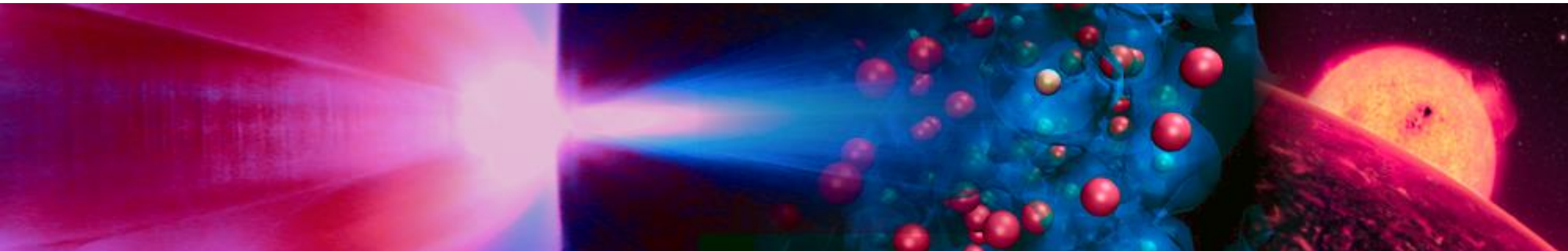


Strom durch Kernfusion?!

Prof. Dr. Dominik Kraus
Institut für Physik
Universität Rostock

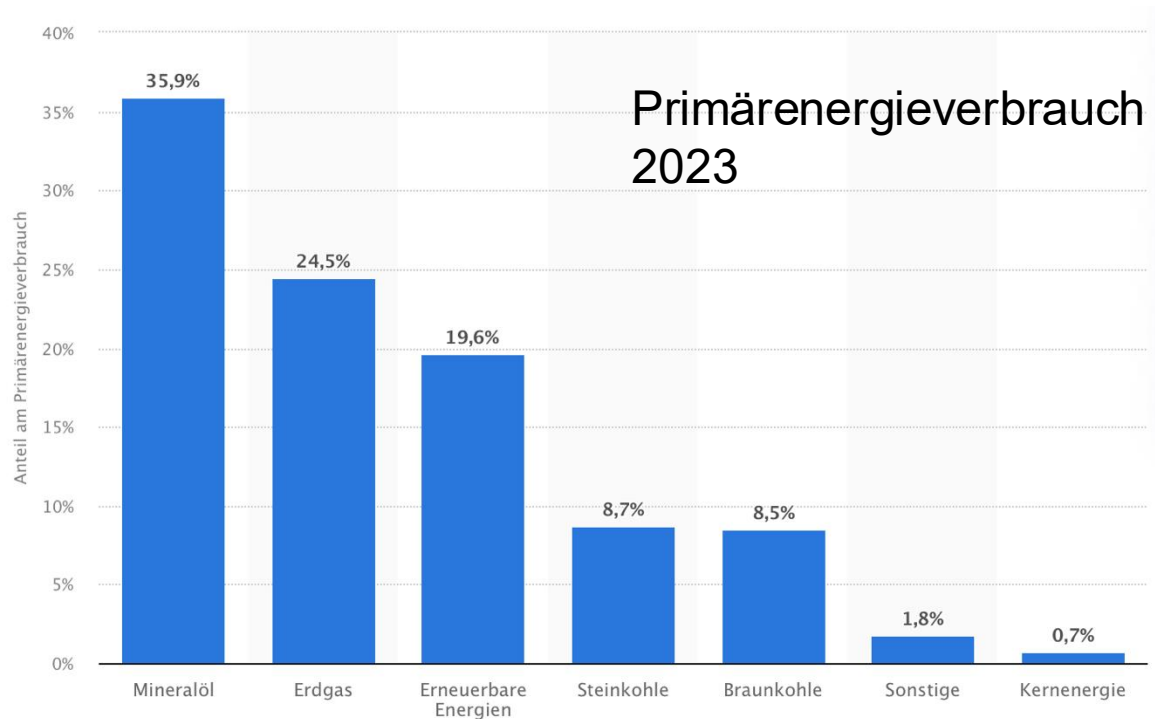
Ringvorlesung Wissenschaft und alternative Fakten, CAU Kiel
15.01.2026



Energie – die Aufgabe unserer Generation(en)?!

Energie – die Aufgabe unserer Generation(en)?!

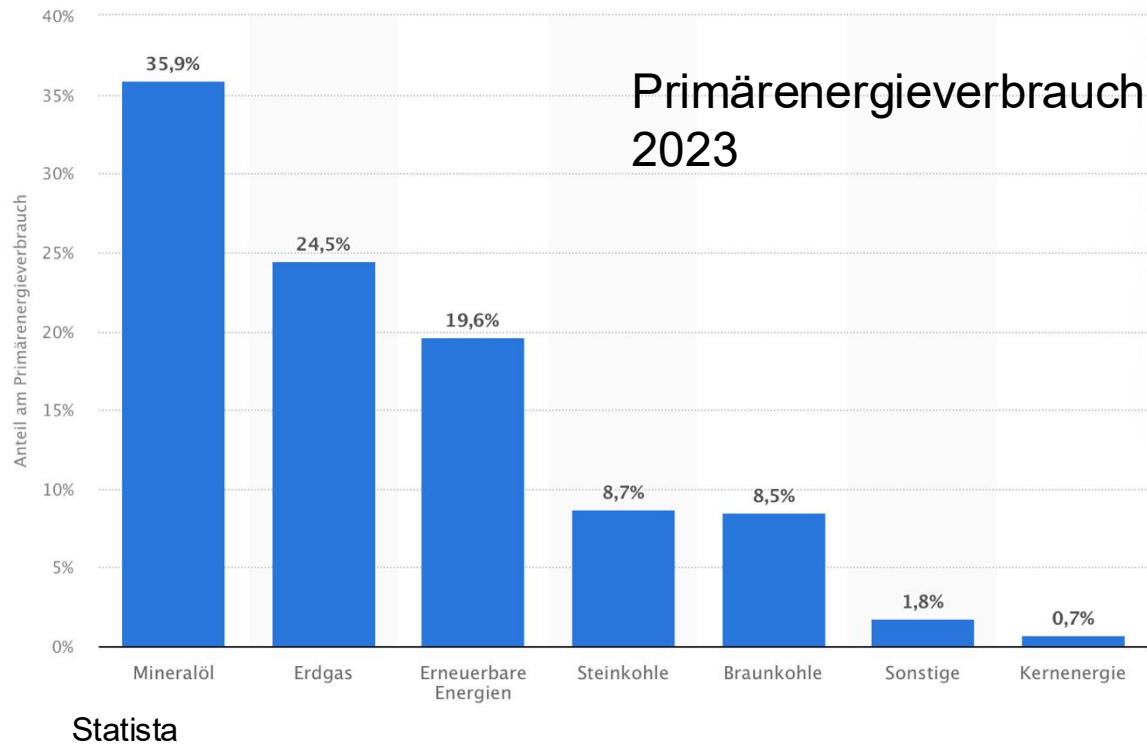
Deutschland



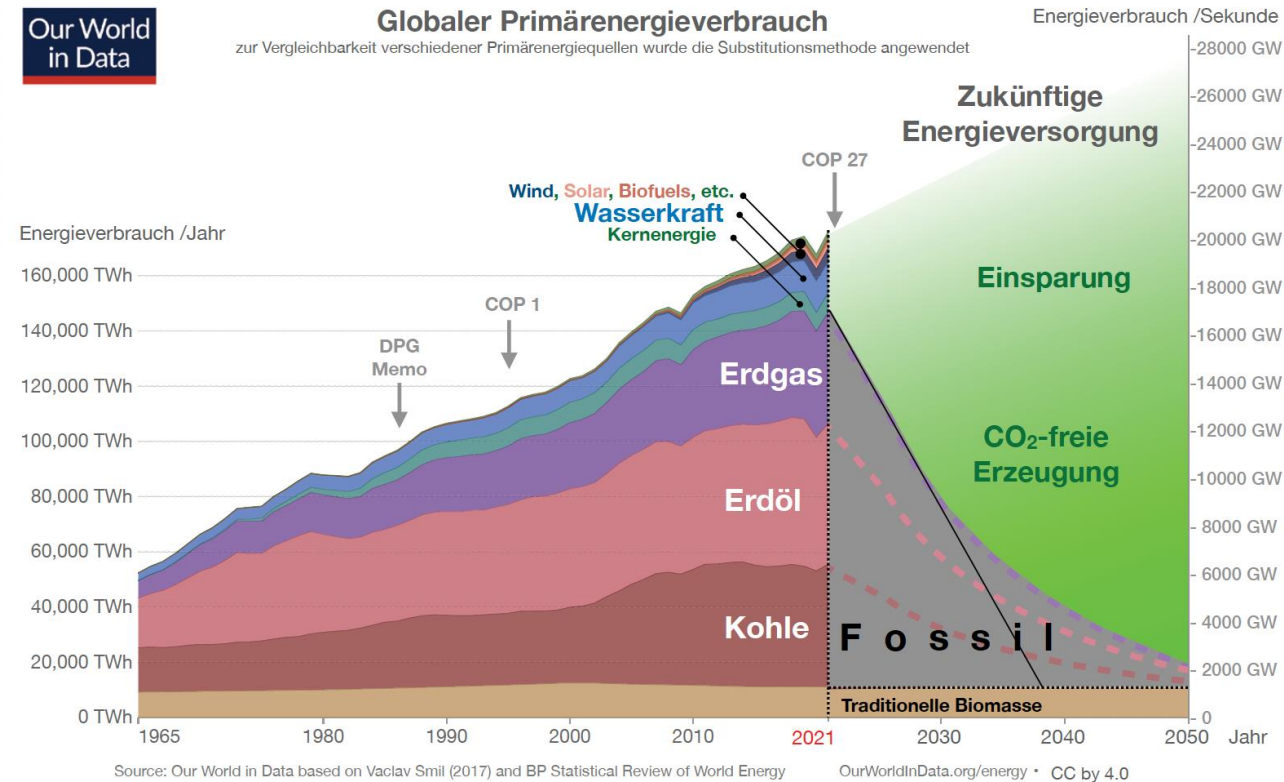
Statista

Energie – die Aufgabe unserer Generation(en)?!

Deutschland

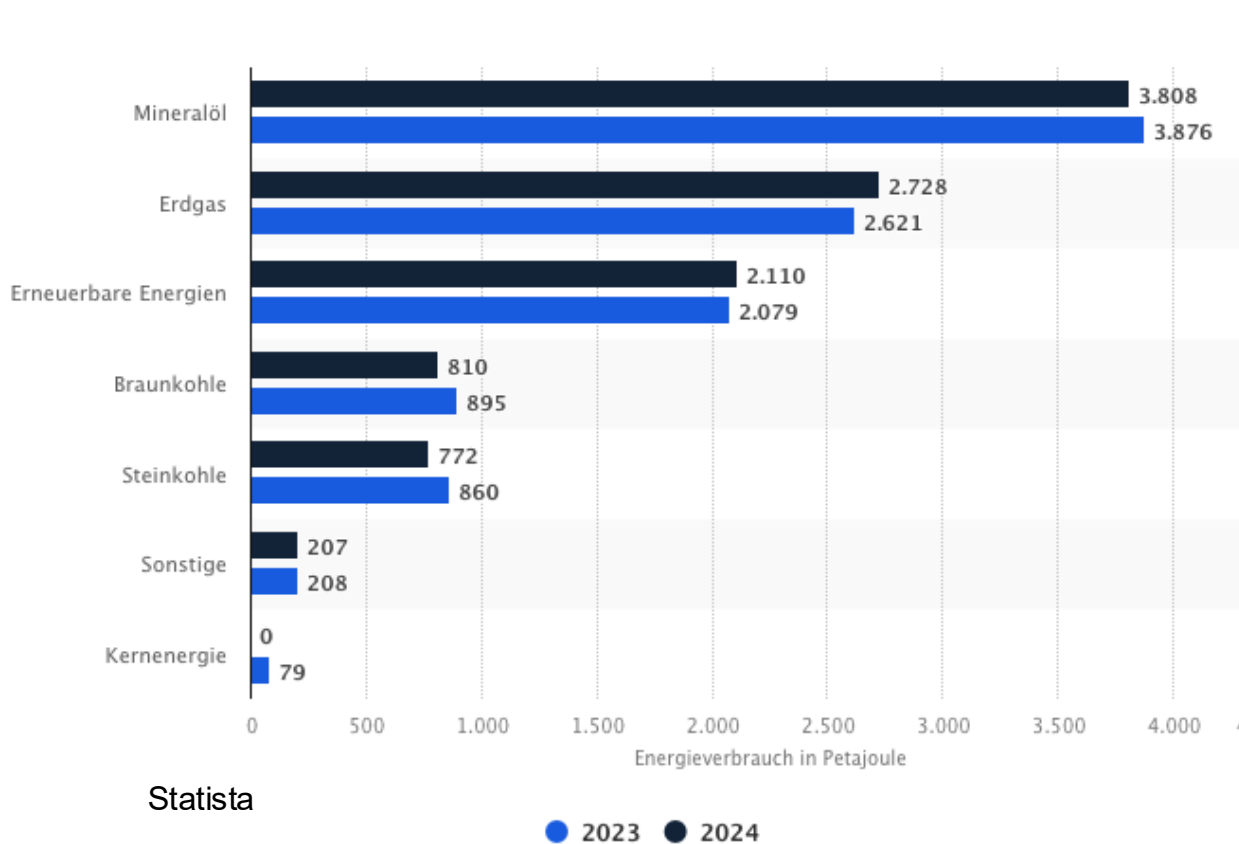


Die Welt

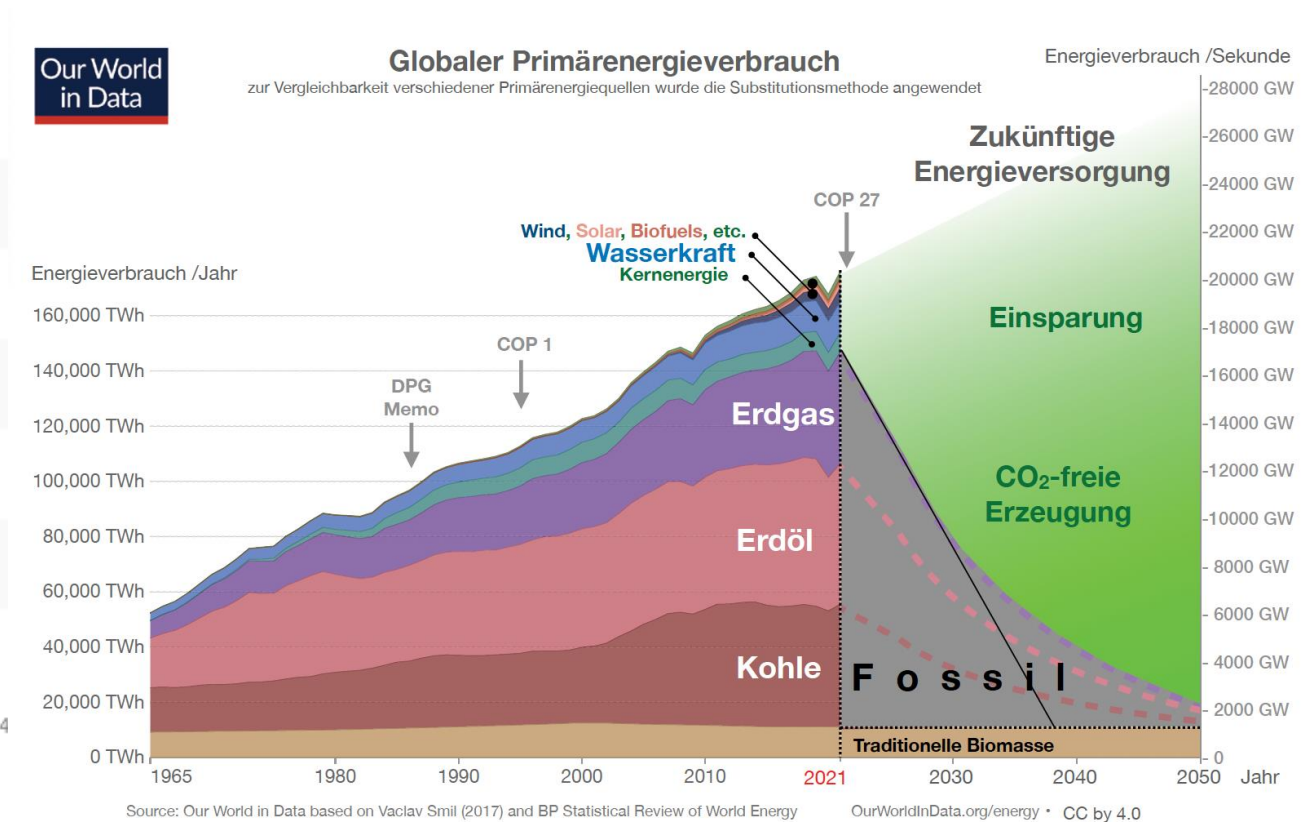


Energie – die Aufgabe unserer Generation(en)?!

