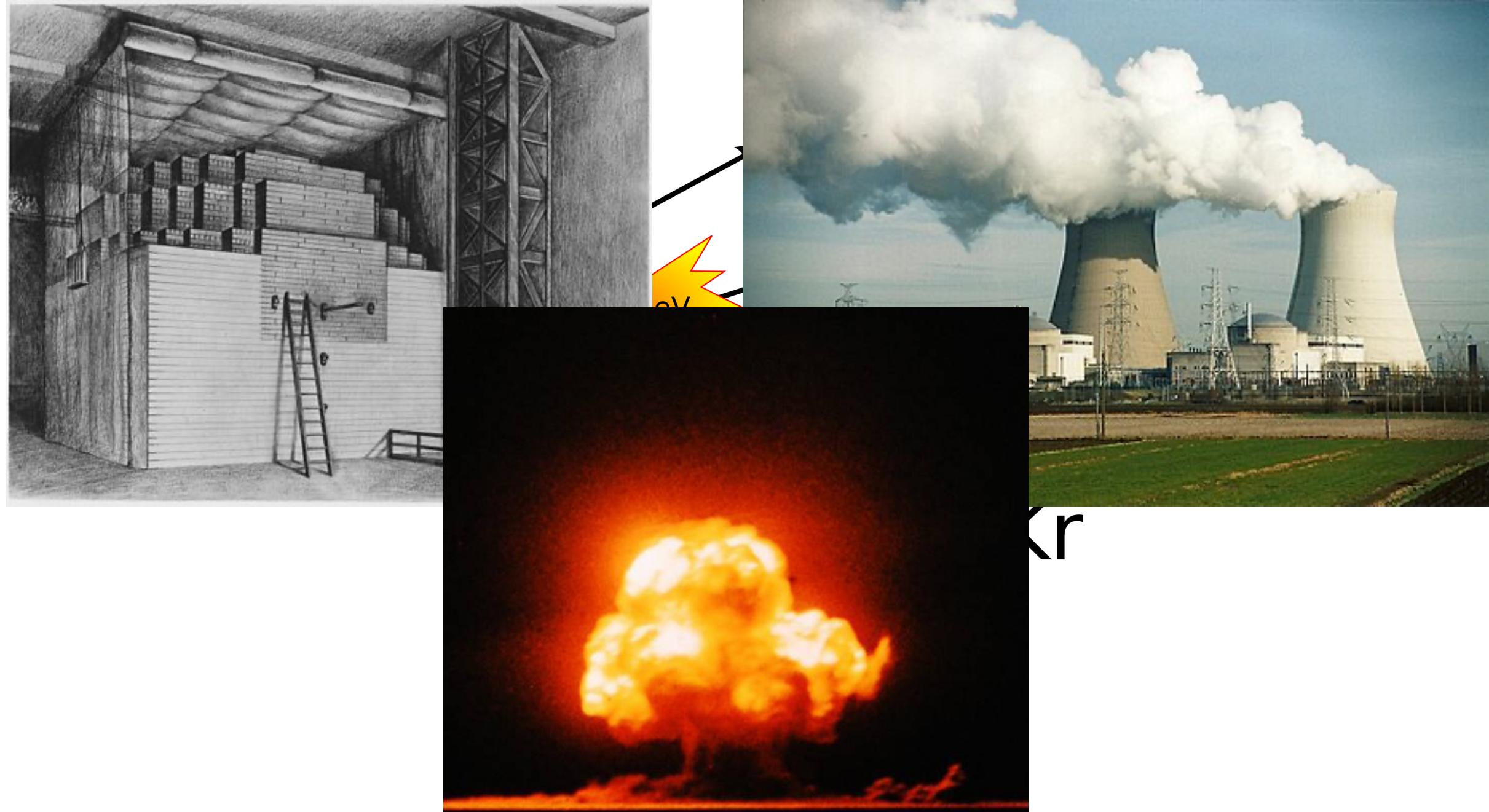
[1] Synonym zu Kernenergie, Atomenergie, Atomkraft, Kernkraft oder Nuklearenergie

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

[Bilder] Wikipedia

UMSETZUNG?

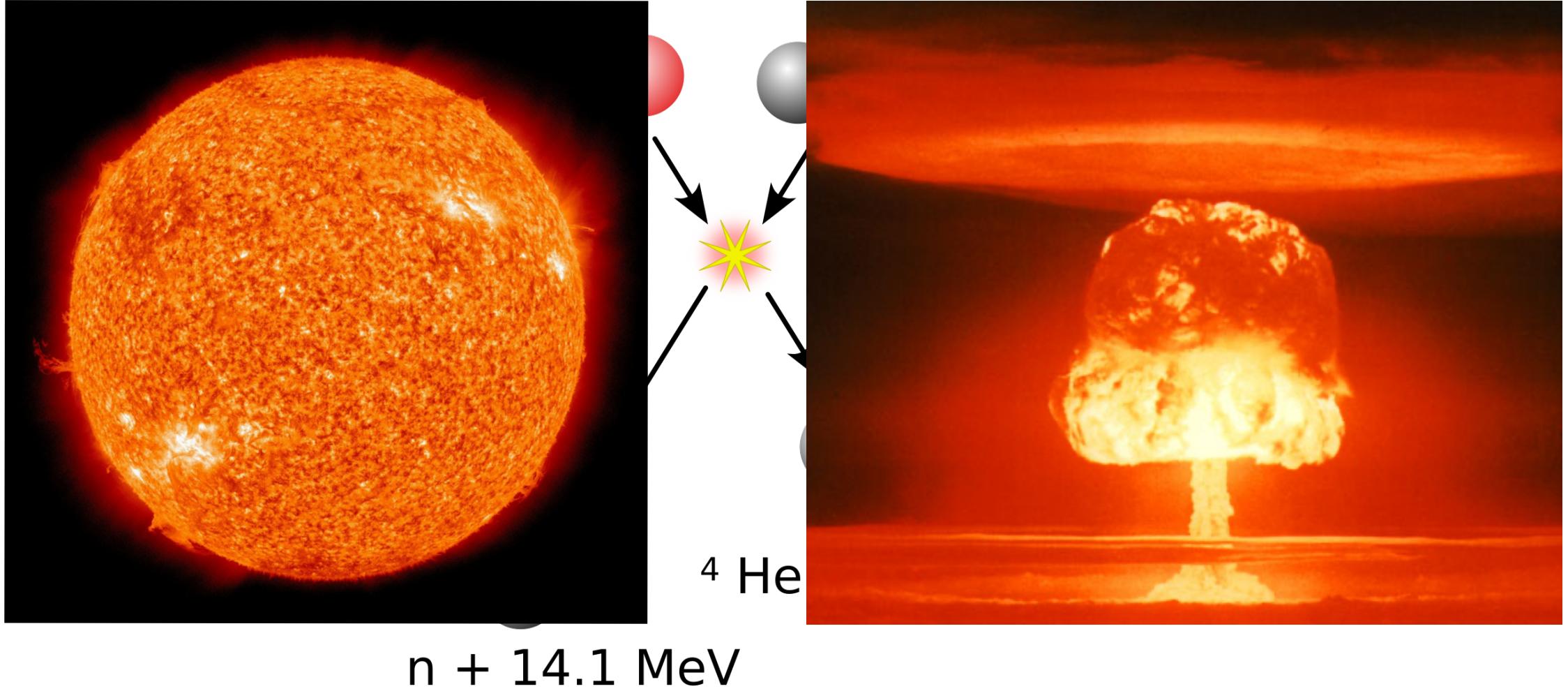
KERNSPALTUNG



Unkontrolliert: Atomwaffen (1945)

Kontrolliert: Atomkraftwerke (1951)

KERNFUSION



Unkontrolliert: Kernfusionswaffen (1952)

Kontrolliert: Sterne, Fusionskraftwerke (20??)