Deutschland

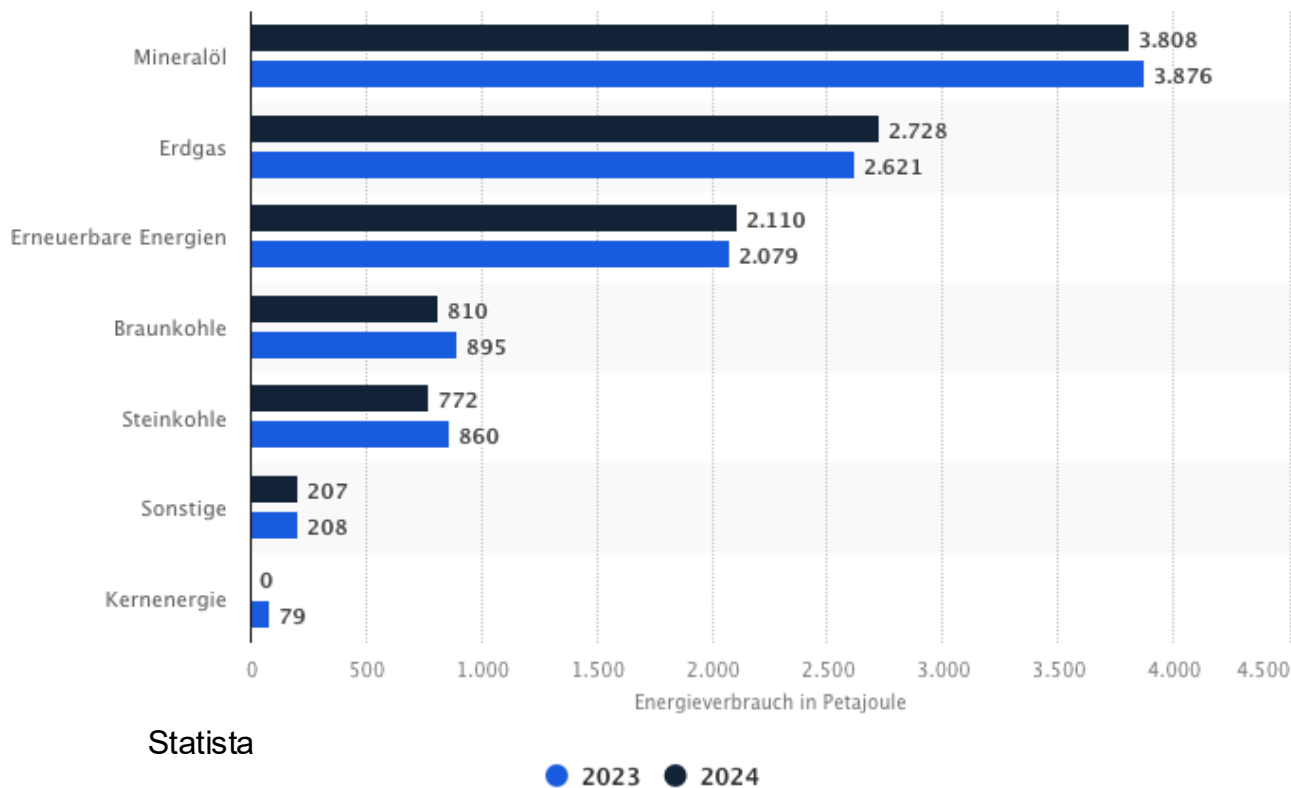


Die Welt



Energie – die Aufgabe unserer Generation(en)?!

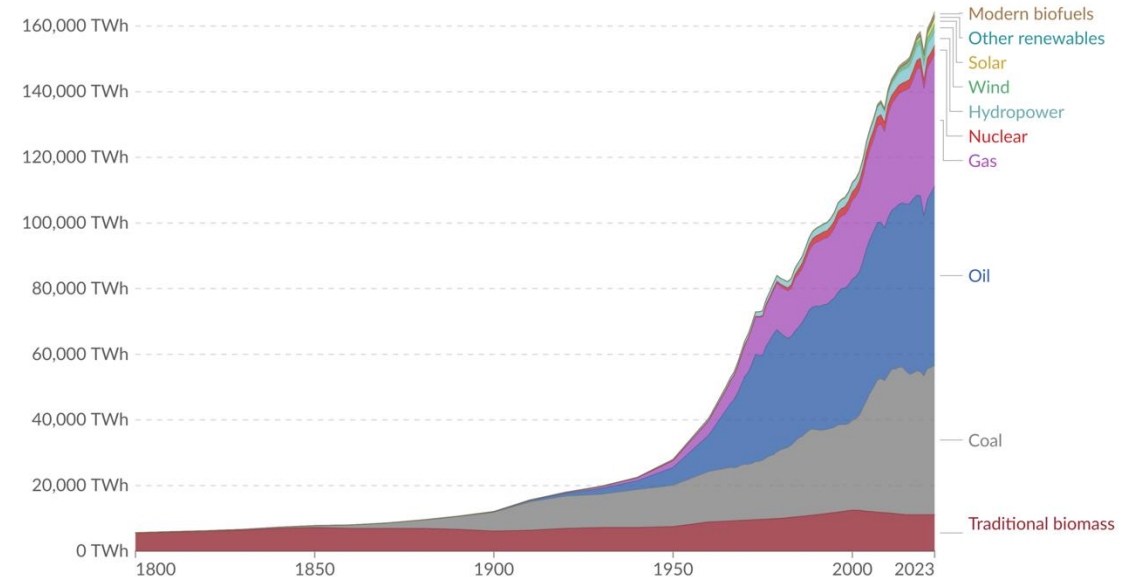
Deutschland



Die Welt

Global direct primary energy consumption

Energy consumption is measured in terawatt-hours, in terms of direct primary energy. This means that fossil fuels include the energy lost due to inefficiencies in energy production.

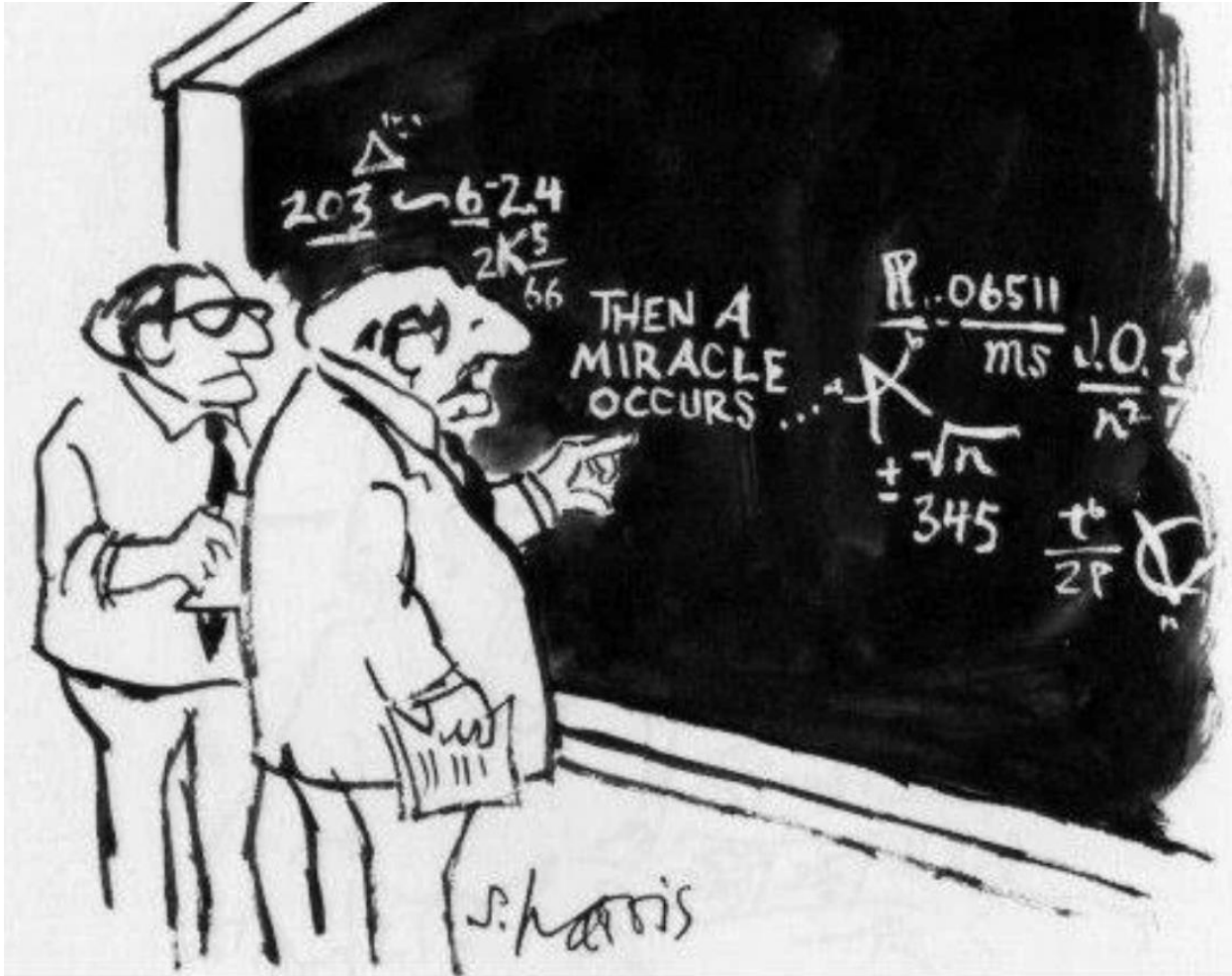


Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024); Smil (2017)

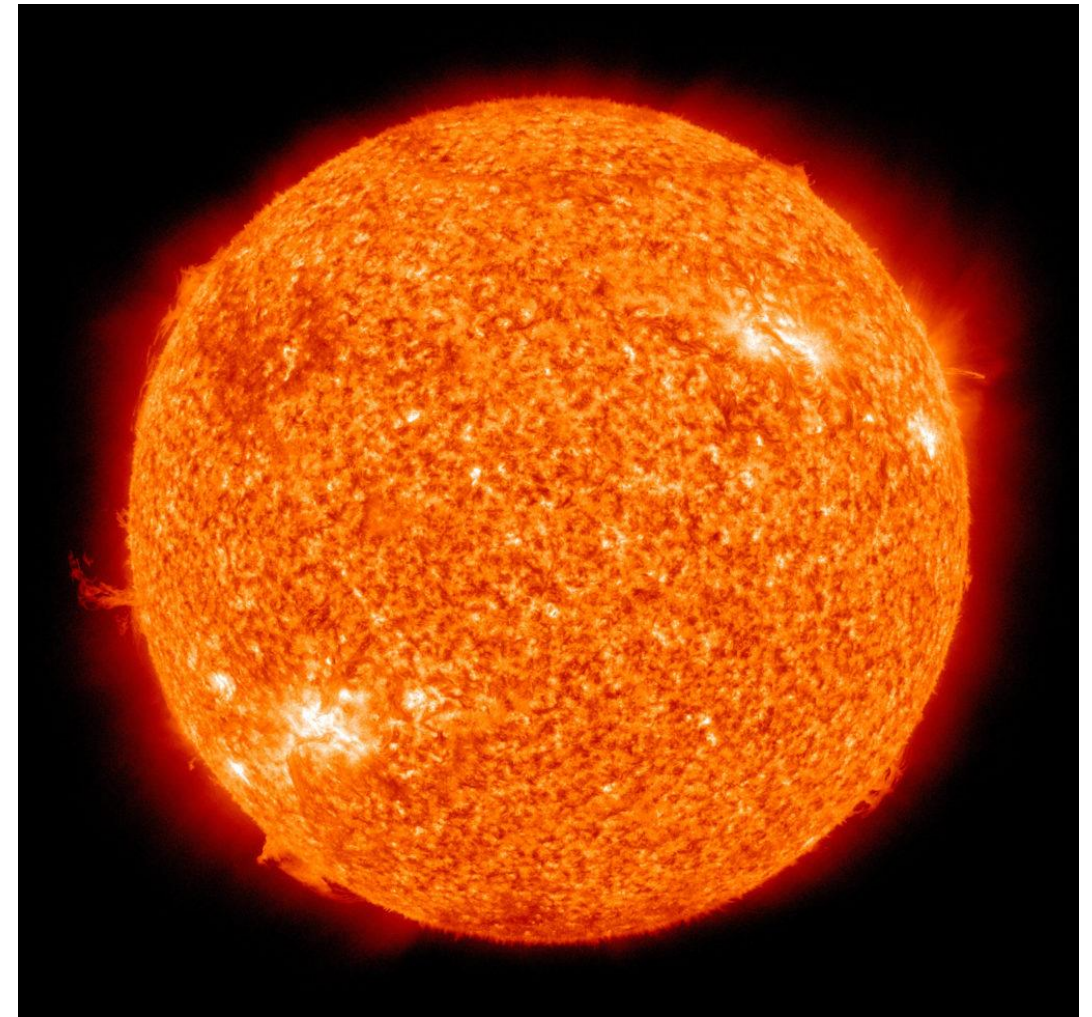
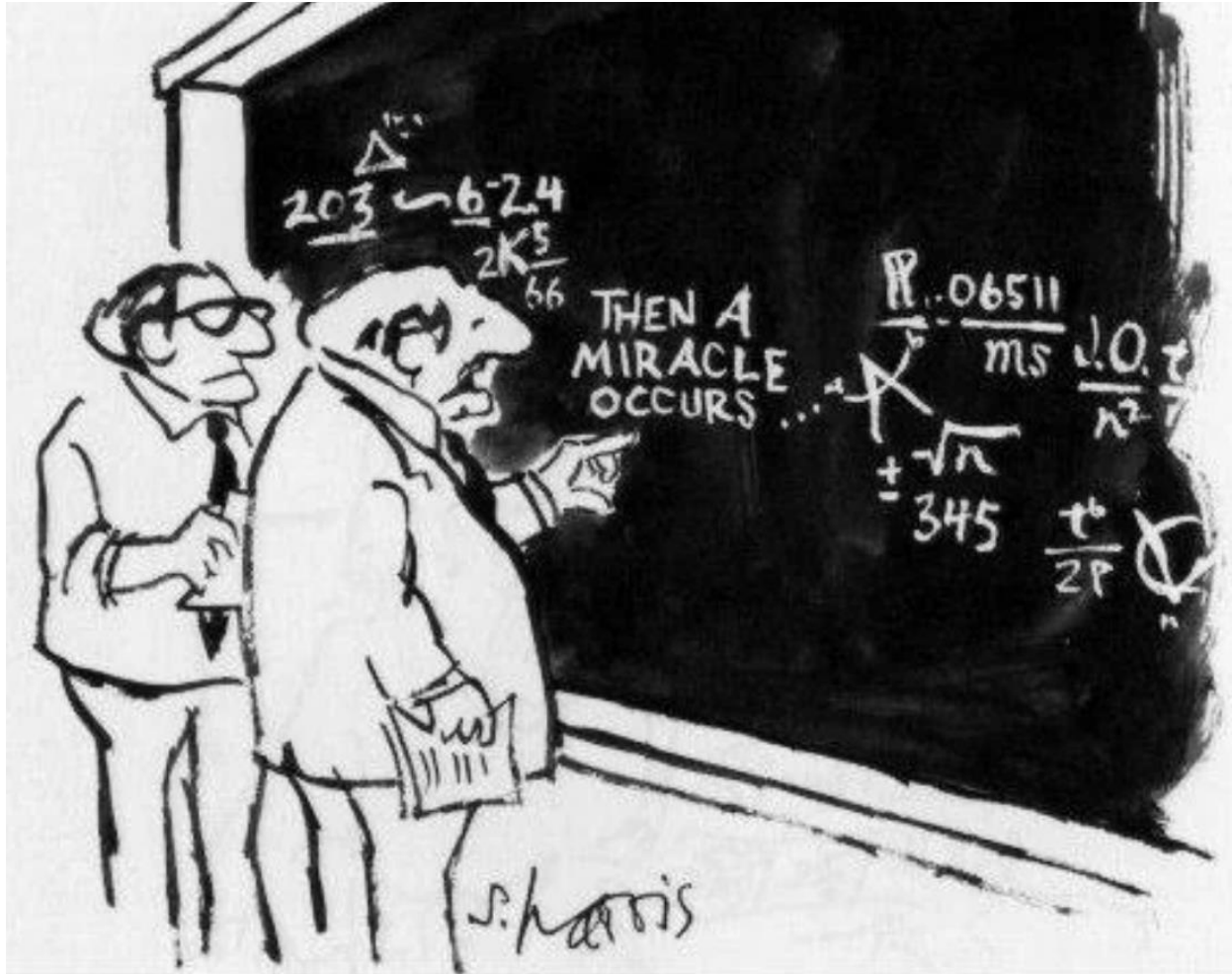
Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

OurWorldinData.org/energy | CC BY

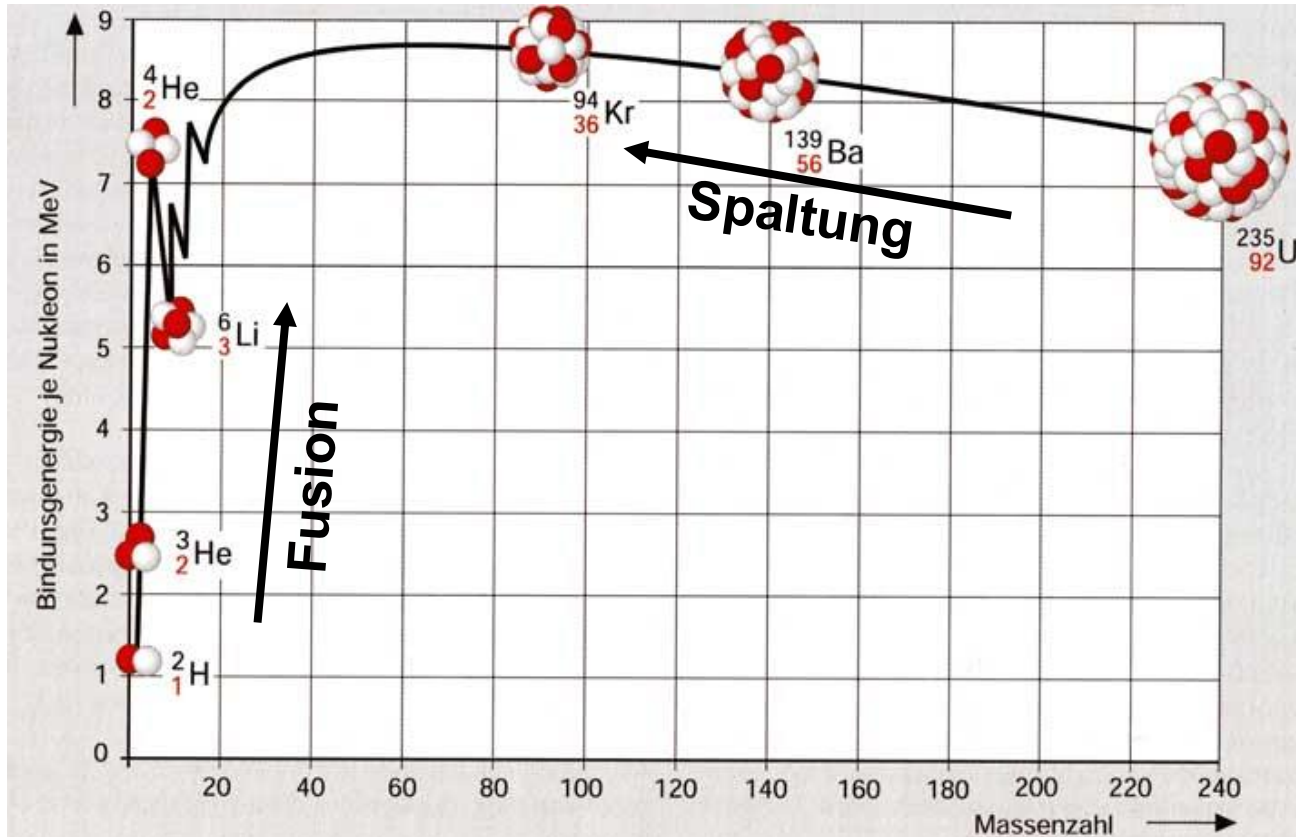
Ein Wunder muss her!



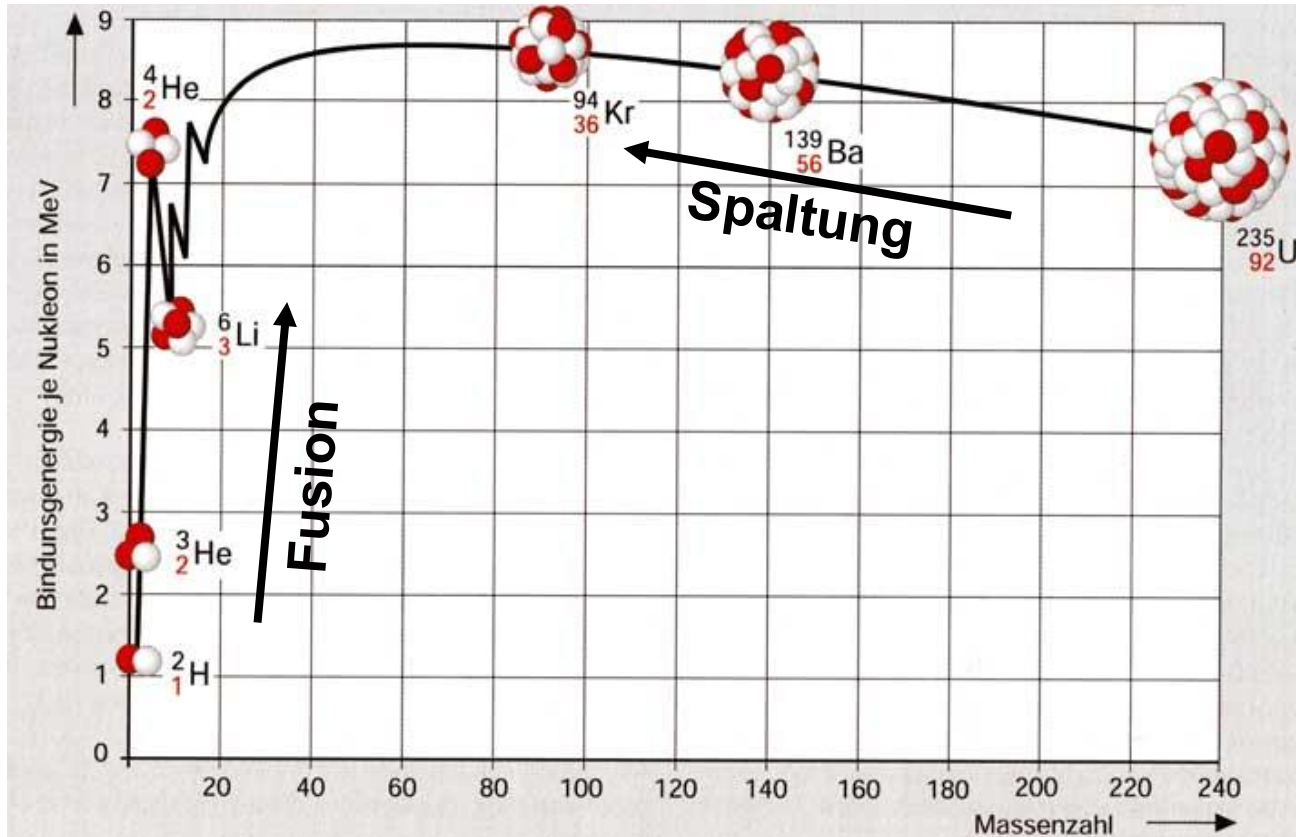
Ein Wunder muss her!



Konzept Fusion: Bindungsenergien



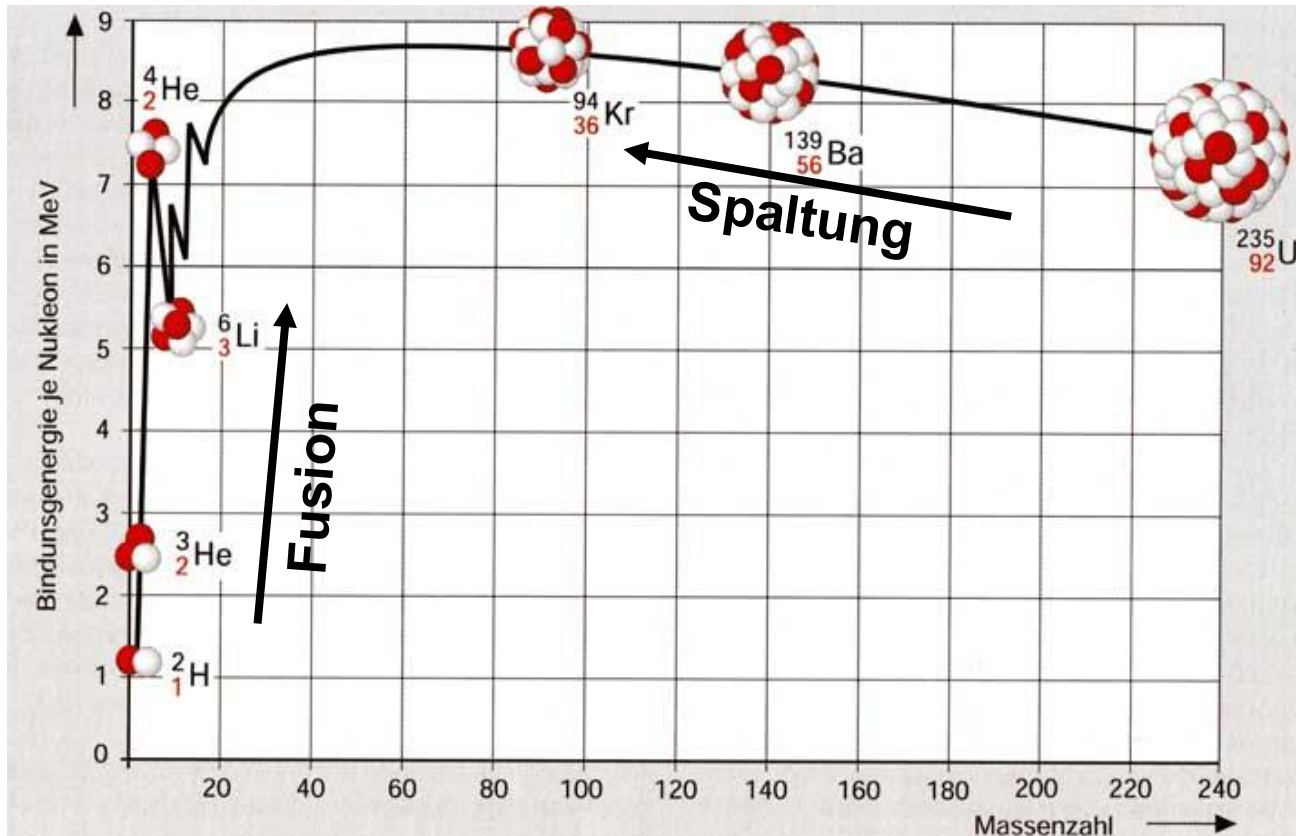
Konzept Fusion: Bindungsenergien



Kernkraft („starke Wechselwirkung“):

- Protonen und Neutronen ziehen sich an (wenn sie eng genug beieinander sind)
- Wirkt nur auf die nächsten Nachbarn
- Mehr nächste Nachbarn in größeren Kernen