Proton

Neutron

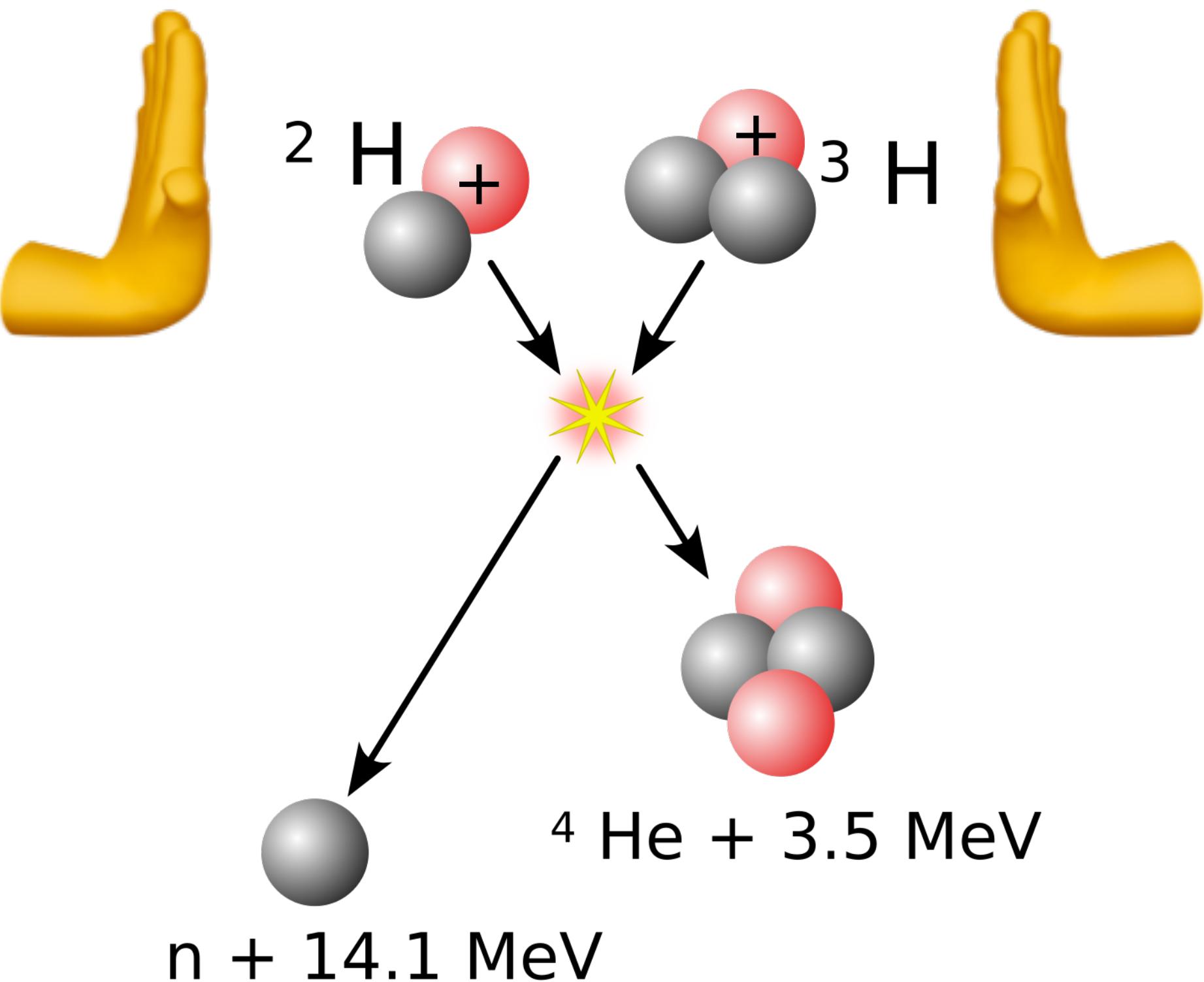
[1] Synonym zu Kernenergie, Atomenergie, Atomkraft, Kernkraft oder Nuklearenergie