Konzept Fusion: Bindungsenergien



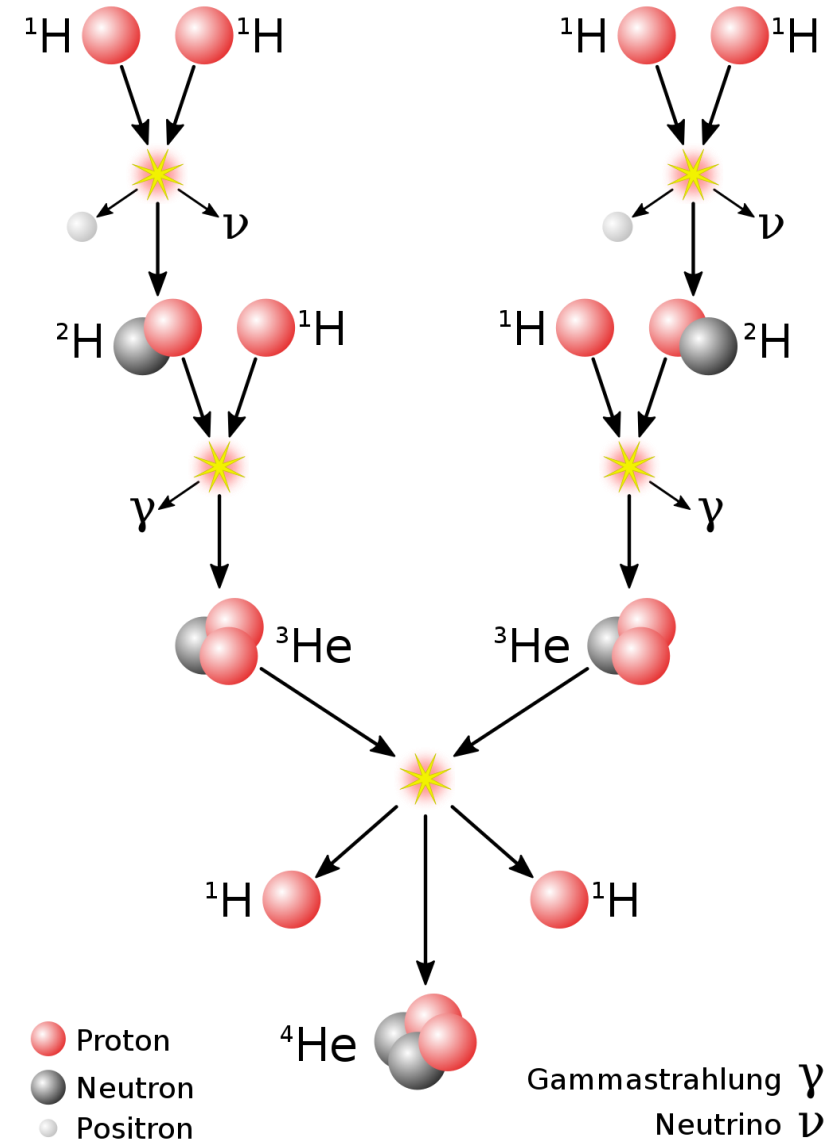
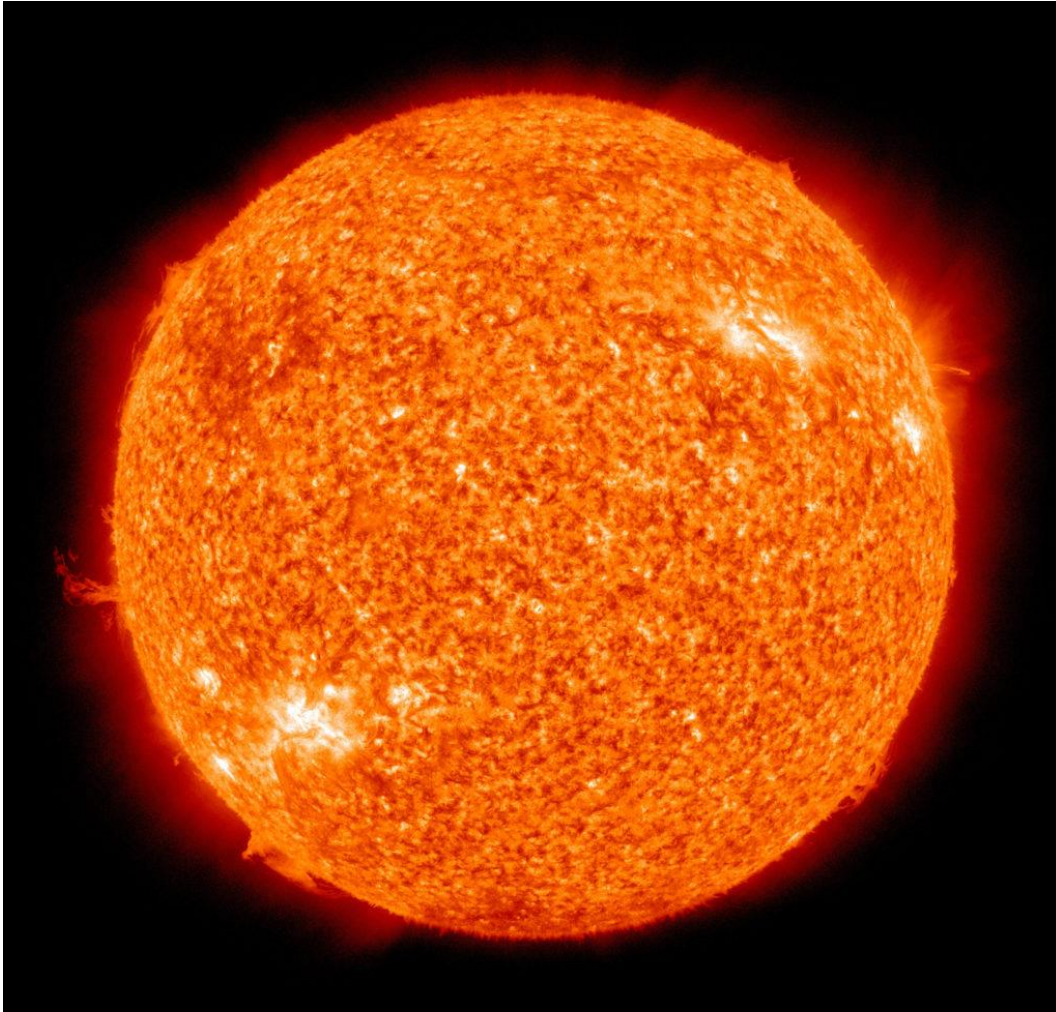
Kernkraft („starke Wechselwirkung“):

- Protonen und Neutronen ziehen sich an (wenn sie eng genug beieinander sind)
- Wirkt nur auf die nächsten Nachbarn
- Mehr nächste Nachbarn in größeren Kernen

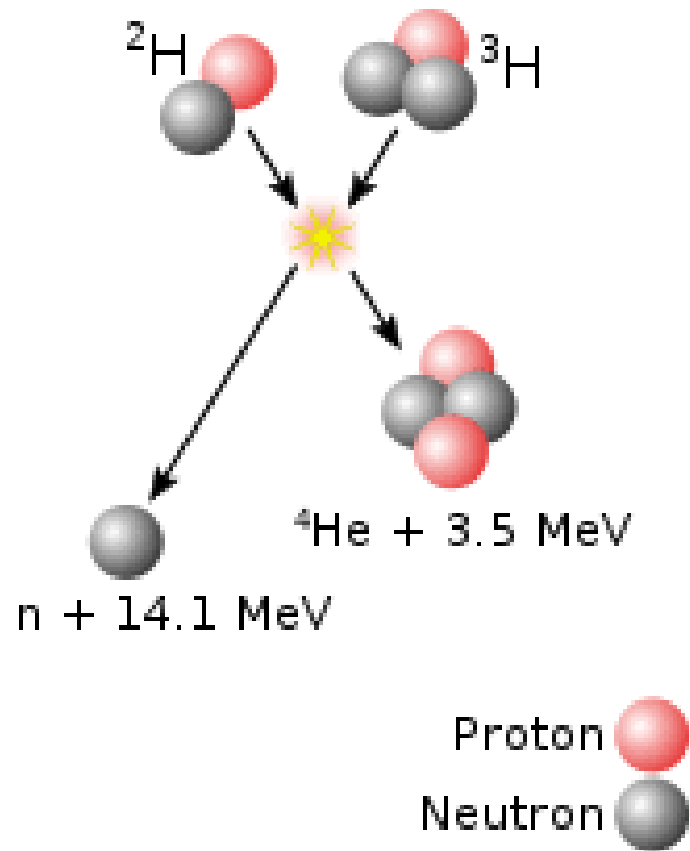
Elektromagnetische Kraft:

- Positiv geladene Protonen stoßen sich ab
- Lange Reichweite im Vergleich zur Kernkraft: alle Protonen „sehen“ sich im Kern
- Abstoßung limitiert maximale Größe von Kernen

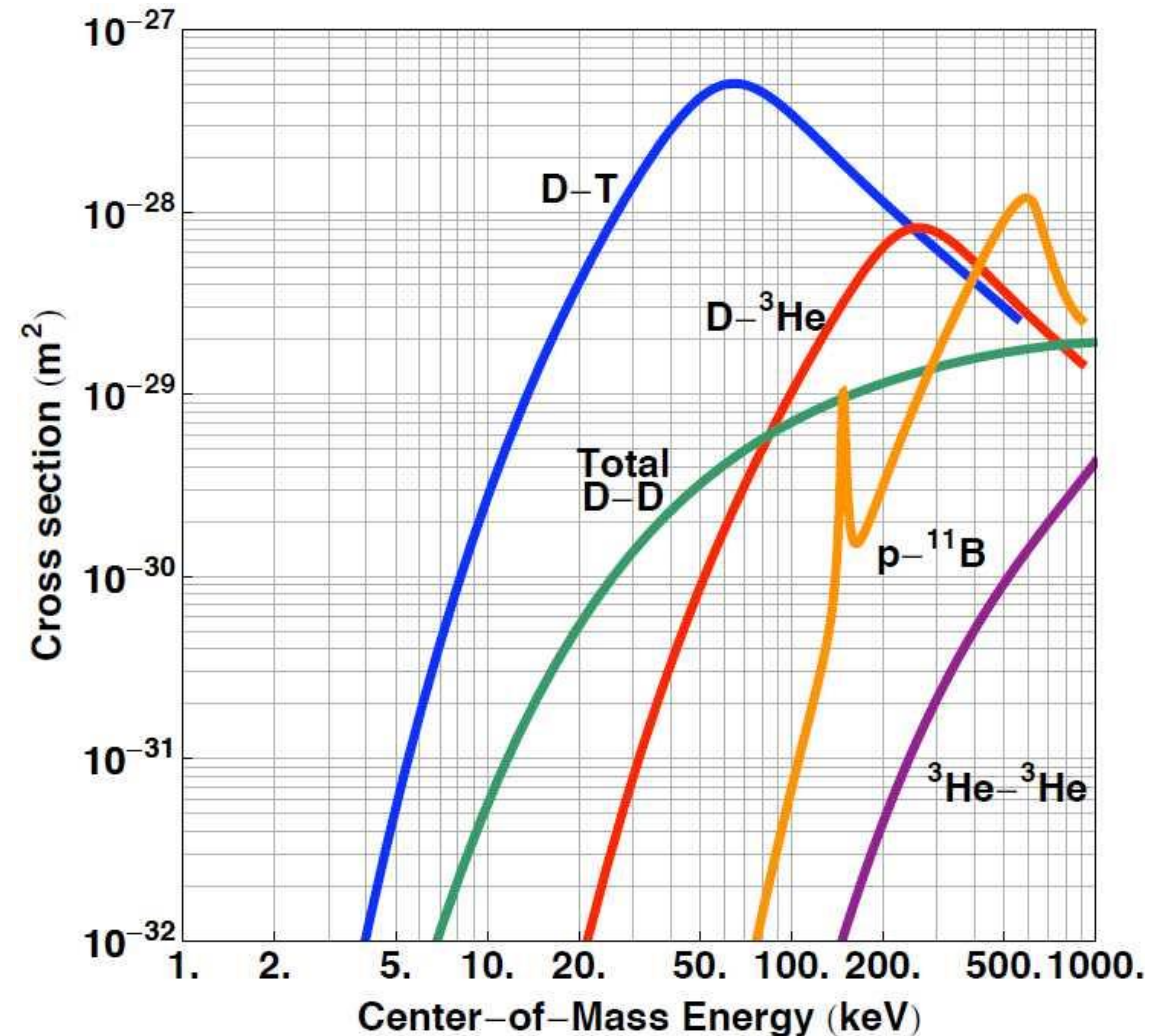
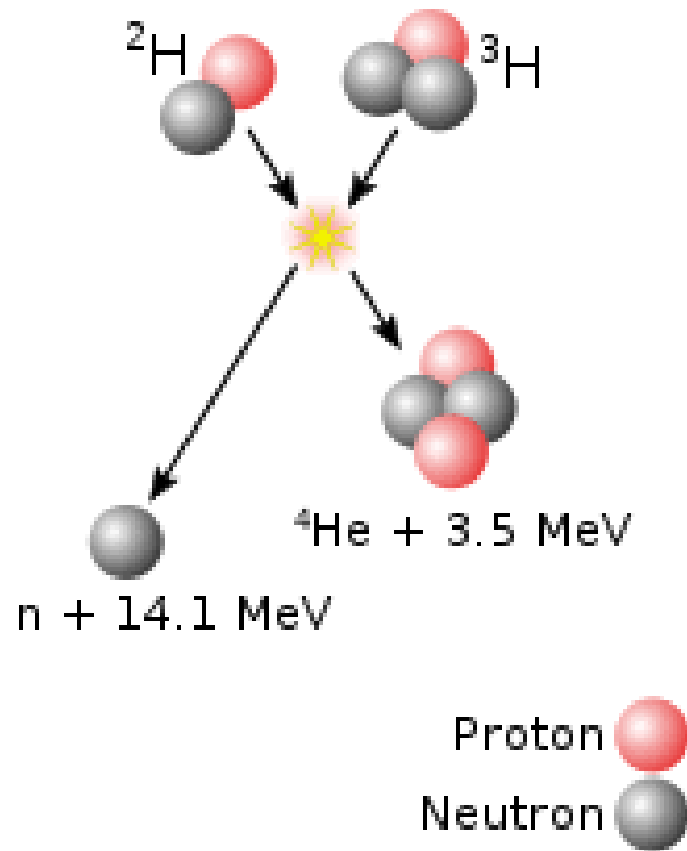
Fusion in der Sonne