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

[Bilder] Wikipedia

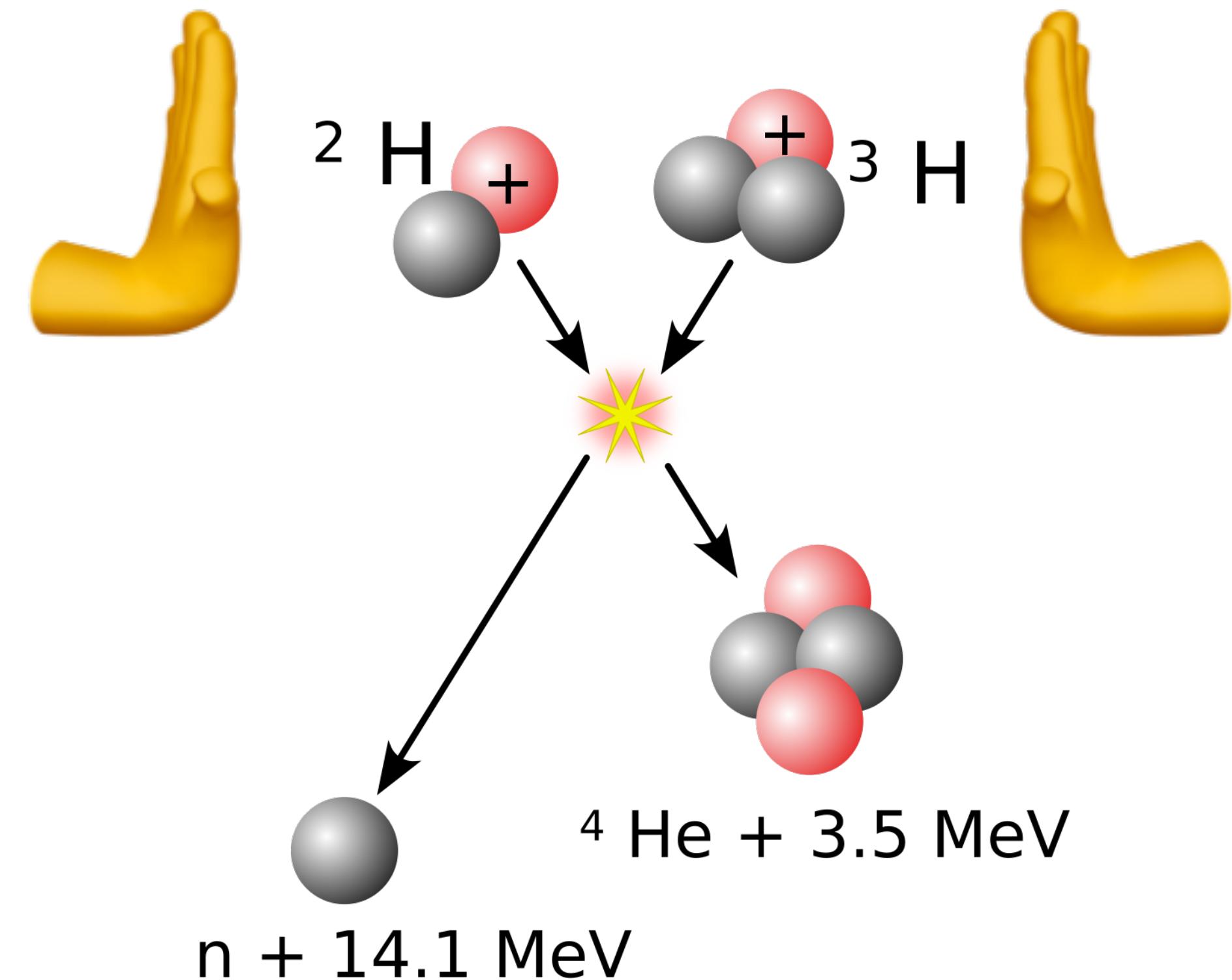
PROBLEM

- 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

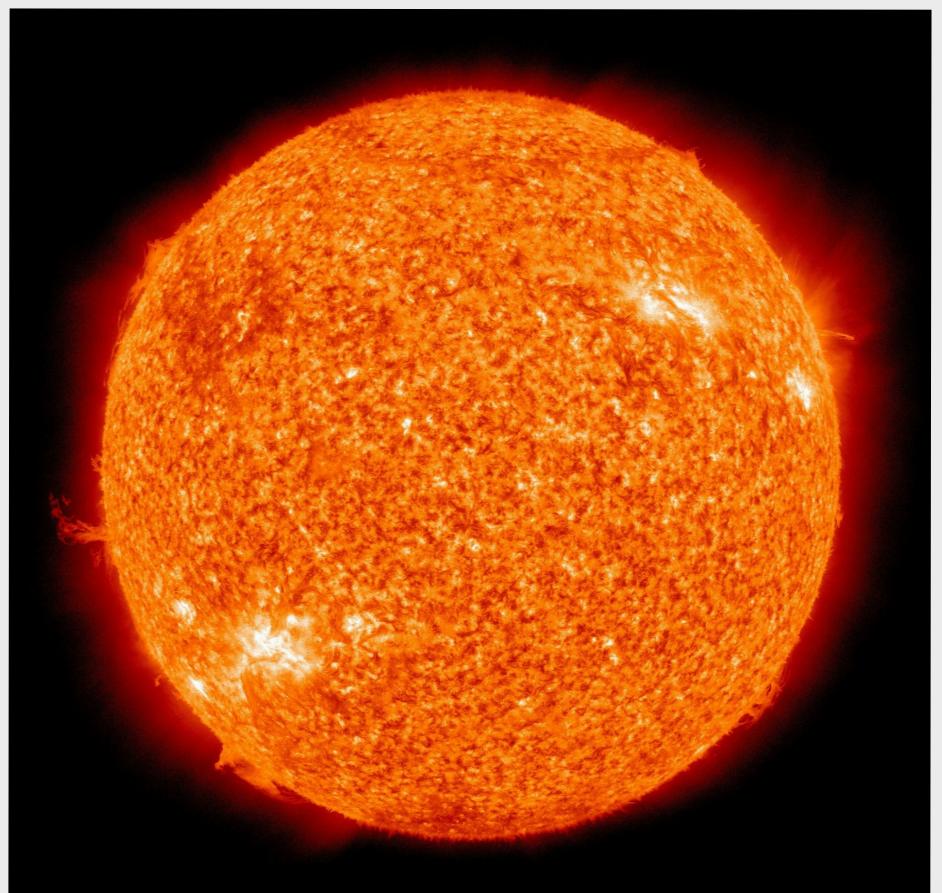
Gravitativer Einschluss

Sterne

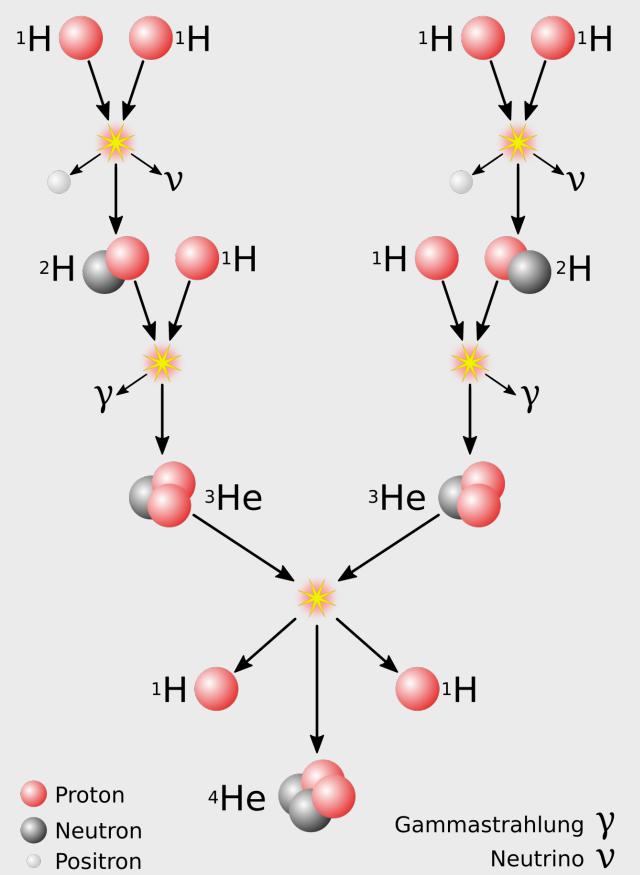
[+] Einfaches Design

[+] Plasma Selbstheizung

[–] Grosse Masse und Abstand notwendig



ESA

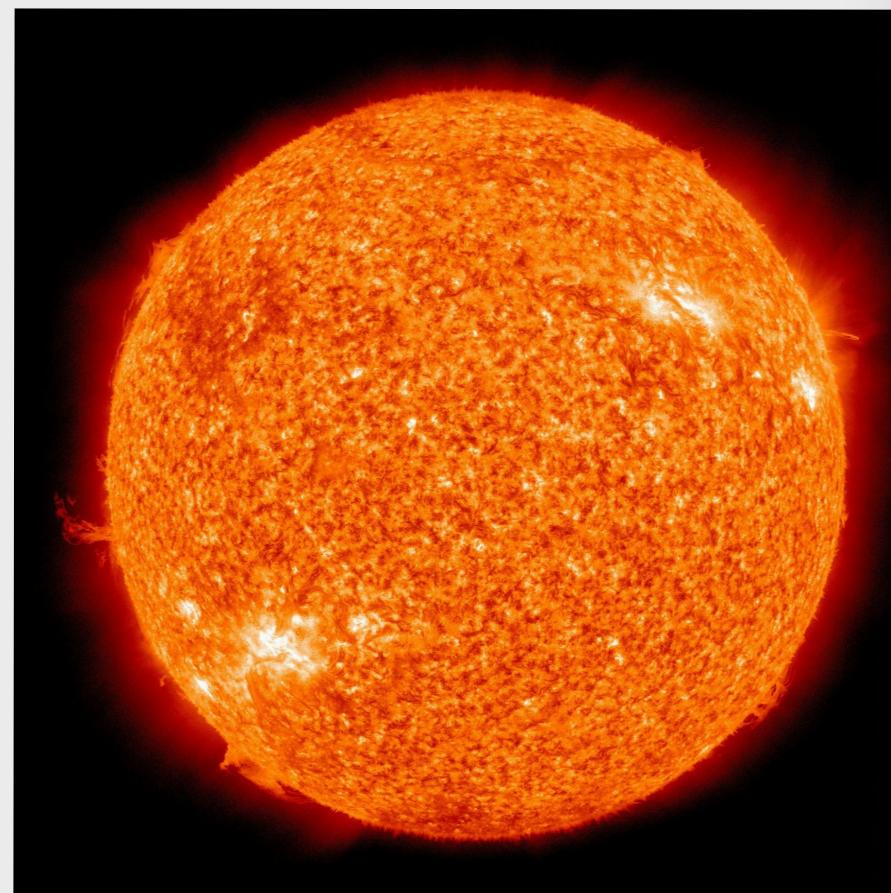


Wikipedia

PROBLEM – LÖSUNGEN

Gravitativer Einschluss

Sterne

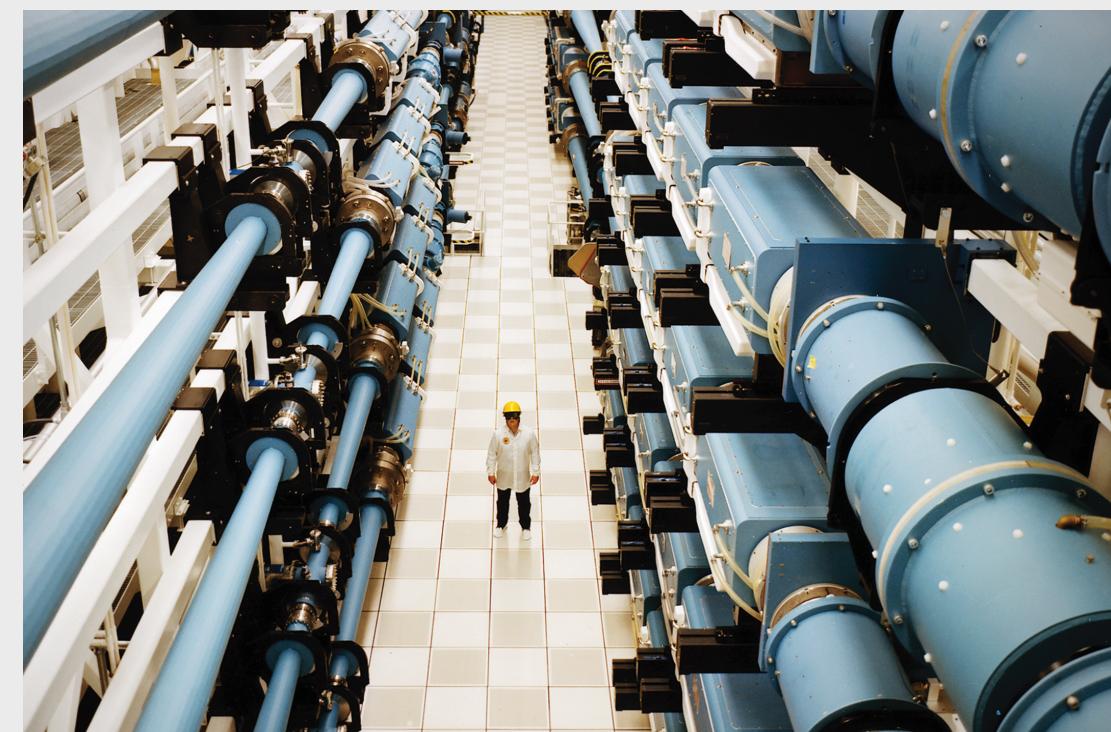


- [+] Einfaches Design
- [+] Plasma Selbstheizung
- [-] Grosse Masse und Abstand

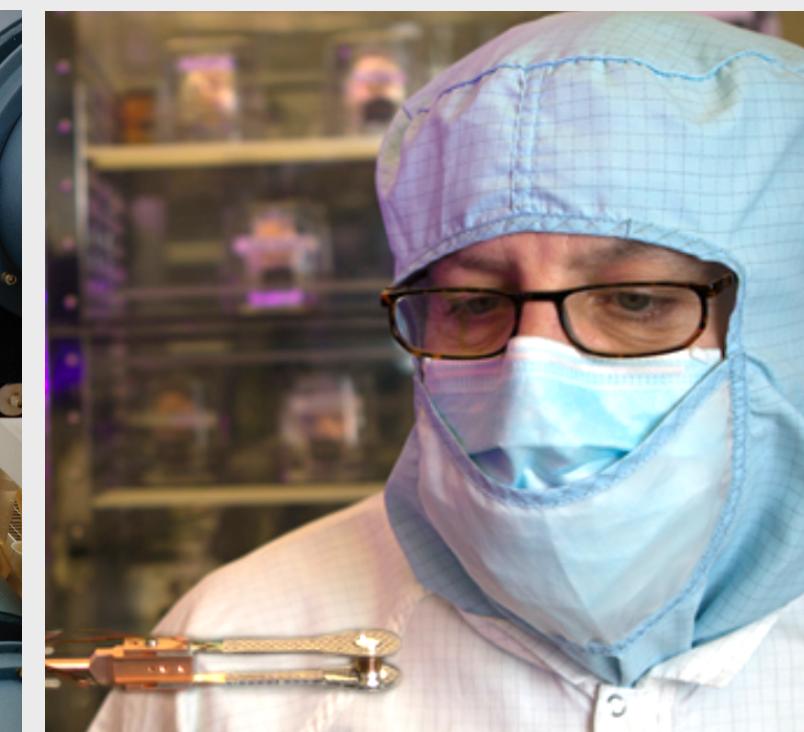
Trägheitsfusion (ICF Inertial Confinement Fusion)

Laser induzierte Schockwellen in kleinen Gefäßen (~ 1 mm)