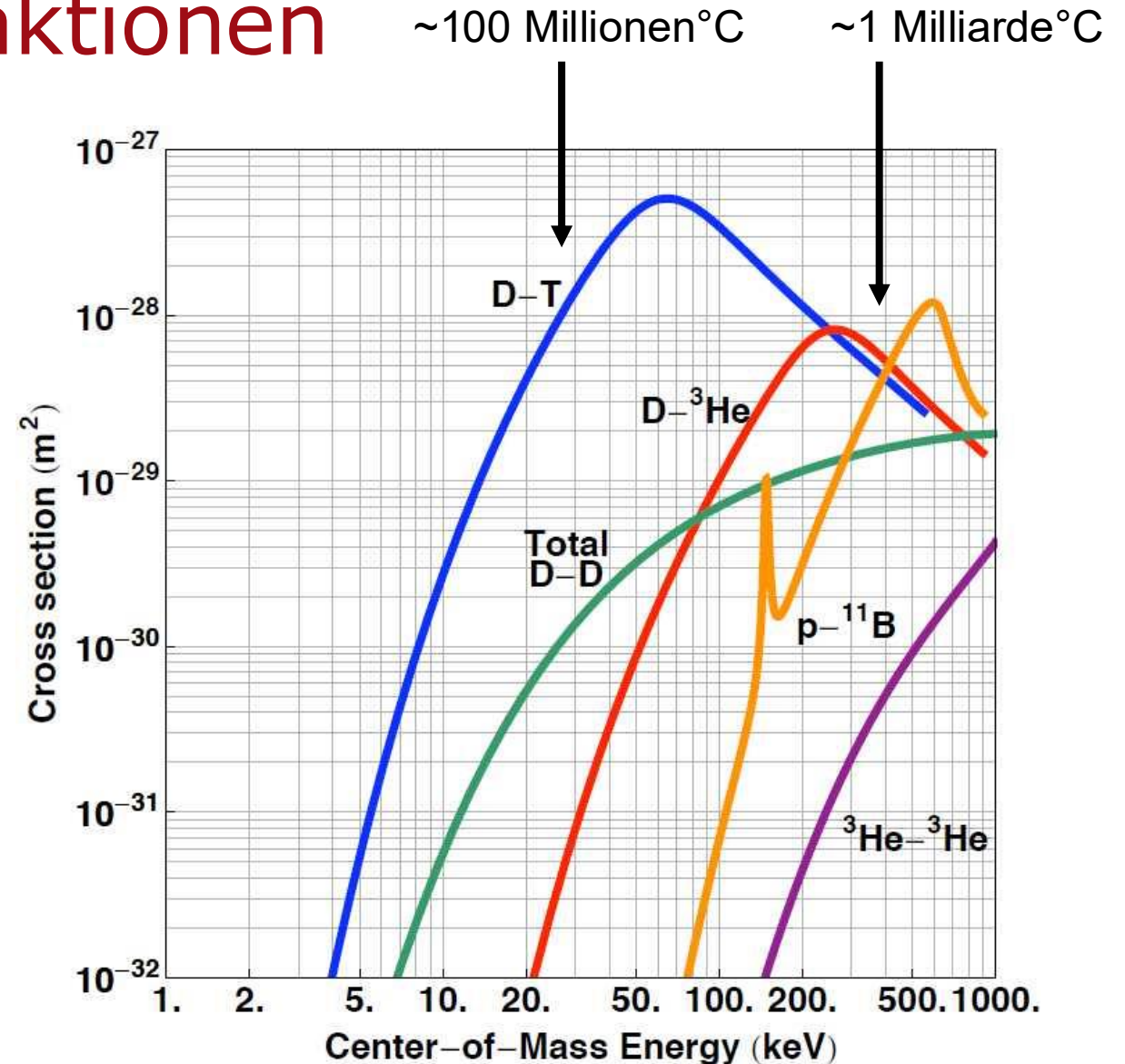
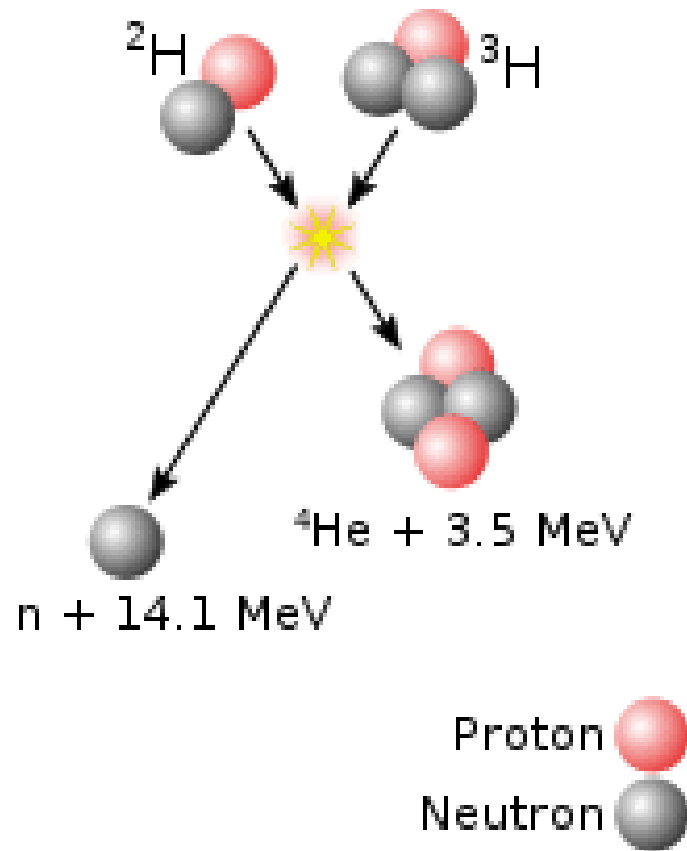
Technische Fusionsreaktionen



Technische Fusionsreaktionen



Technische Fusionsreaktionen



Energiedichte



Kraftwerk Rostock
Feuerungswärme 1370 MW
Elektrische Leistung 514 MW

Beispiel: Kraftwerk mit 1 GW Leistung
ca. 2000t Kohle am Tag

Fusion: wenige 100g DT am Tag

- D aus Wasser:
1-2 große Badewannen Wasser / Tag
- T aus Lithium
1000 Handy-Akkus am Tag
Tesla-Akku reicht mehrere Monate

Fusion findet im Plasmazustand statt



fest



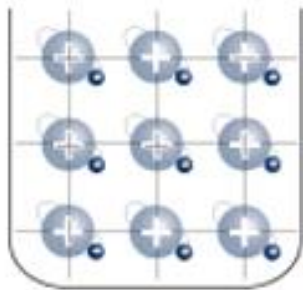
flüssig



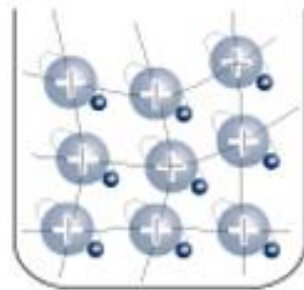
gasförmig



Plasma



Energie →



Energie →

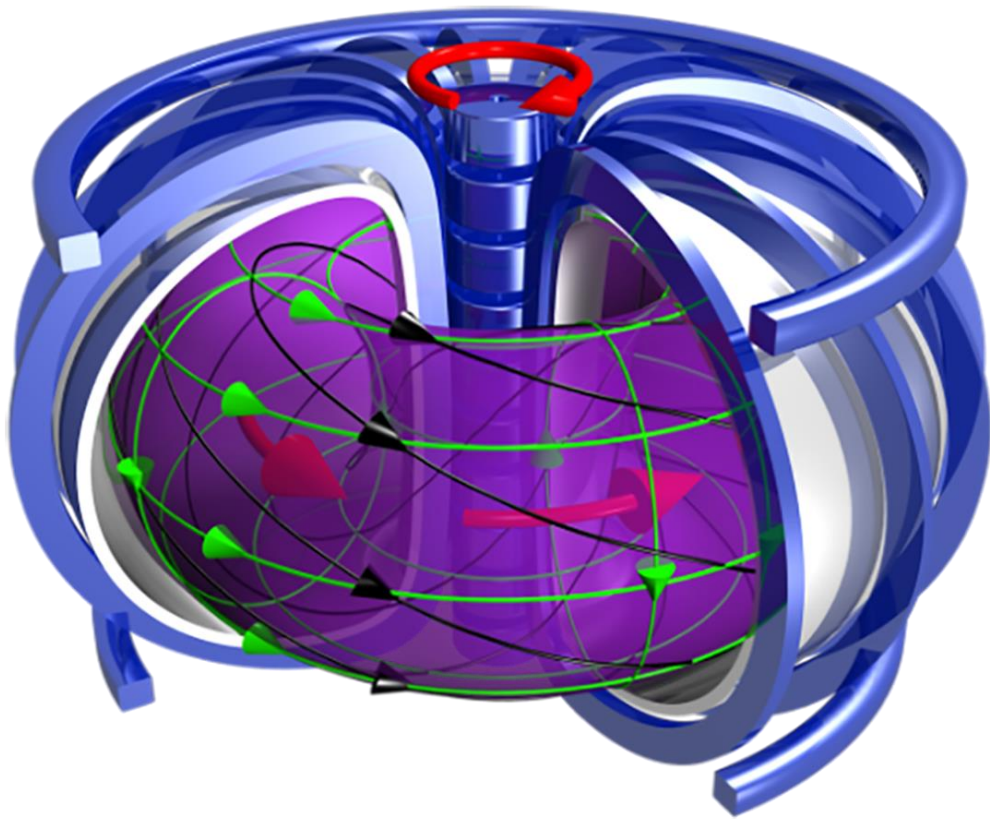


Energie →



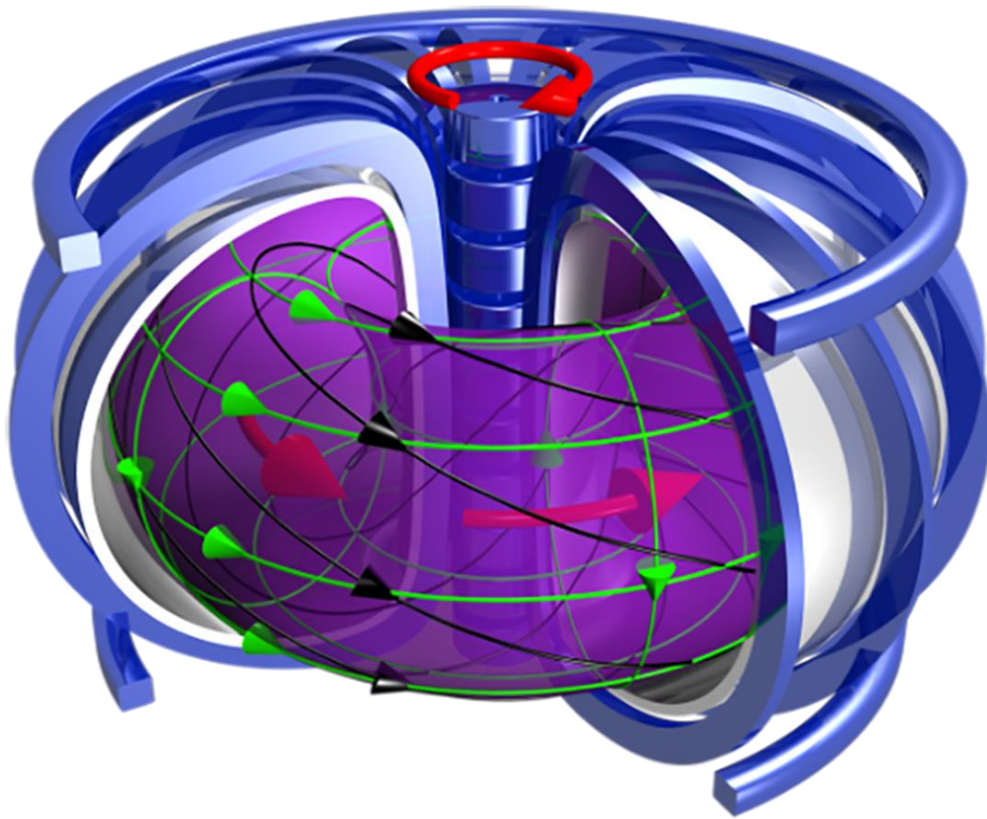
Ansätze zum Plasmaeinschluss für die Fusion

Magnetfusion

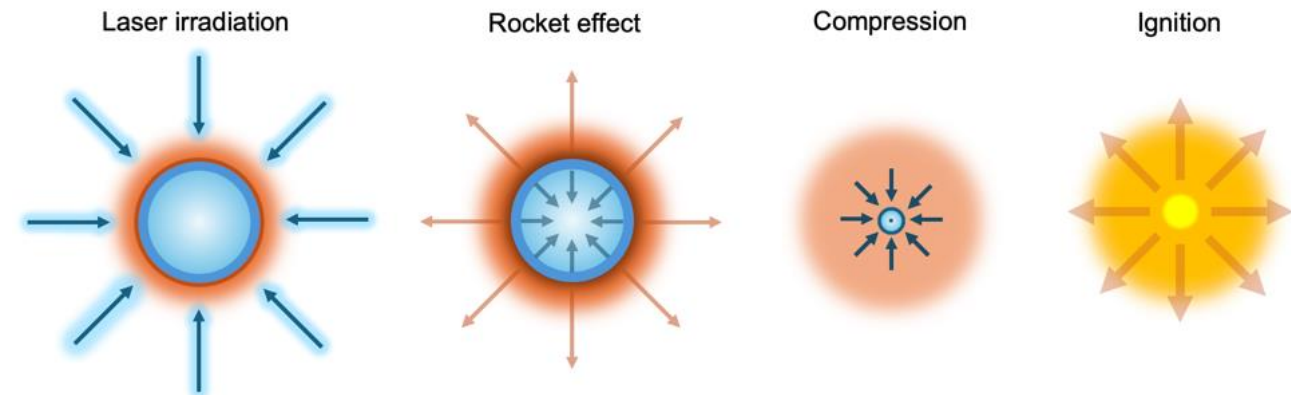


Ansätze zum Plasmaeinschluss für die Fusion

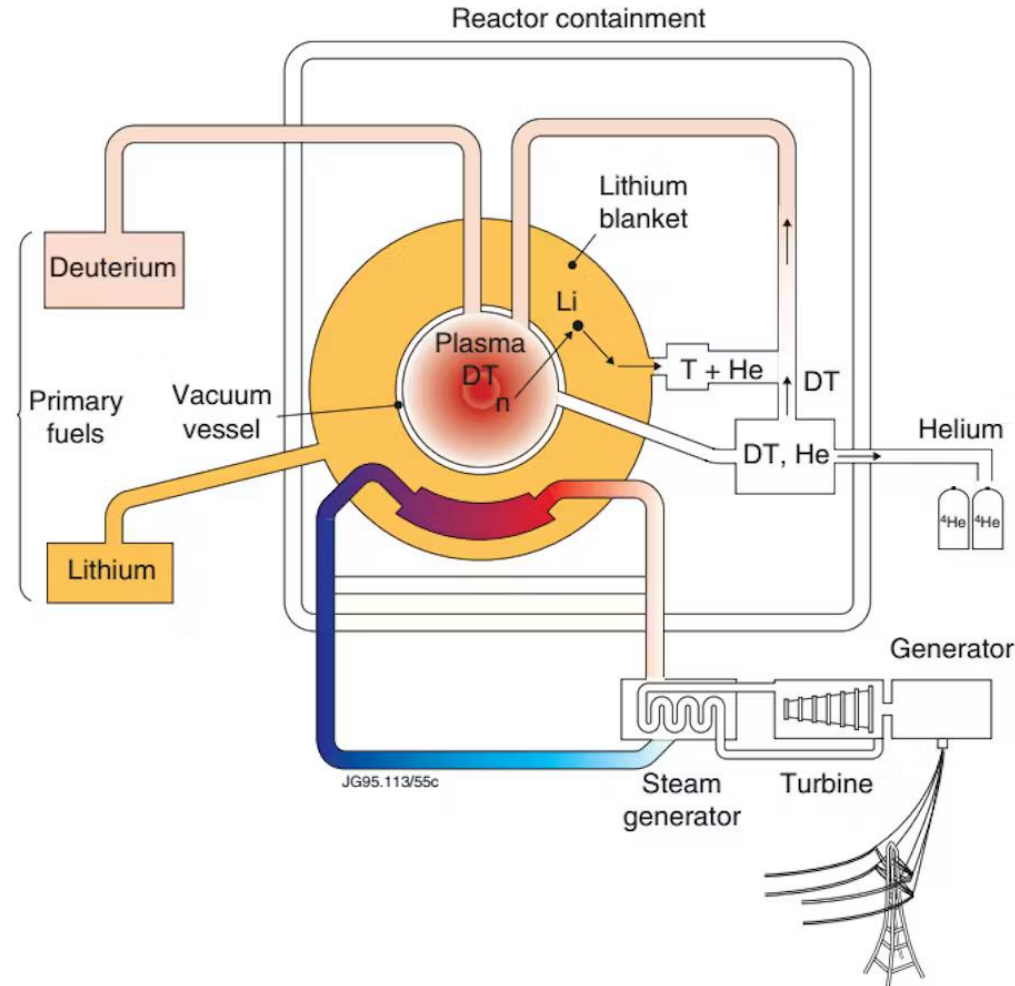
Magnetfusion



Trägheitsfusion („Laserfusion“)



Konzept eines Fusionsreaktors



Ansätze zur Energiegewinnung durch Kernfusion

Magnetfusion



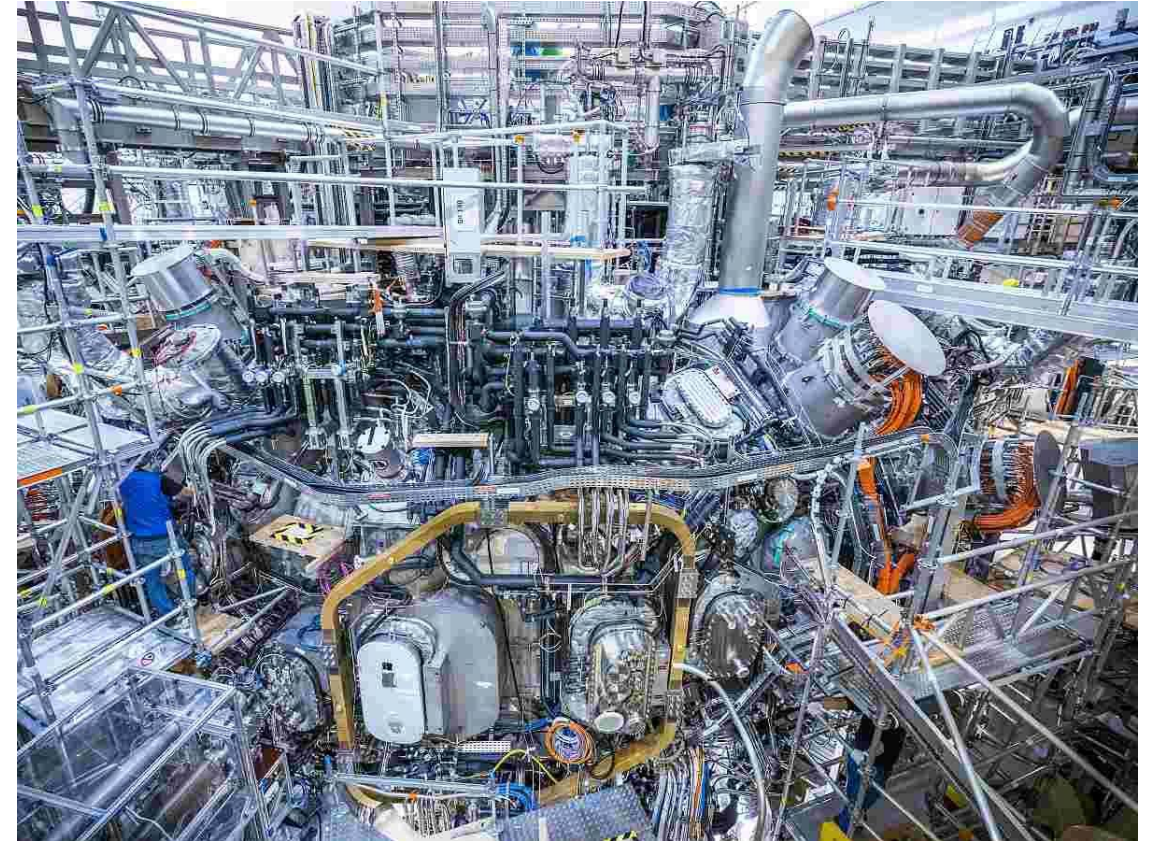
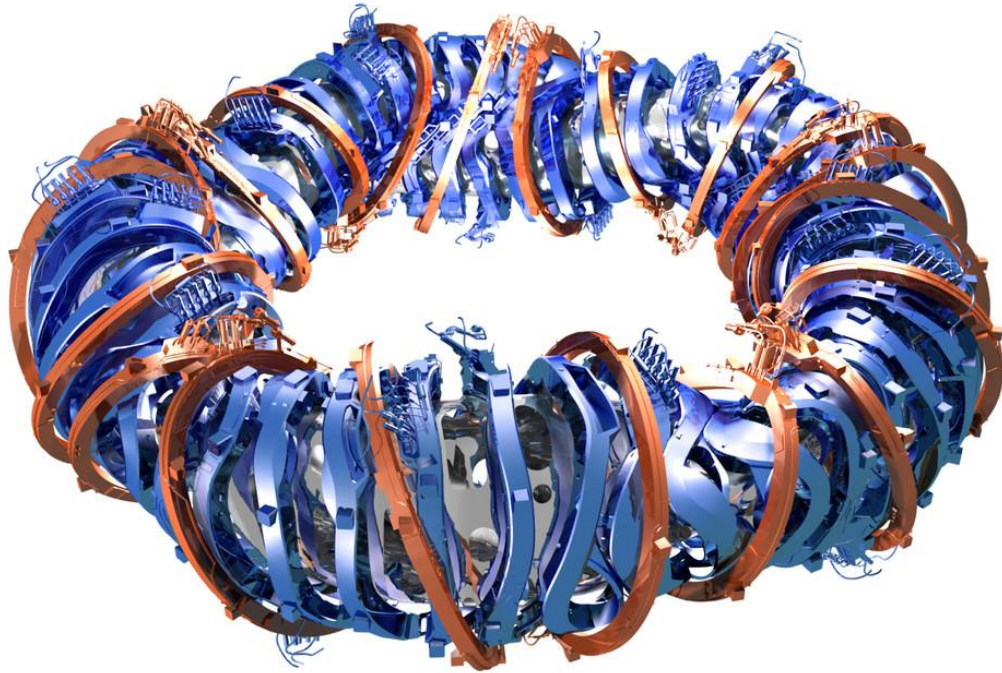
ITER
~50 Mrd. \$ Baukosten

Trägheitsfusion („Laserfusion“)



National Ignition Facility (NIF)
~3.4 Mrd. \$ Baukosten

Wendelstein 7-X in Greifswald



Tripelprodukt

“Lawson Kriterium” für brennende D-T-Plasmen
Dichte x Einschlusszeit x Temperatur

Bei 150 Millionen Grad:

$$n\tau_c T > 3.3 \times 10^{21} \frac{\text{s keV}}{\text{m}^3}$$

Unterschiedliche Ansätze:

Niedrige Dichte, lange Einschlusszeiten
→ Magnetfusion

Hohe Dichte, kurze Einschlusszeiten
→ Trägheitsfusion (“Laserfusion”)

Tripelprodukt

“Lawson Kriterium” für brennende D-T-Plasmen
Dichte x Einschlusszeit x Temperatur

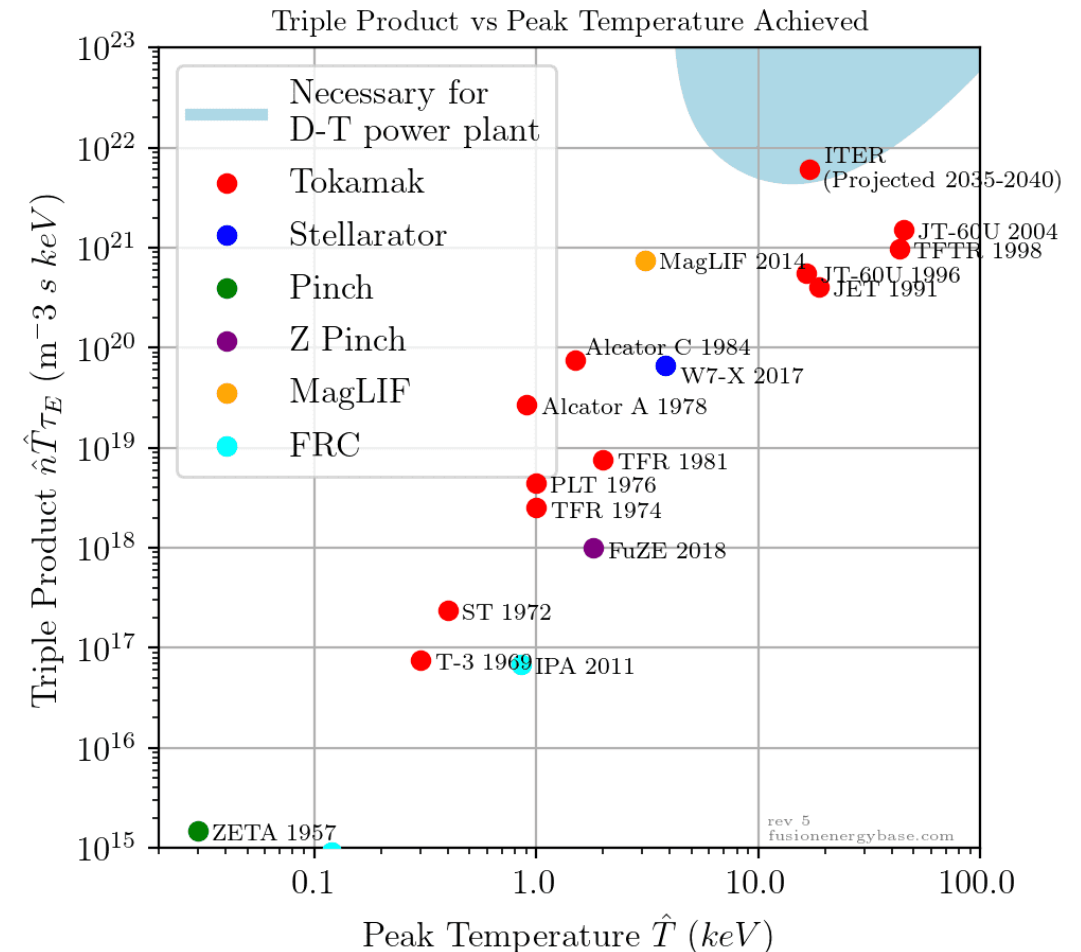
Bei 150 Millionen Grad:

$$n\tau_c T > 3.3 \times 10^{21} \frac{\text{s keV}}{\text{m}^3}$$

Unterschiedliche Ansätze:

Niedrige Dichte, lange Einschlusszeiten
→ Magnetfusion

Hohe Dichte, kurze Einschlusszeiten
→ Trägheitsfusion (“Laserfusion”)



Tripelprodukt

“Lawson Kriterium” für brennende D-T-Plasmen
Dichte x Einschlusszeit x Temperatur

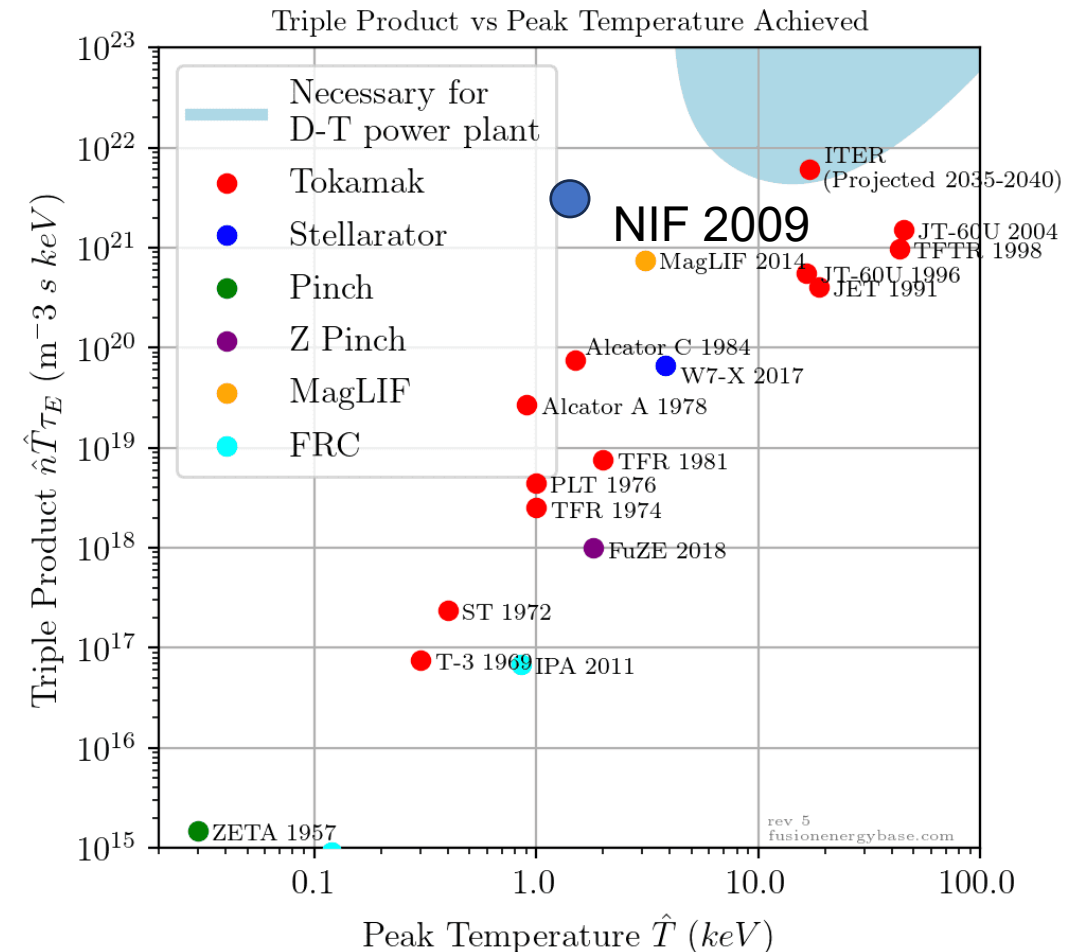
Bei 150 Millionen Grad:

$$n\tau_c T > 3.3 \times 10^{21} \frac{\text{s keV}}{\text{m}^3}$$

Unterschiedliche Ansätze:

Niedrige Dichte, lange Einschlusszeiten
→ Magnetfusion

Hohe Dichte, kurze Einschlusszeiten
→ Trägheitsfusion (“Laserfusion”)



Tripelprodukt

“Lawson Kriterium” für brennende D-T-Plasmen
Dichte x Einschlusszeit x Temperatur