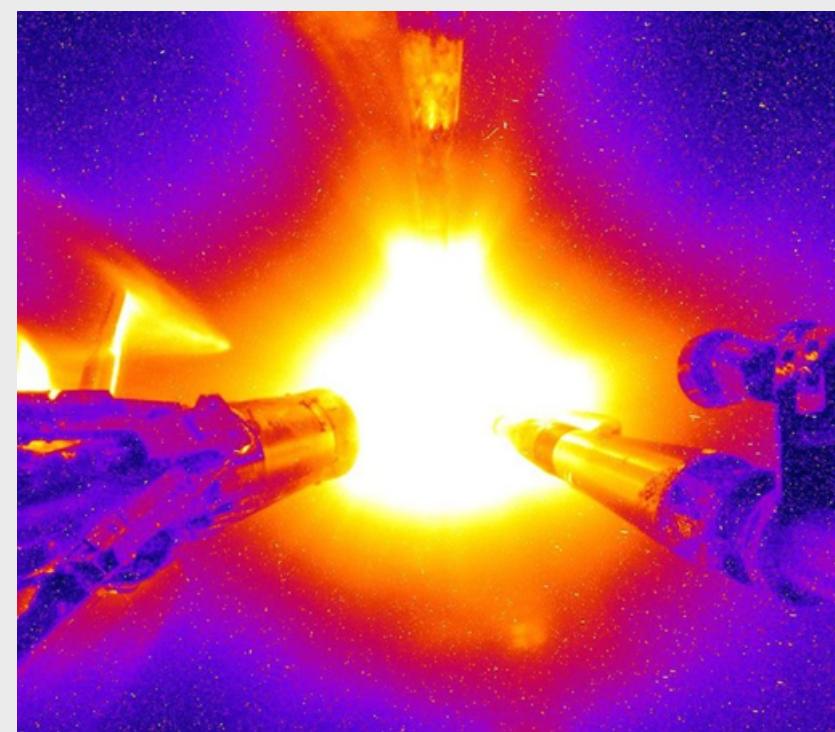
- [+] Nur kleiner Bereich muss aufgeheizt werden
- [+] Plasma Selbstheizung
- [+] Energiegewinn: 3.15/2.05 (2022NIF^[2])
- [-] Sehr kurze Einschlussszeit (~ 20 ns)
- [-] Explodiert im Prozess – Reaktordesign?



Nova Laser Bay



Target



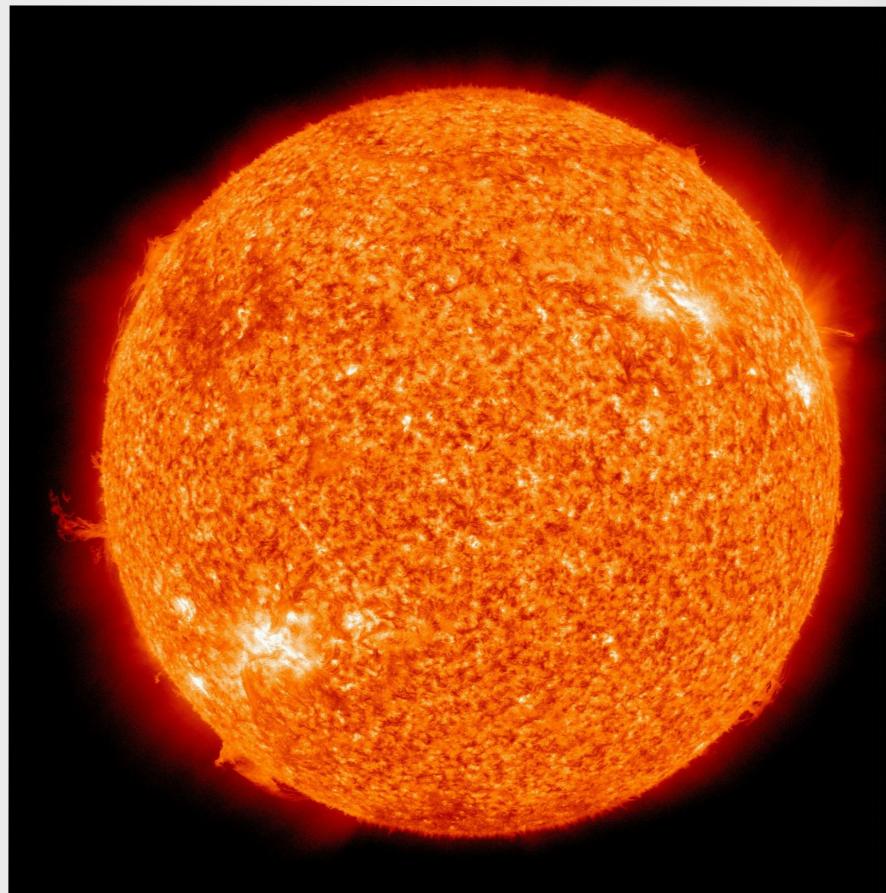
NIF “Big Foot” deuterium-tritium (DT) implosion

PROBLEM – LÖSUNGEN

Gravitativer Einschluss

Sterne

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



Trägheitsfusion (ICF Inertial Confinement Fusion)

Laser induzierte Schockwellen in kleinen Gefäßen (~ 1 mm)

- [+] Nur kleiner Bereich muss aufgeheizt werden

- [+] Plasma Selbstheizung

- [+] Energiegewinn: $3.15/2 = 1.575 \text{ MeV}$

- [-] Sehr kurze Einschlusszeit

- [-] Explodiert im Prozess



Nova Laser Bay

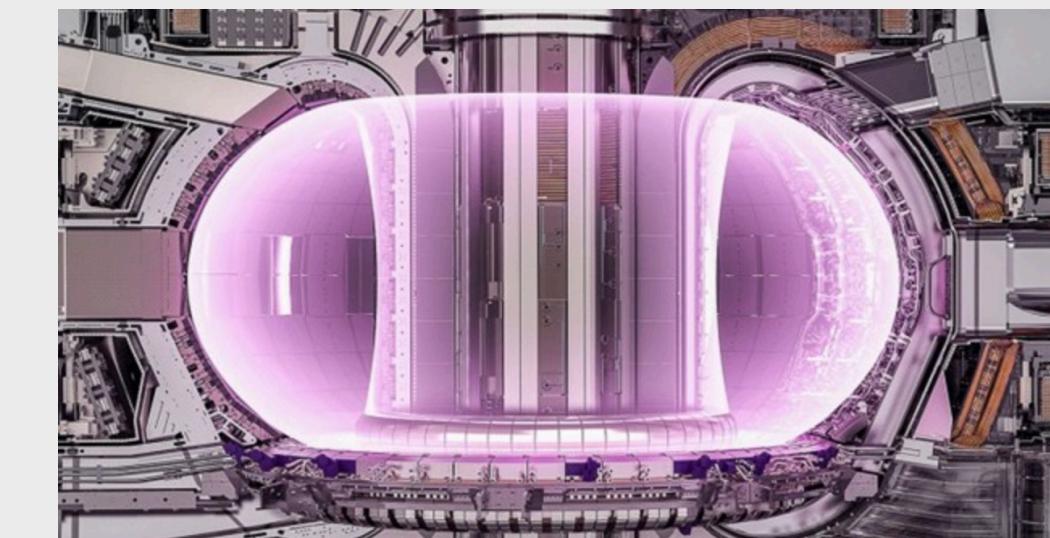
Magnetischer Einschluss (MCF Magnetic Confinement Fusion)

Geladenes Plasma im starken toroidalen Magnetfeld

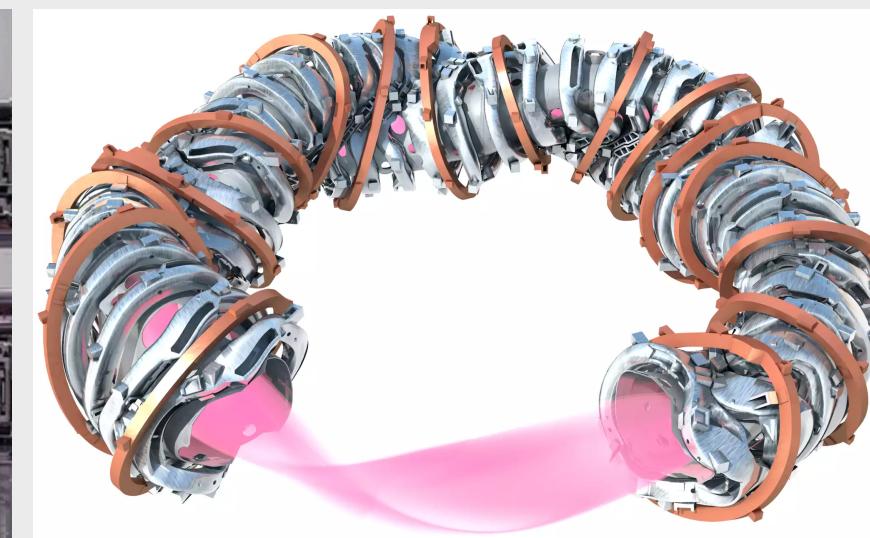
- [+] Selbst-heizende Plasma (~ 10 min)^[2]