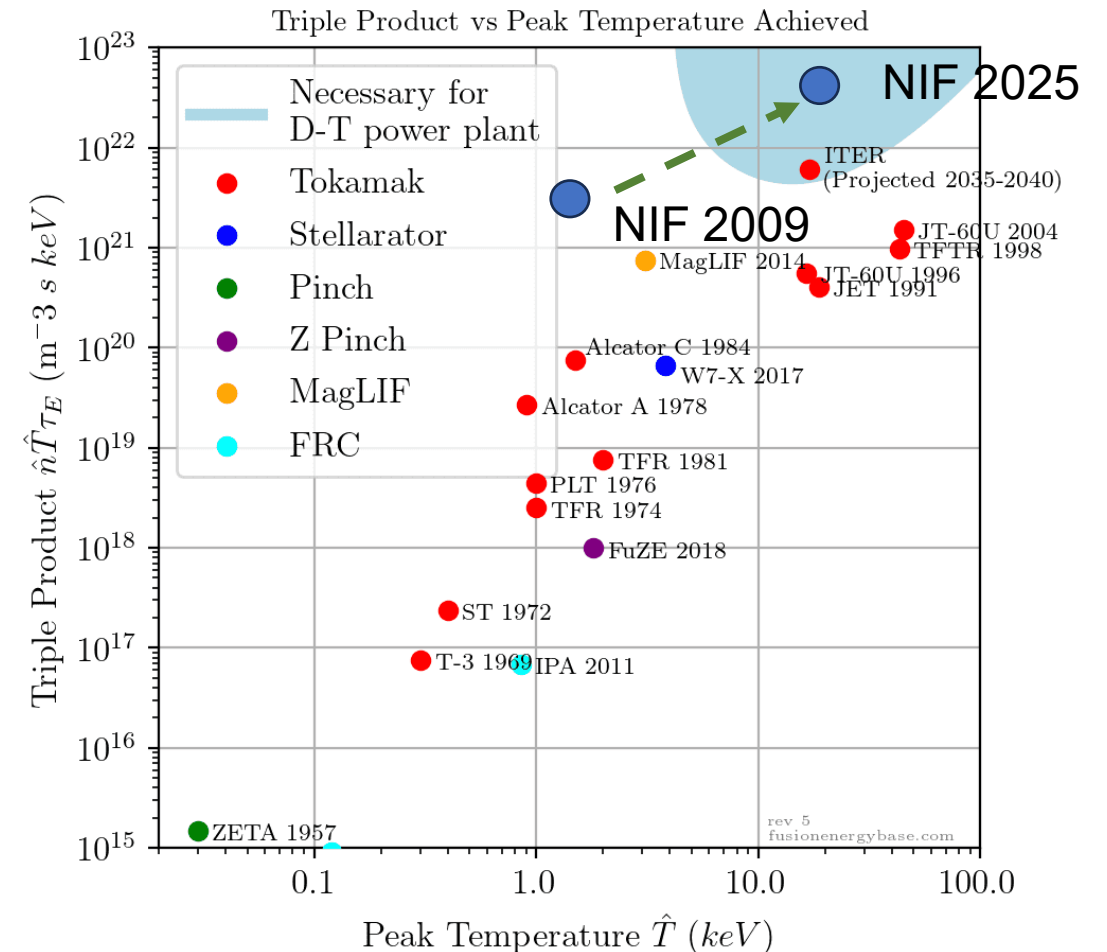
Bei 150 Millionen Grad:

$$n\tau_c T > 3.3 \times 10^{21} \frac{\text{s keV}}{\text{m}^3}$$

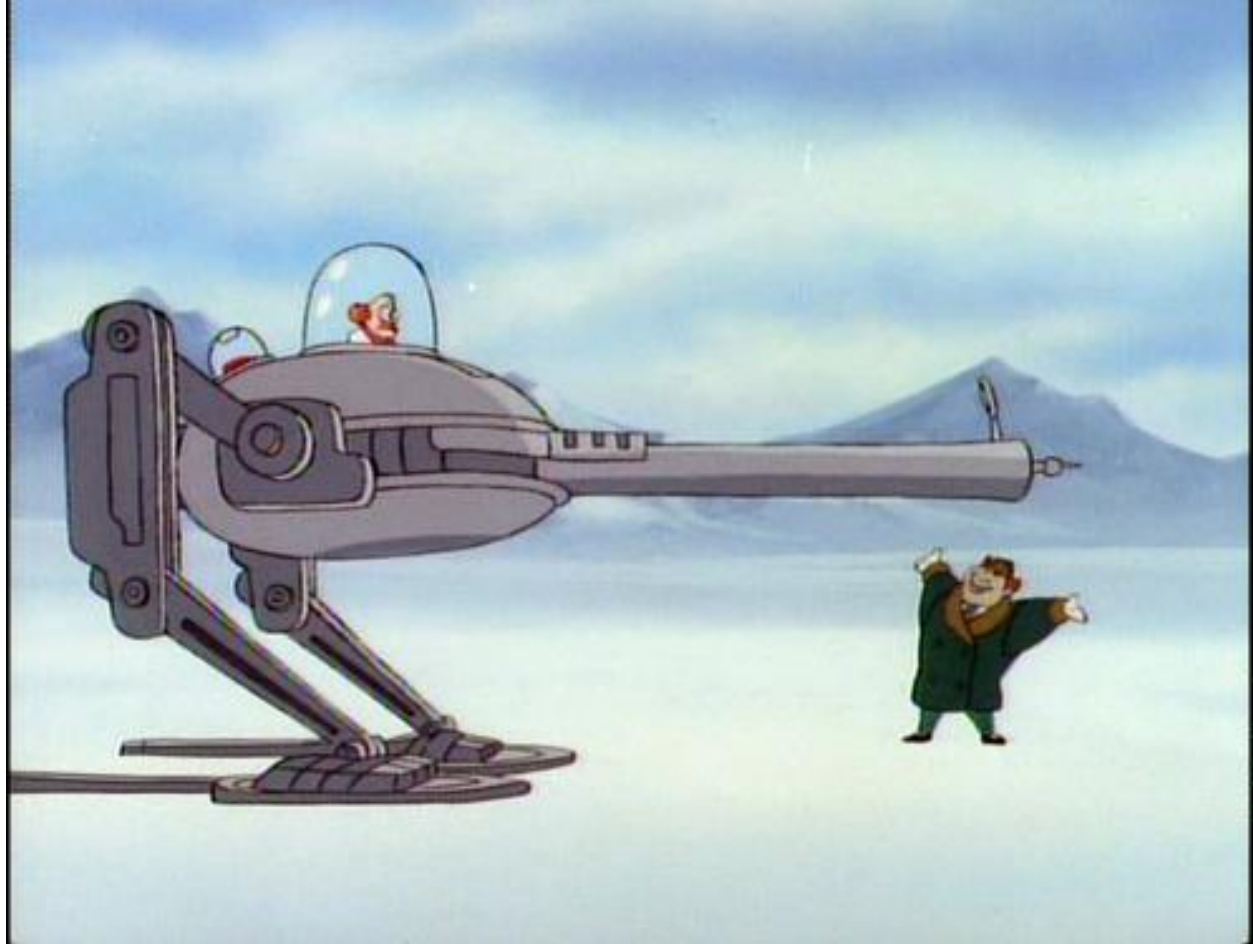
Unterschiedliche Ansätze:

Niedrige Dichte, lange Einschlusszeiten
→ Magnetfusion

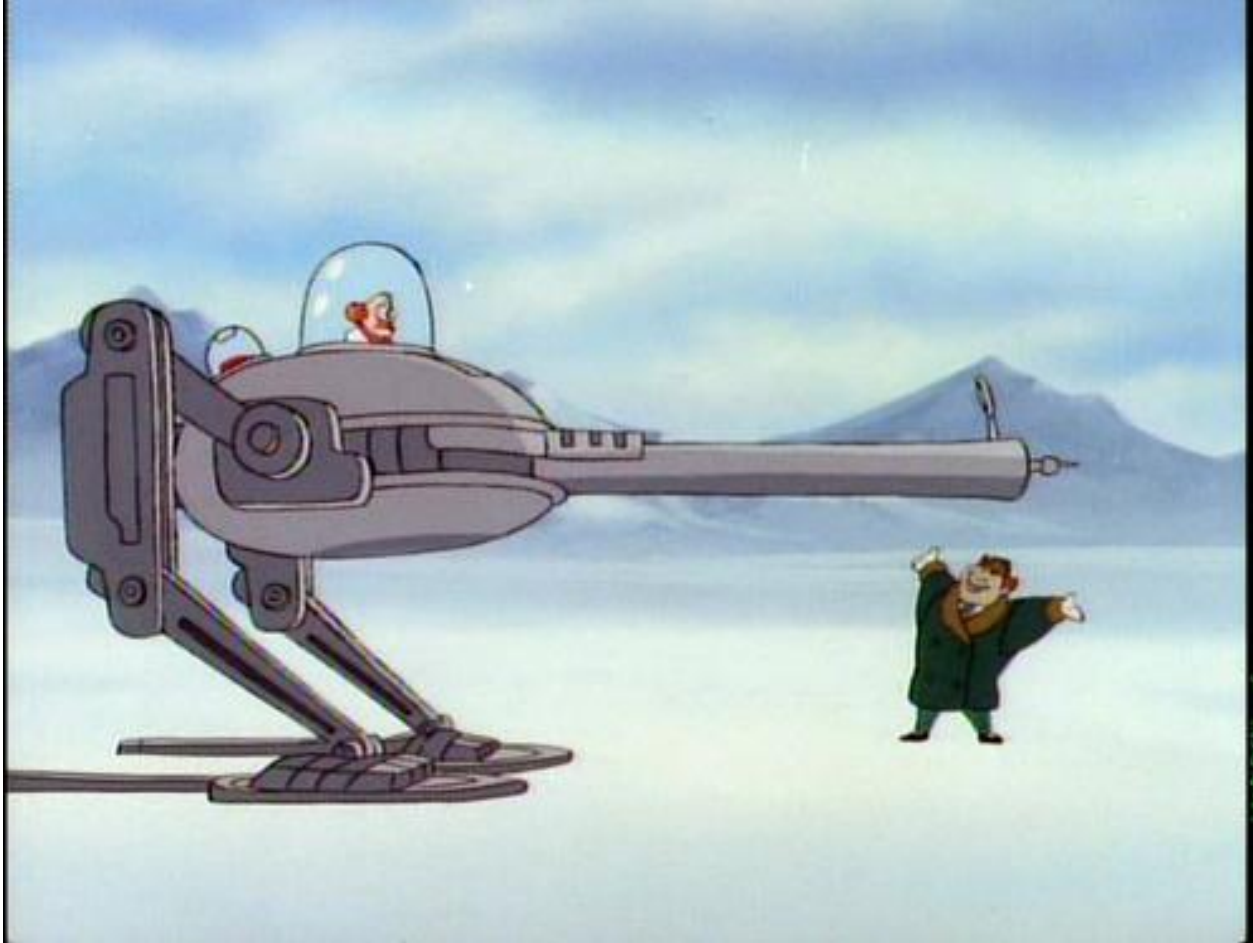
Hohe Dichte, kurze Einschlusszeiten
→ Trägheitsfusion (“Laserfusion”)