- [+] Semi-realistische Reaktorkonfigurationen existieren

- [-] Komplizierte Konfiguration: Abschirmung, Kühlung, Plasmastabilität

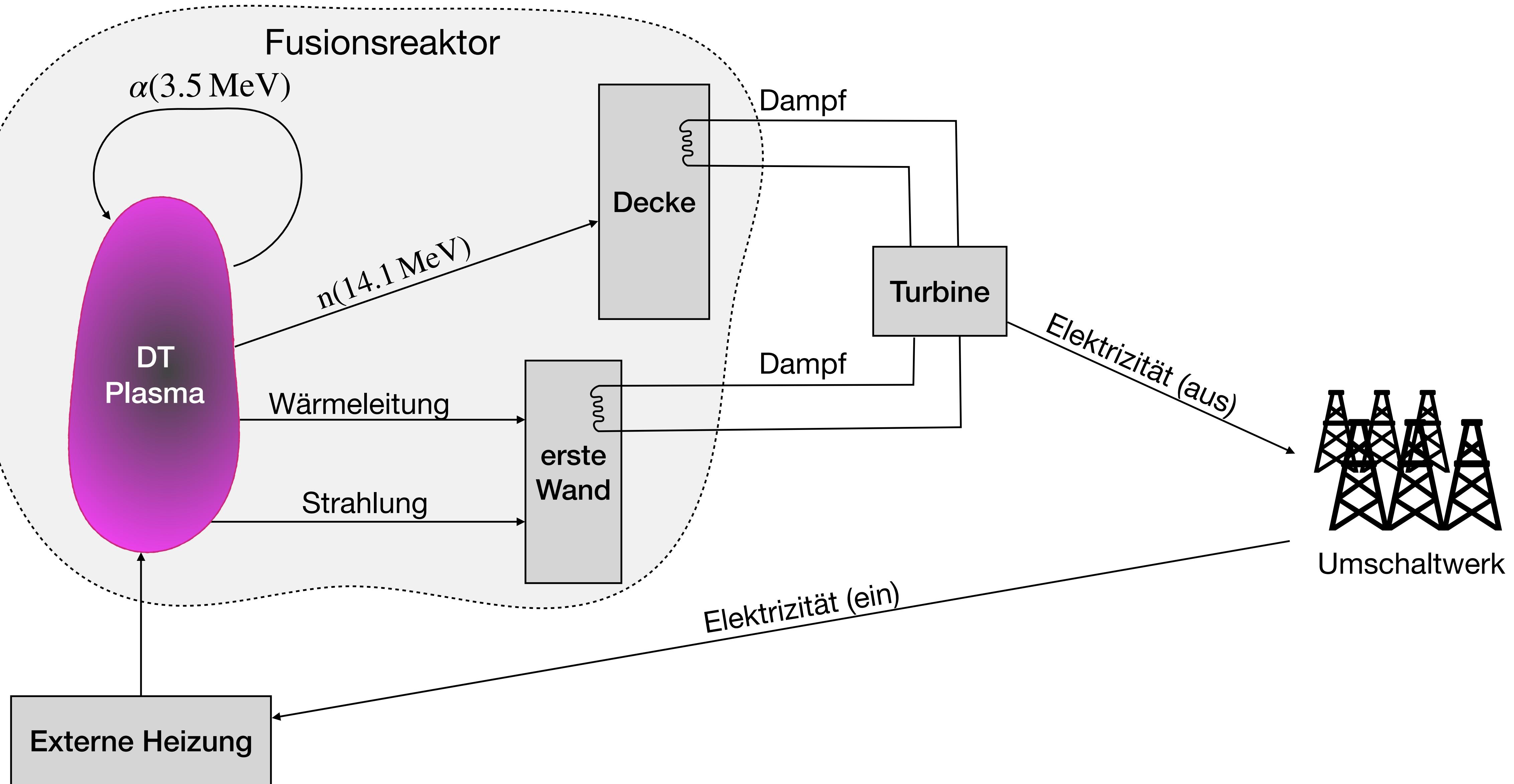


ITER (Tokamak)

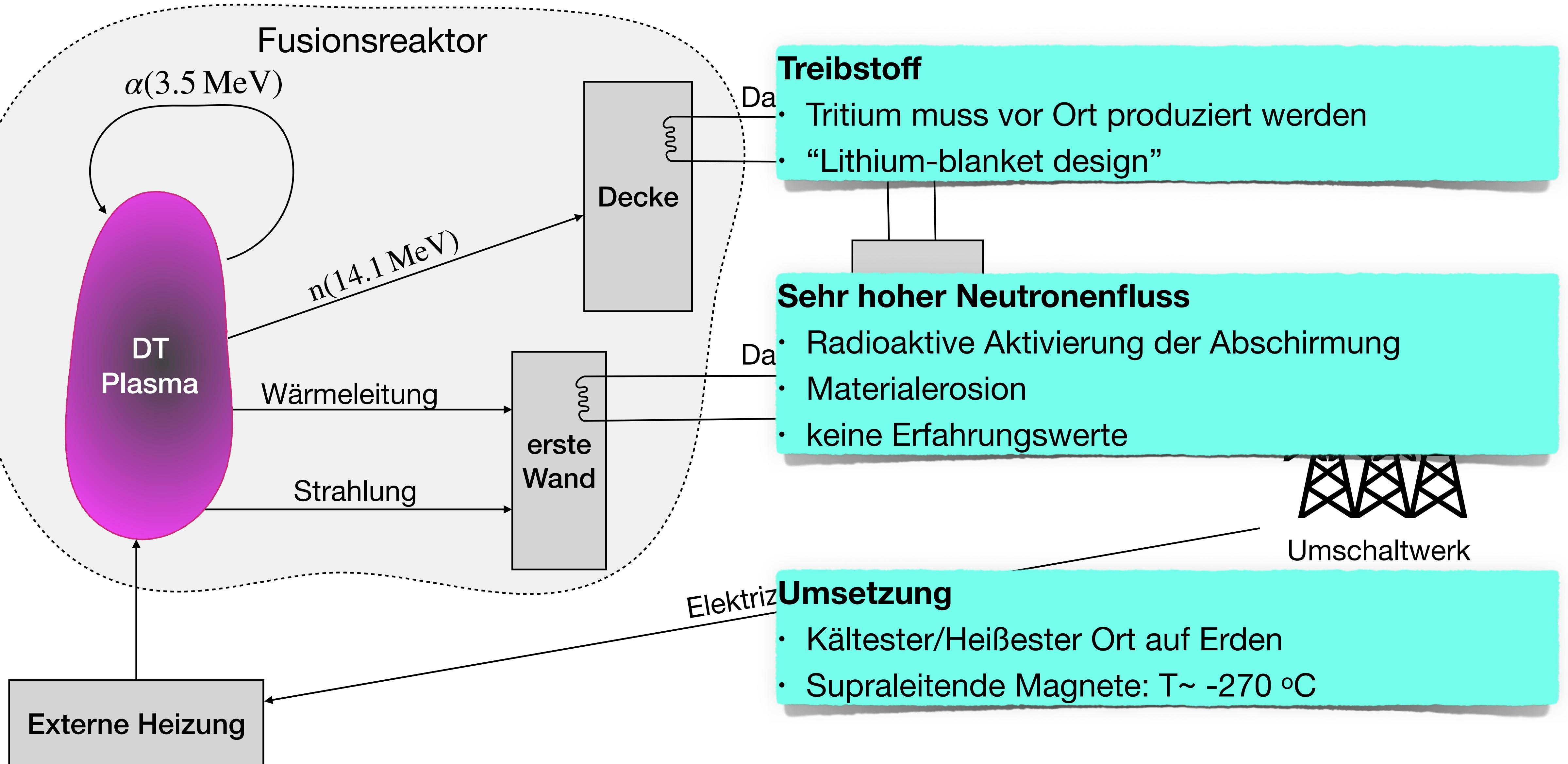


Wendelstein7-X (Stellarator)

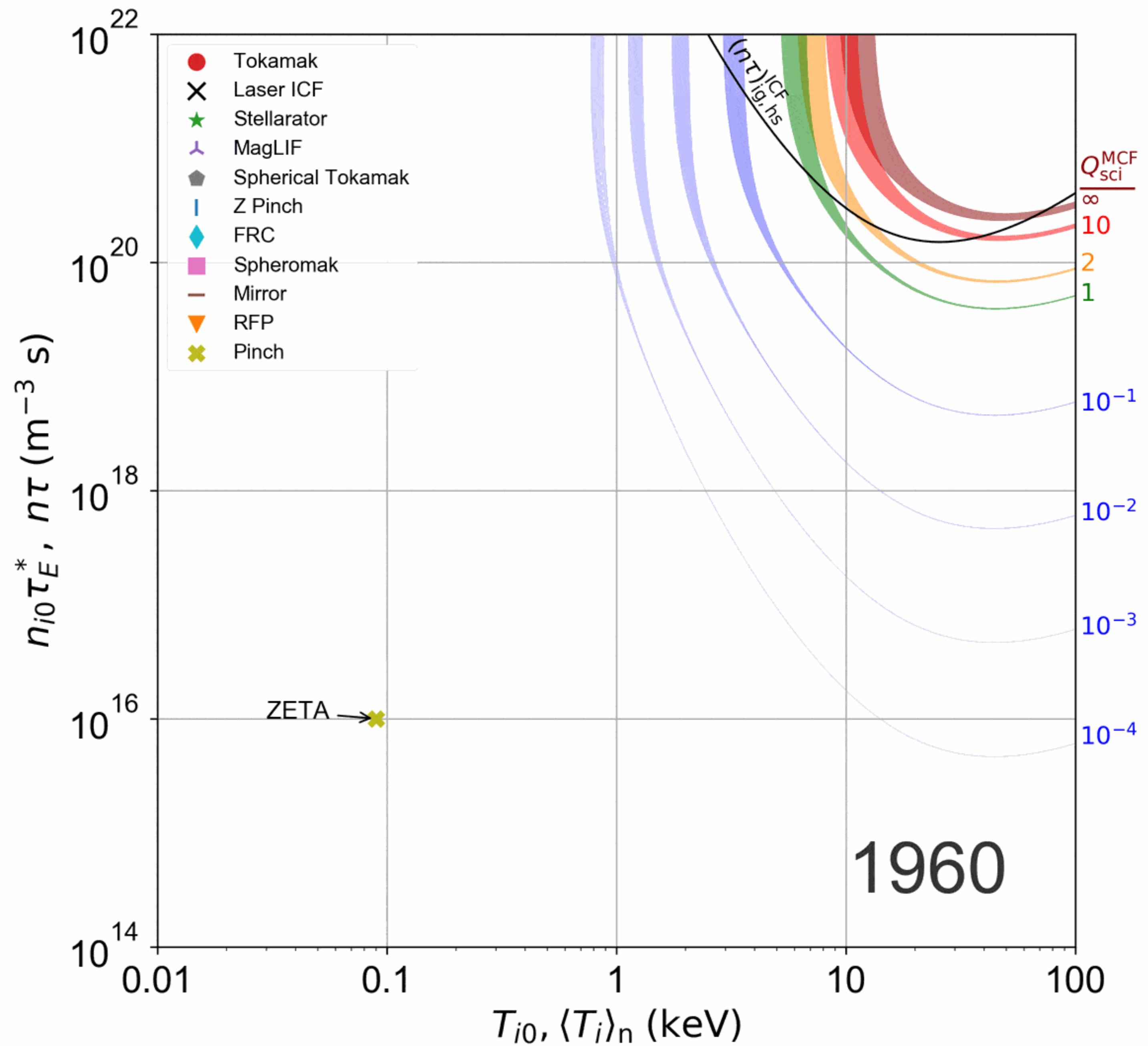
GRUNDDESIGN



HERAUSFORDERUNGEN



FORTSCHRITT



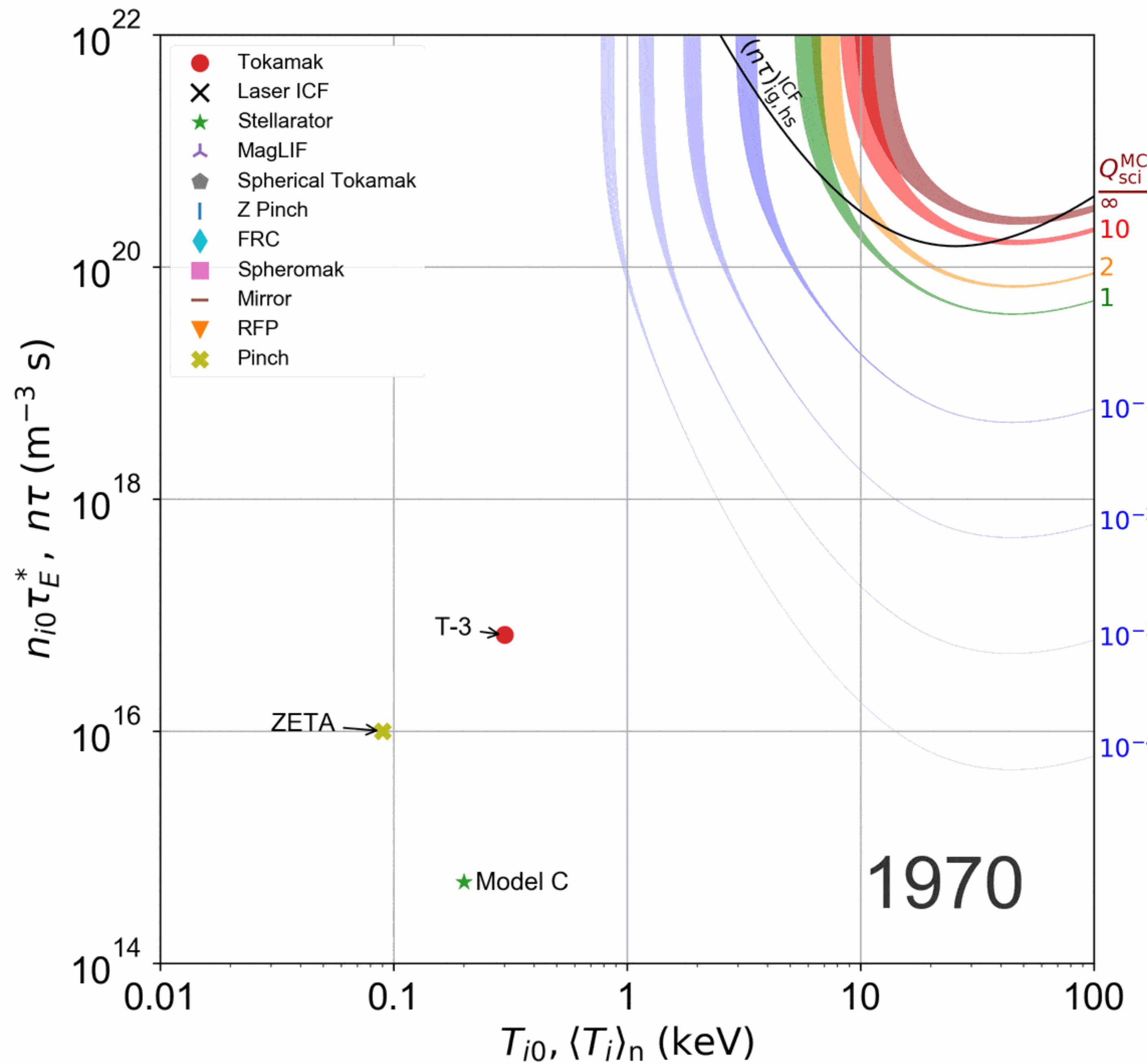
$$Q_{\text{sci}}^{\text{MCF}} = \frac{\text{Fusionsleistung}}{\text{aeussere Heizung}}$$

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

FORTSCHRITT

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

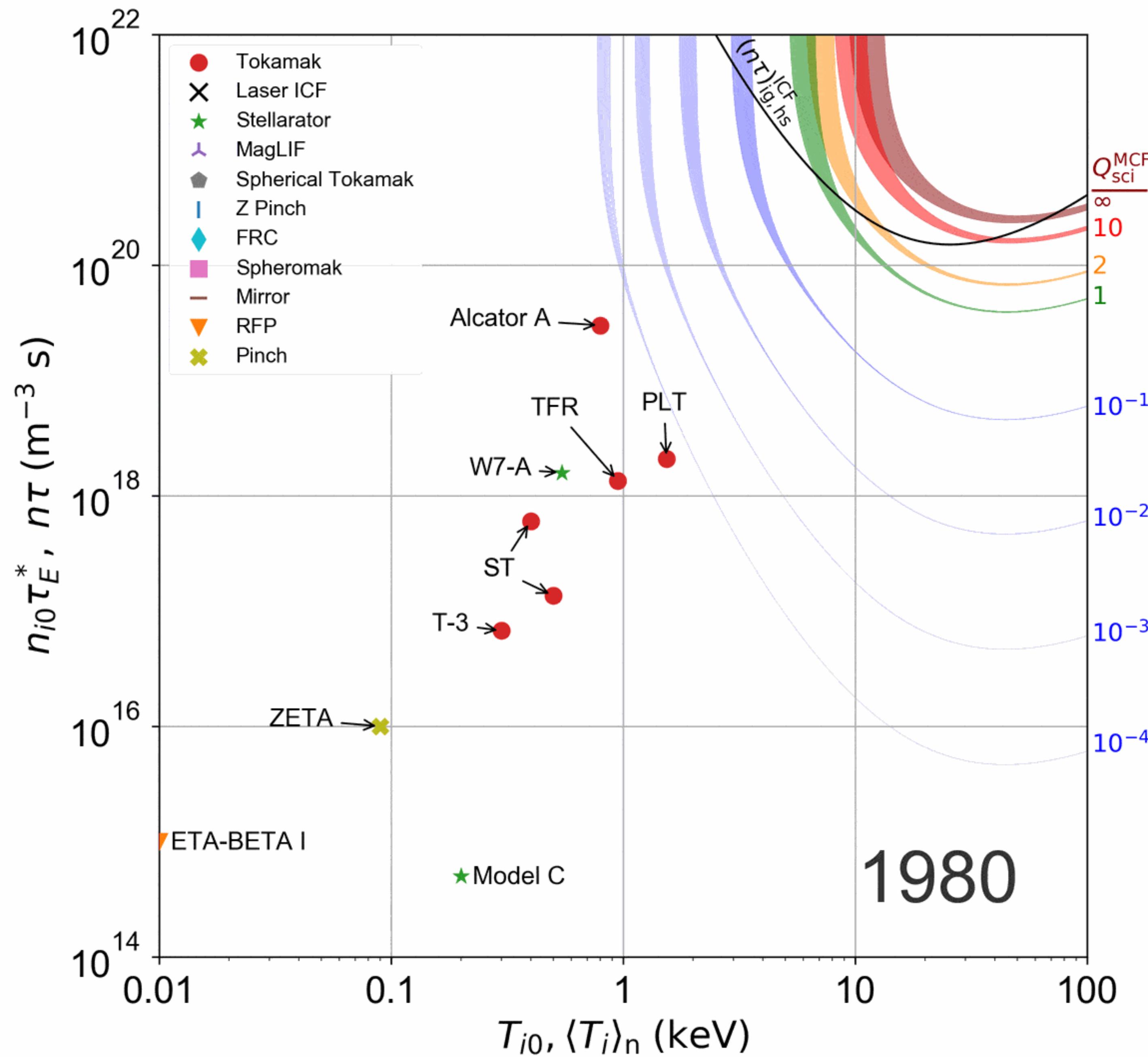
- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs. $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt



FORTSCHRITT

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

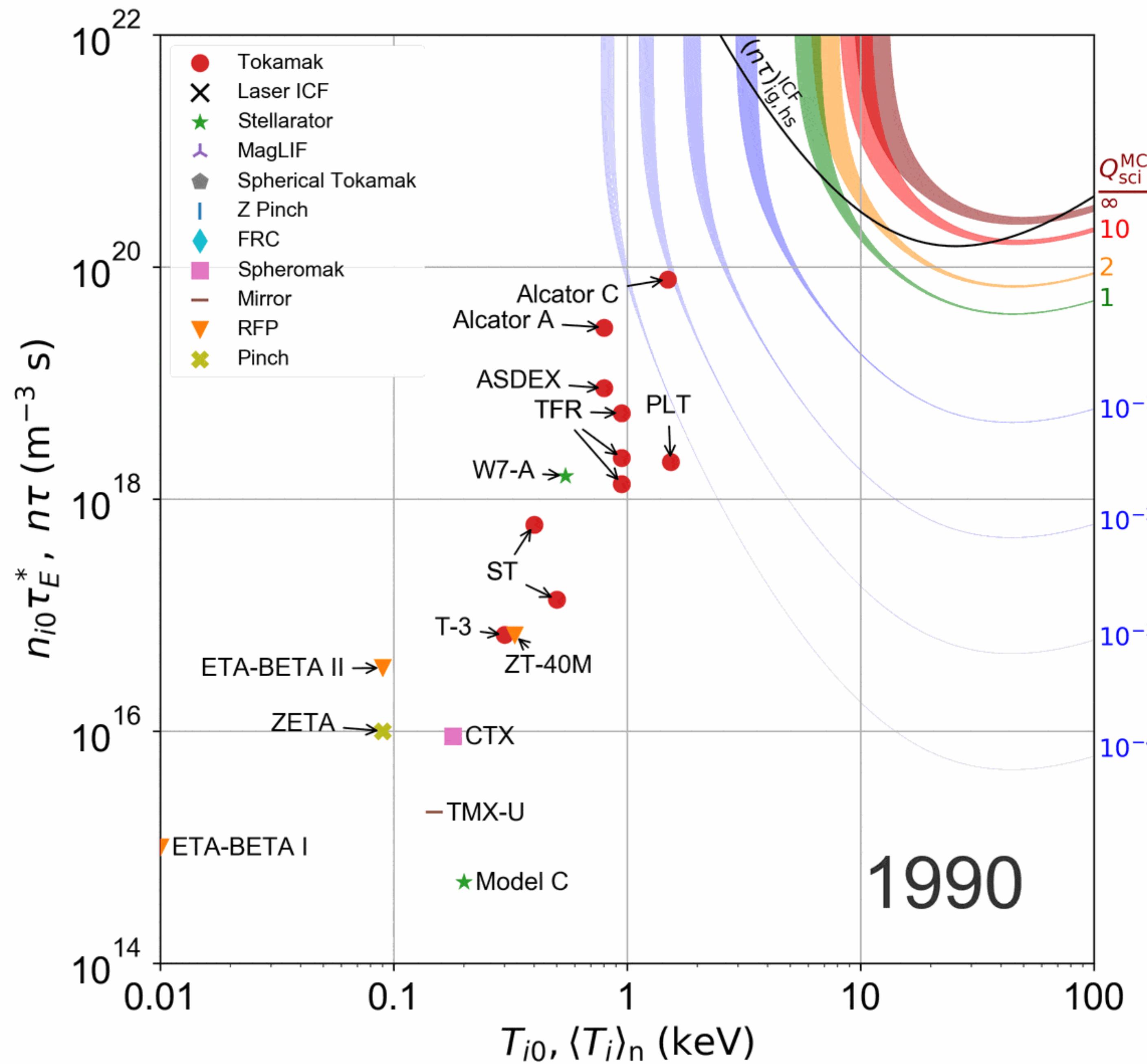
- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs. $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt



FORTSCHRITT

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

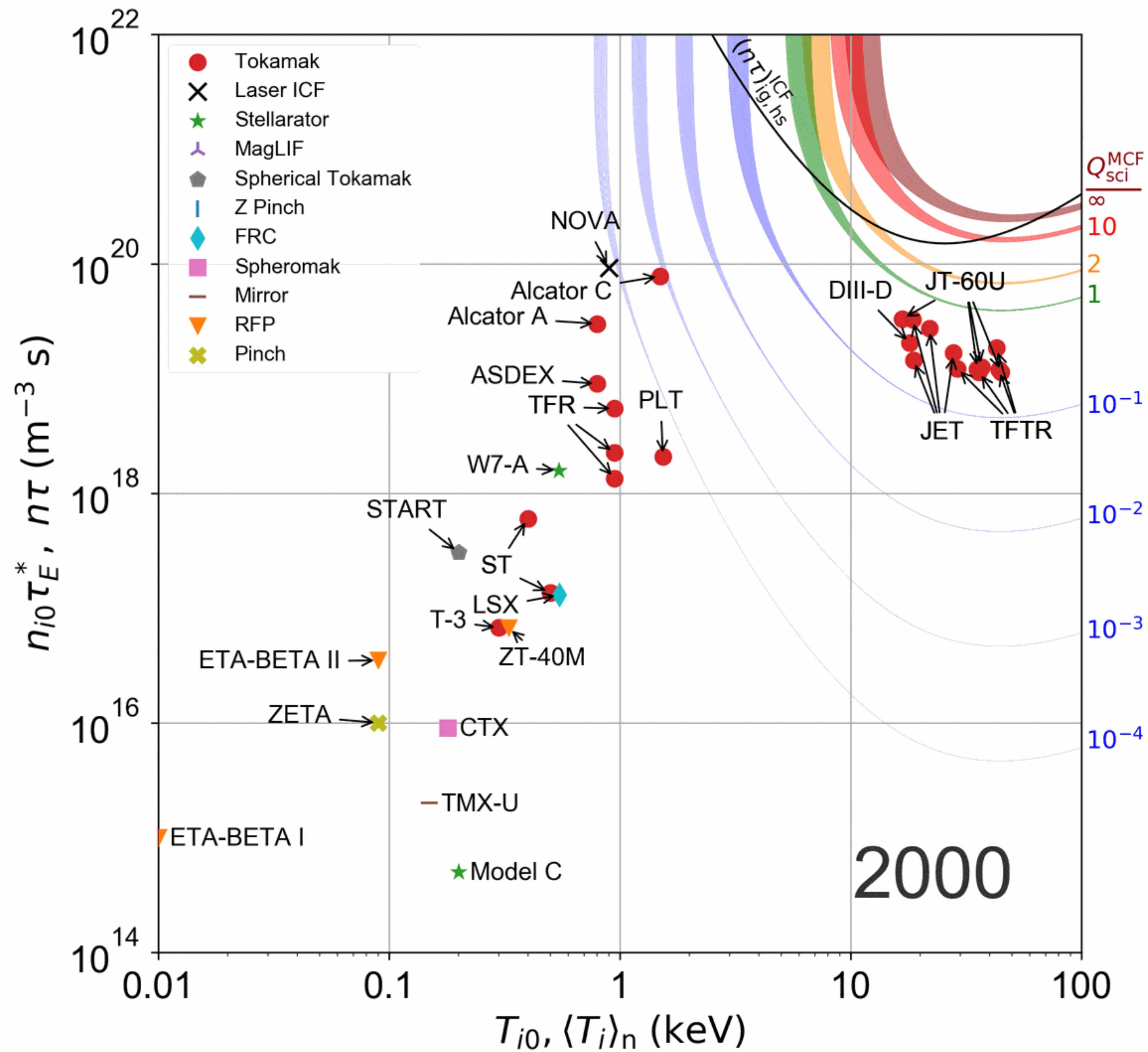
- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs. $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt



FORTSCHRITT

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

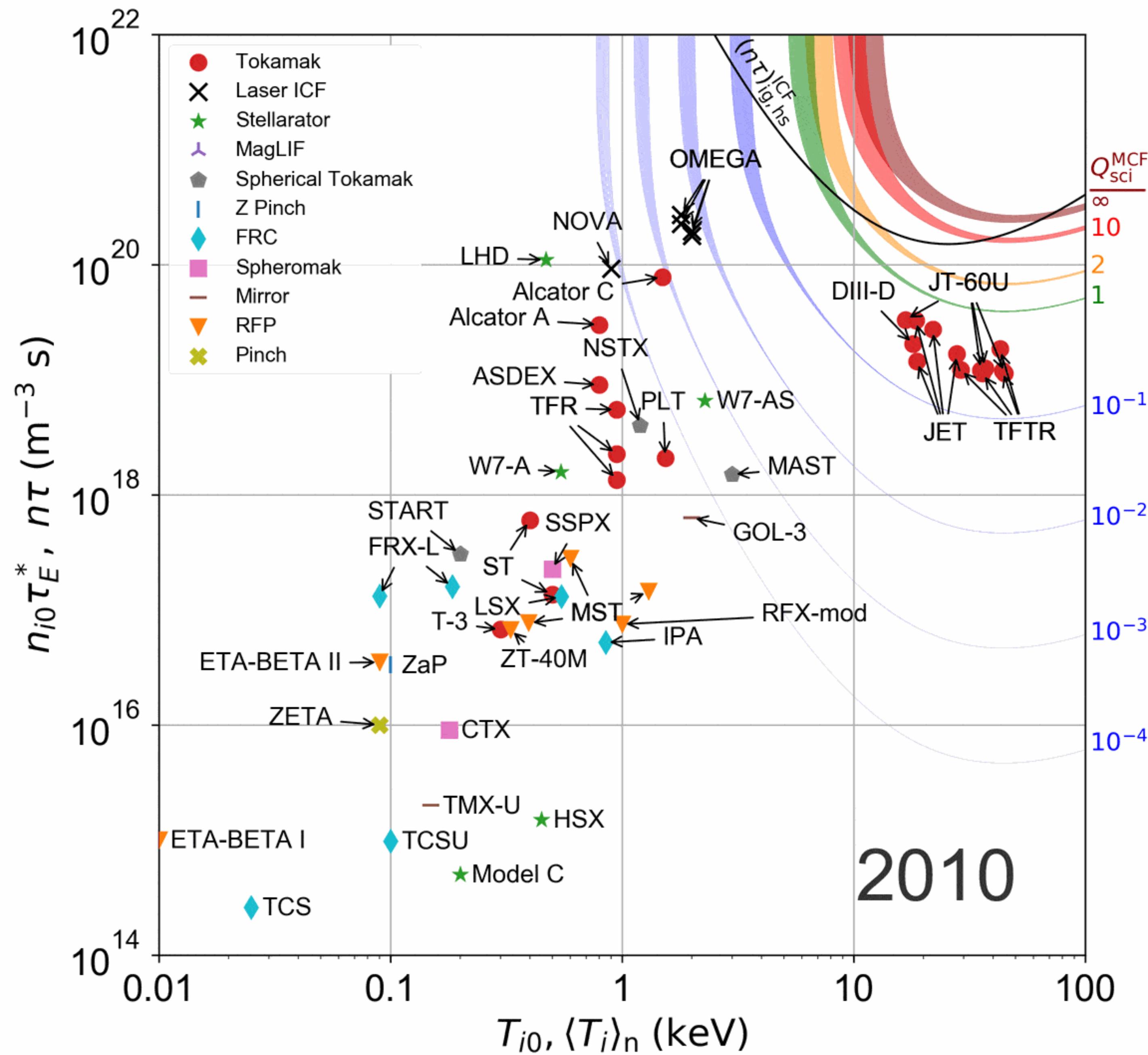
- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs. $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt



FORTSCHRITT

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

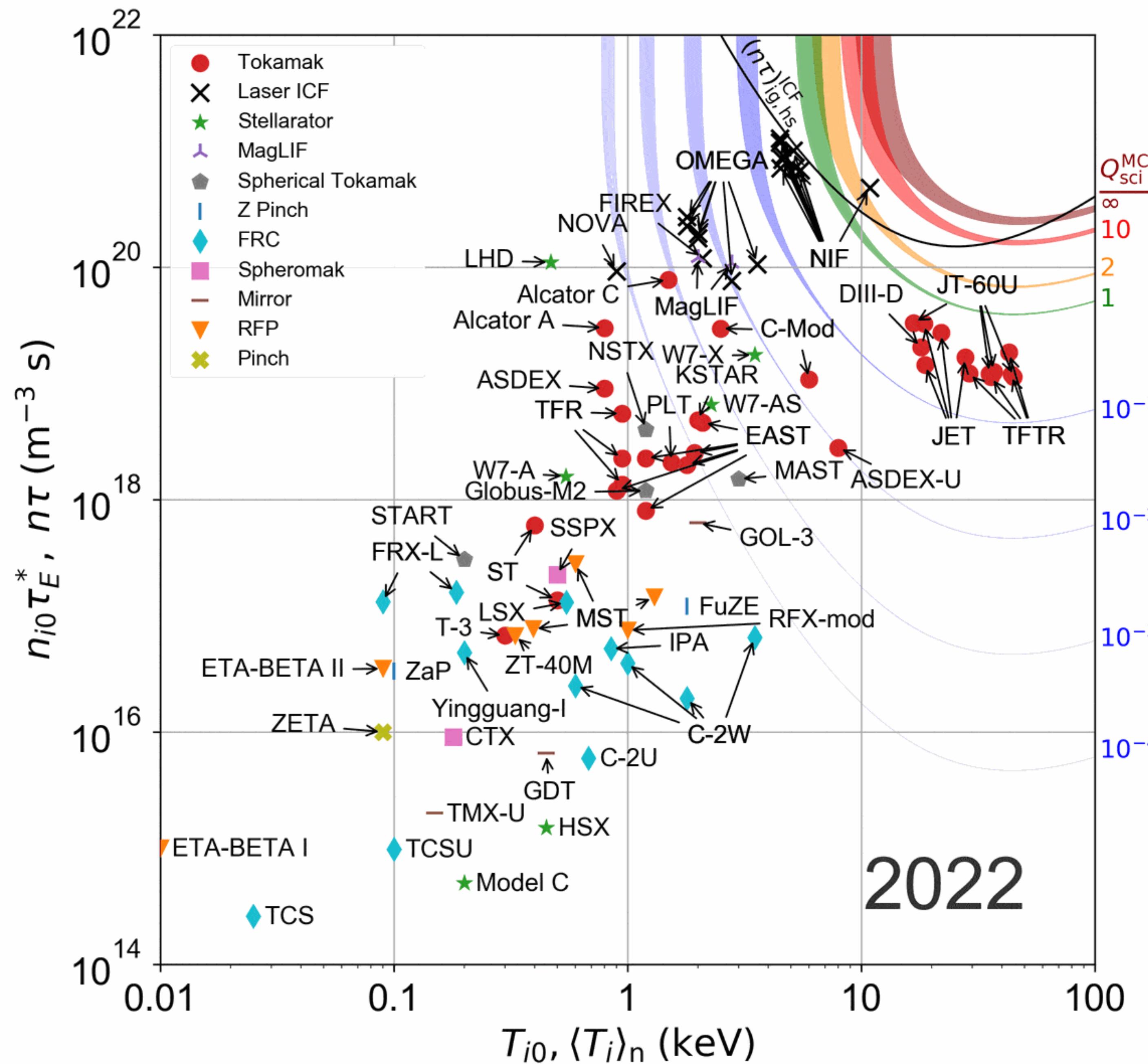
- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs. $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt



FORTSCHRITT

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

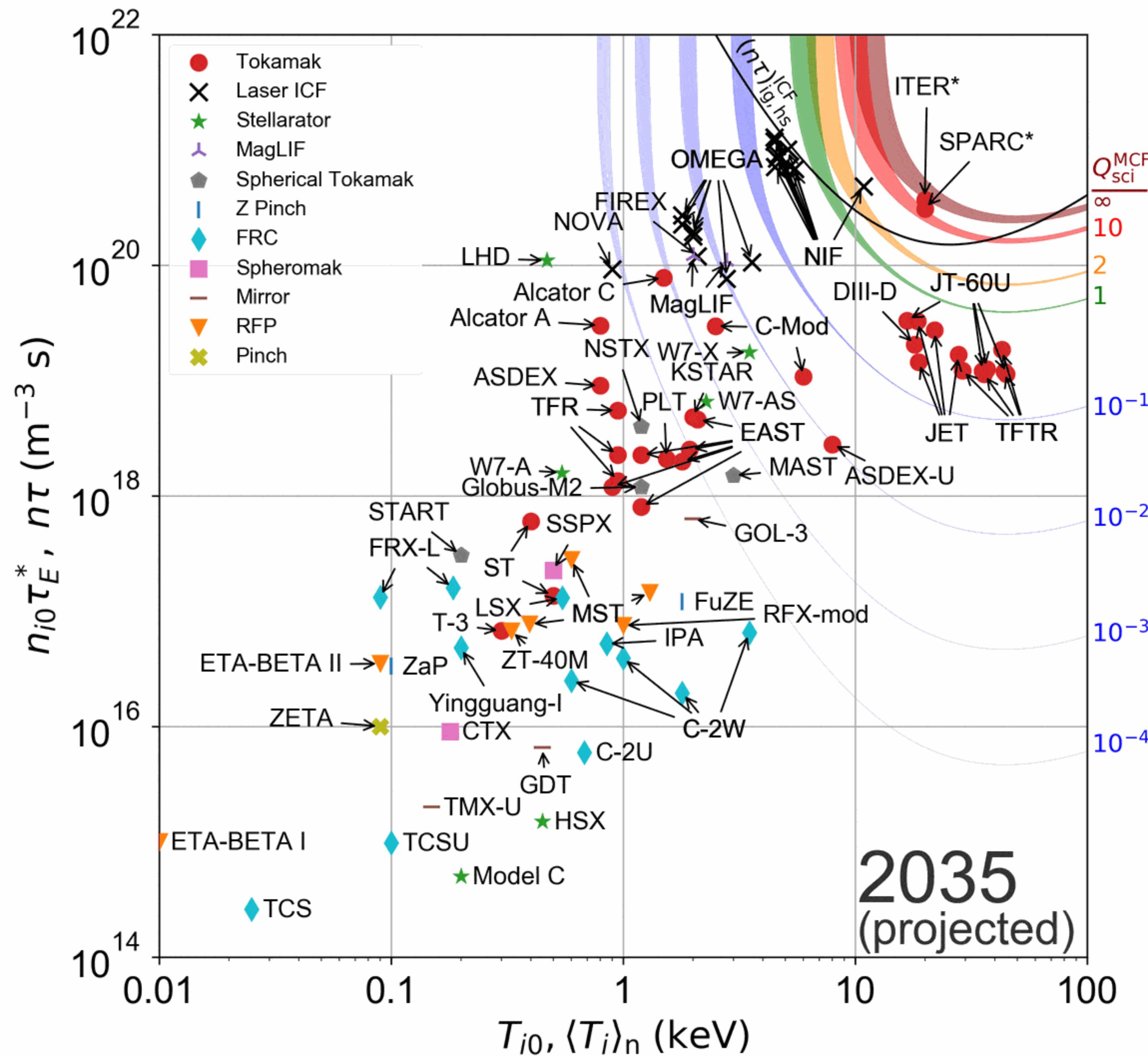
- wissenschaftliche Verstärkungsfaktor (Q_{sci})
- Lawson's Stabilitätskriterium (T vs. $n\tau$)
- Fortschritt beschleunigt sich...
- Funktionierendes Konzept ist jedoch einige Jahrzehnte entfernt



FORTSCHRITT

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

- 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