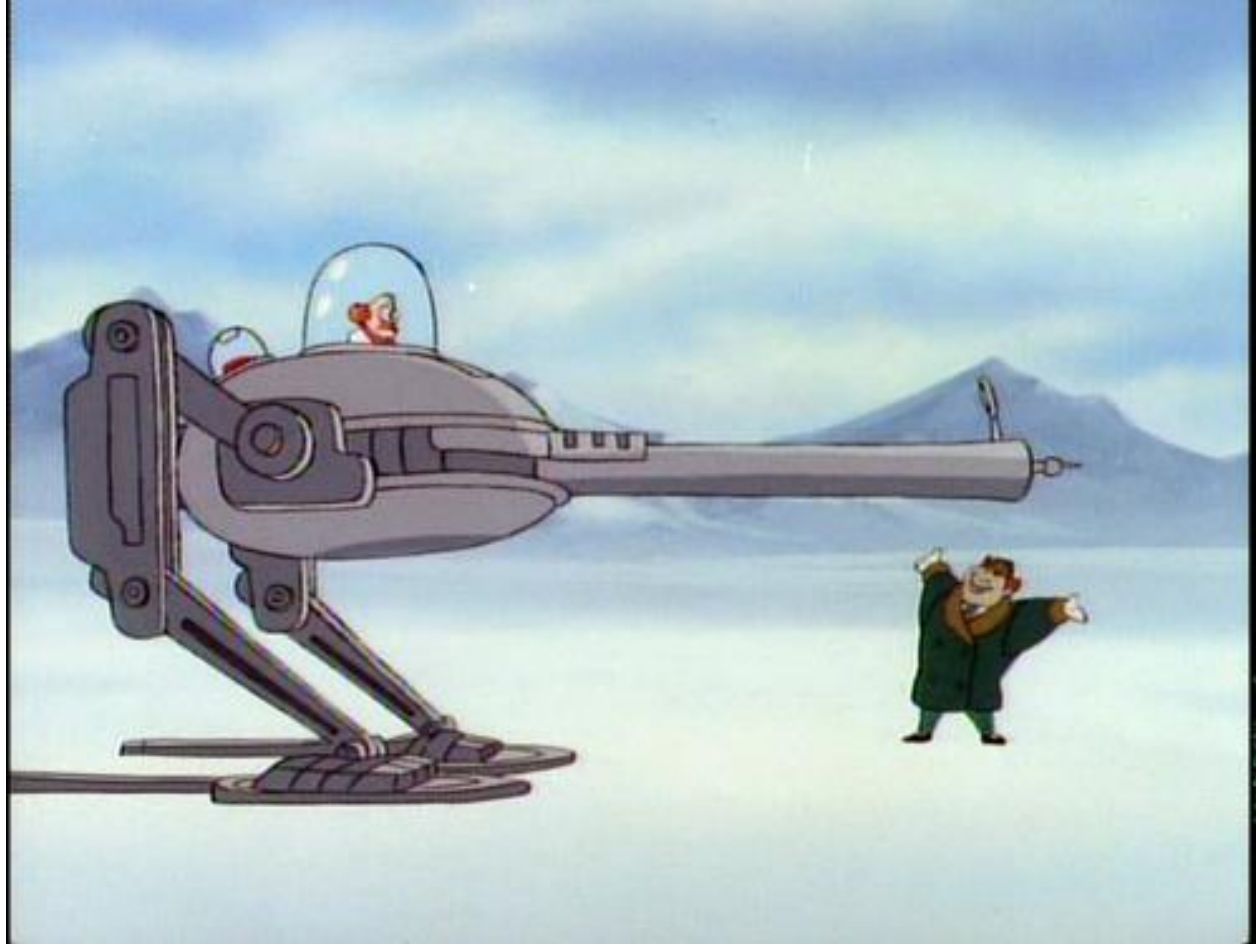
Starke Laser



Starke Laser



Starke Laser



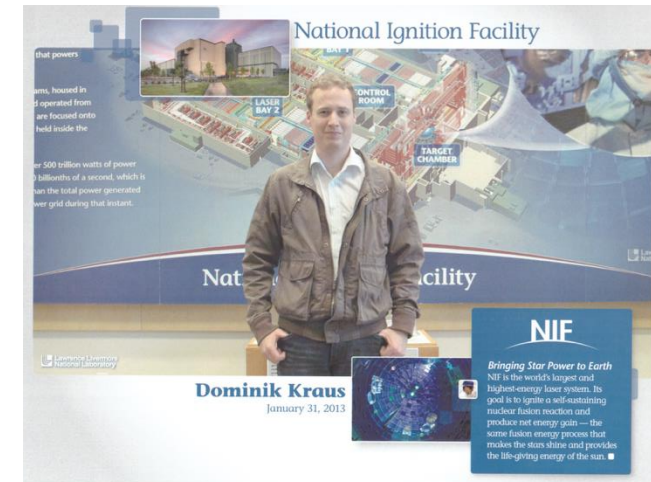
National Ignition Facility



National Ignition Facility

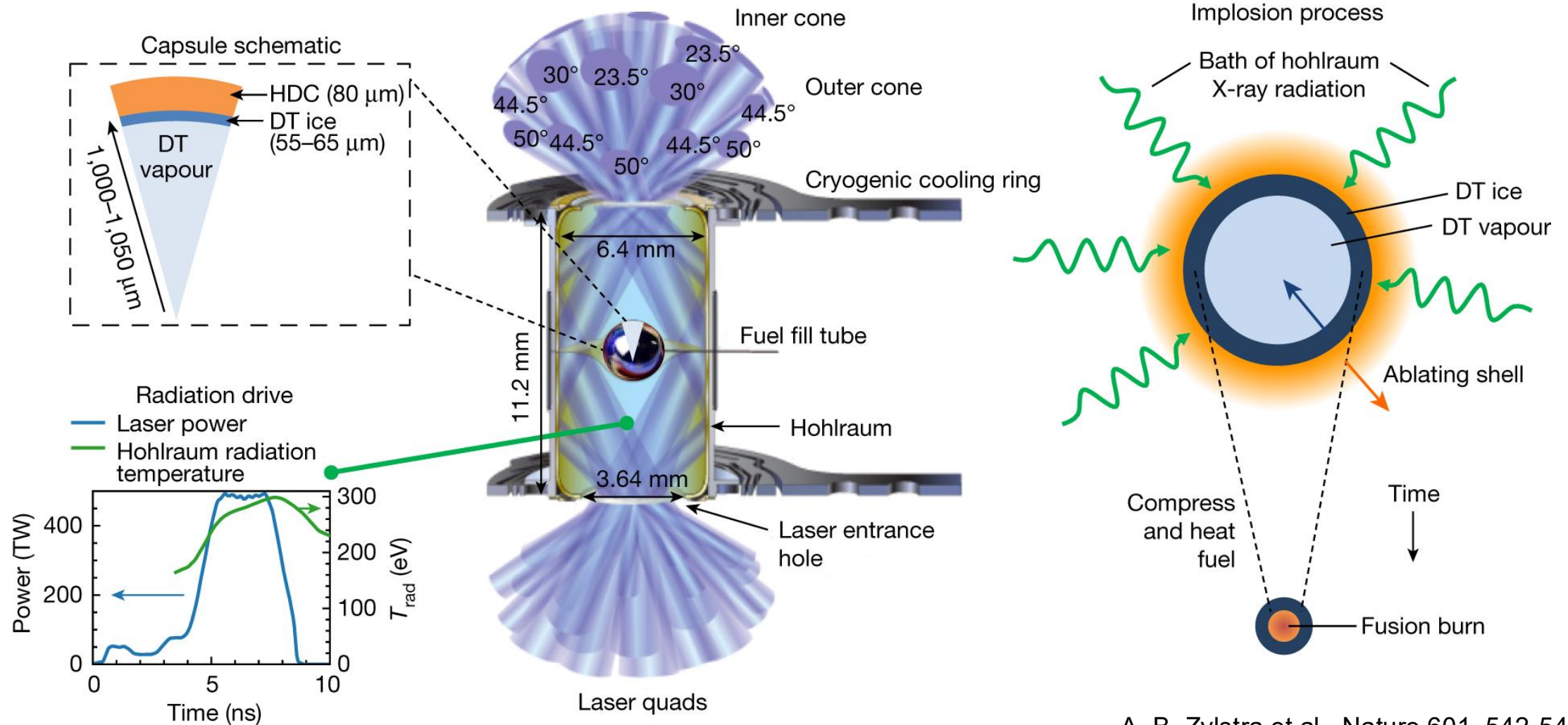


National Ignition Facility



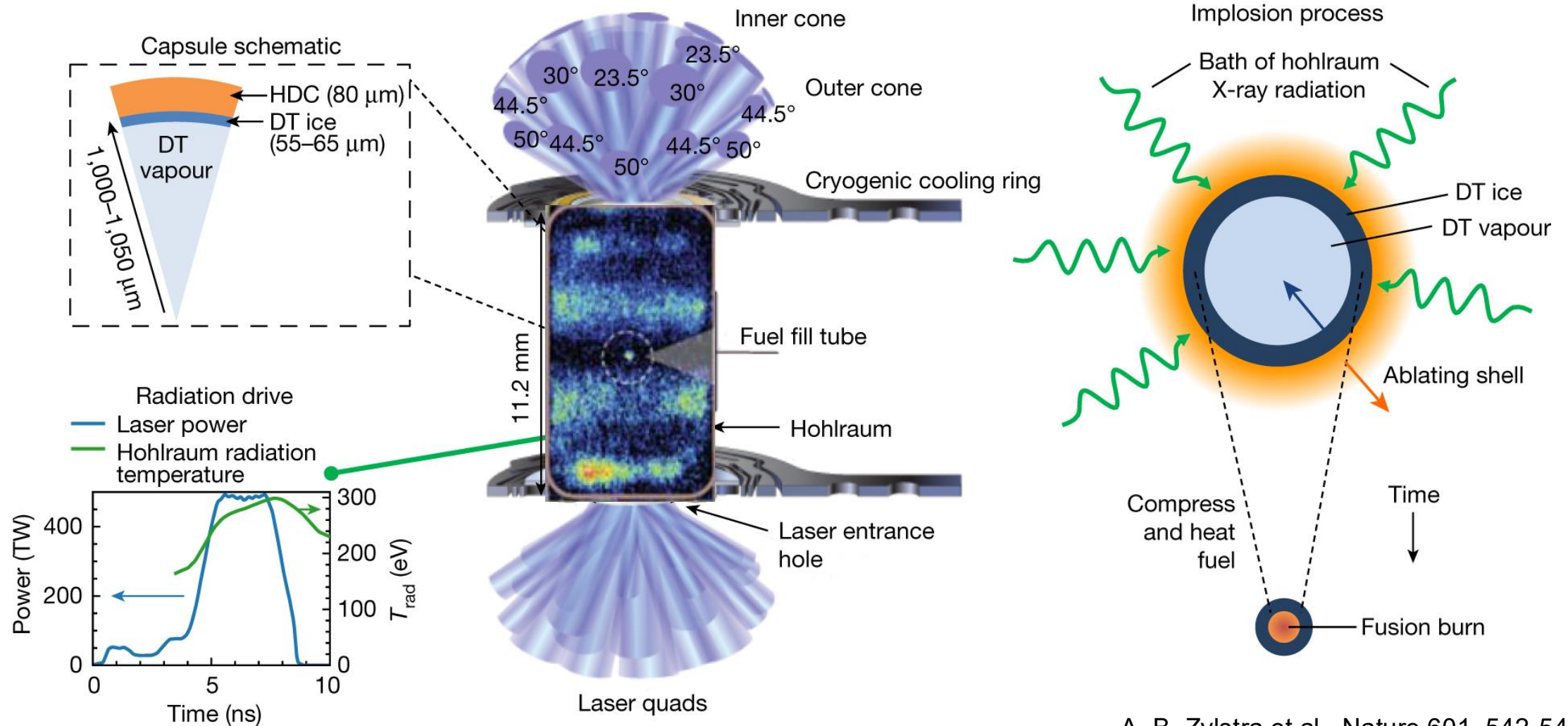
D.K. bei NIF (2013 - 2016)
(hatte gehofft "Ignition" mitzubekommen ...)

Fusionsexperimente an der National Ignition Facility



A. B. Zylstra et al., Nature 601, 542-548 (2022)

Fusionsexperimente an der National Ignition Facility

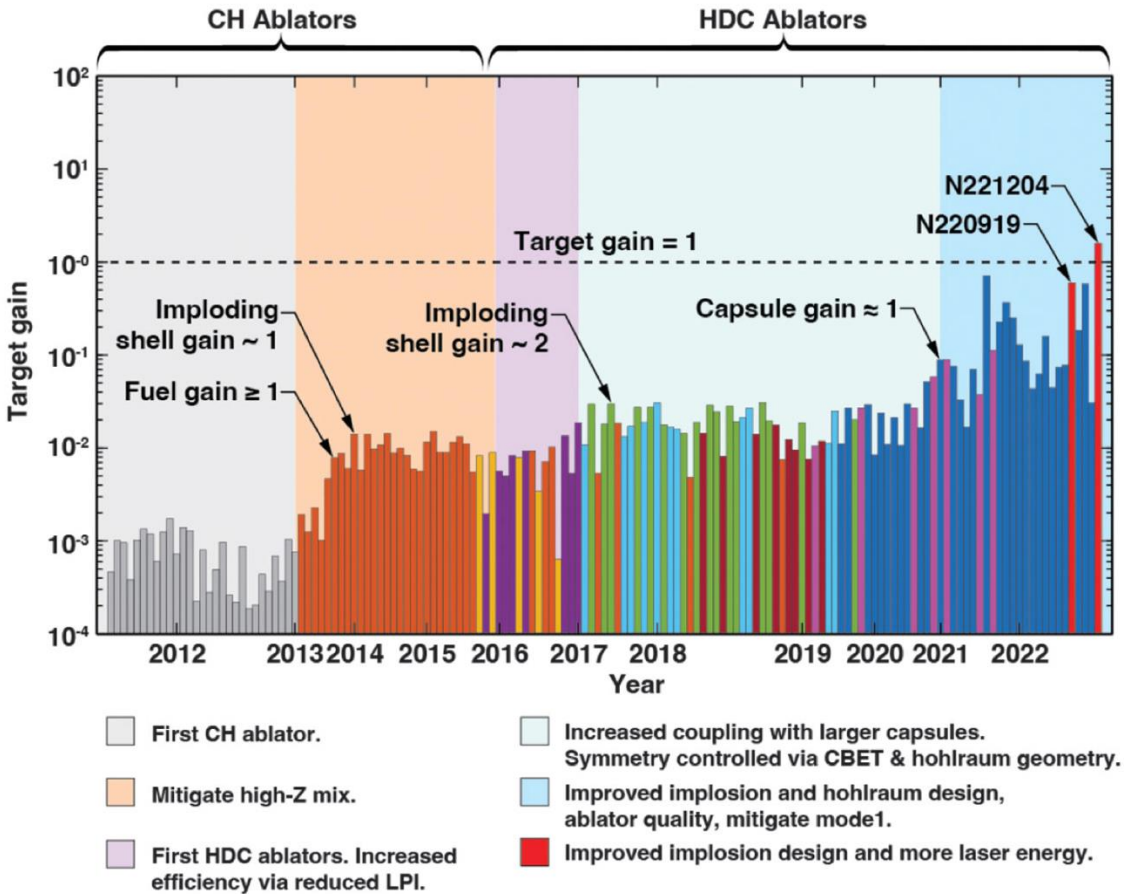


A. B. Zylstra et al., Nature 601, 542-548 (2022)

Im Jahr 2022: Ignition – Zündung!



Im Jahr 2022: Ignition – Zündung!



Fusionsstartups (wahrscheinlich nicht ganz aktuell)



generalfusion



CROSSFIELD

Tokamak Energy

FOCUSED ENERGY

GAUSS FUSION

EX-Fusion

Helical Fusion



fuse

first light

Proxima Fusion

MarvelFusion

KYOTO FUSIONEERING



RENAISSANCE FUSION



NOVATRON



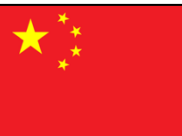
nT-tao



HB11 ENERGY
LASER BORON FUSION



OPENSTAR TECHNOLOGIES LTD

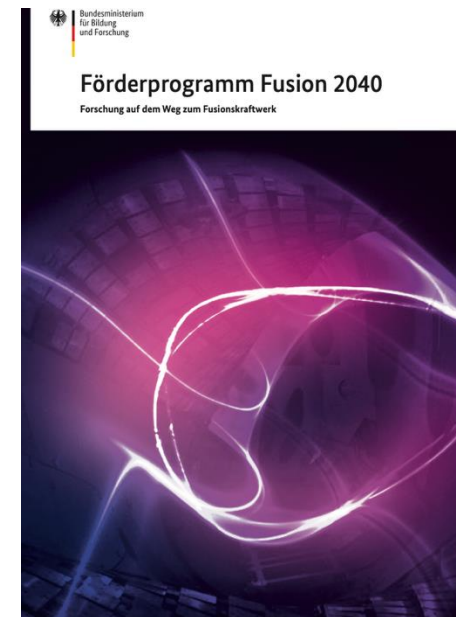
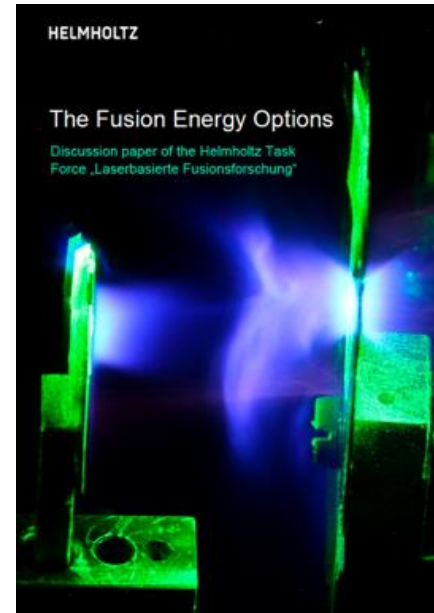
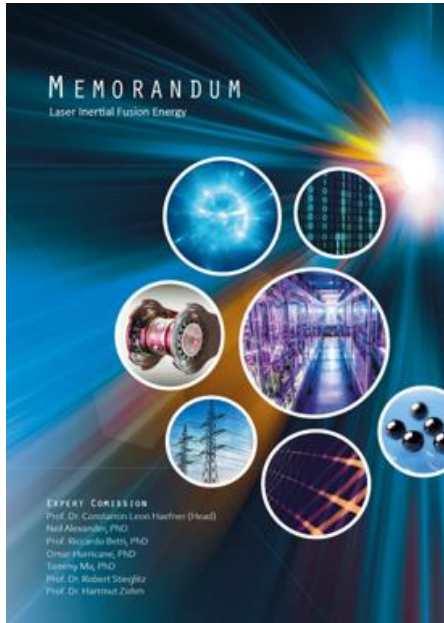


ENN 新奥

GenF
Fusion Generated Energy

>6 Mrd private Investments in Fusionsenergie

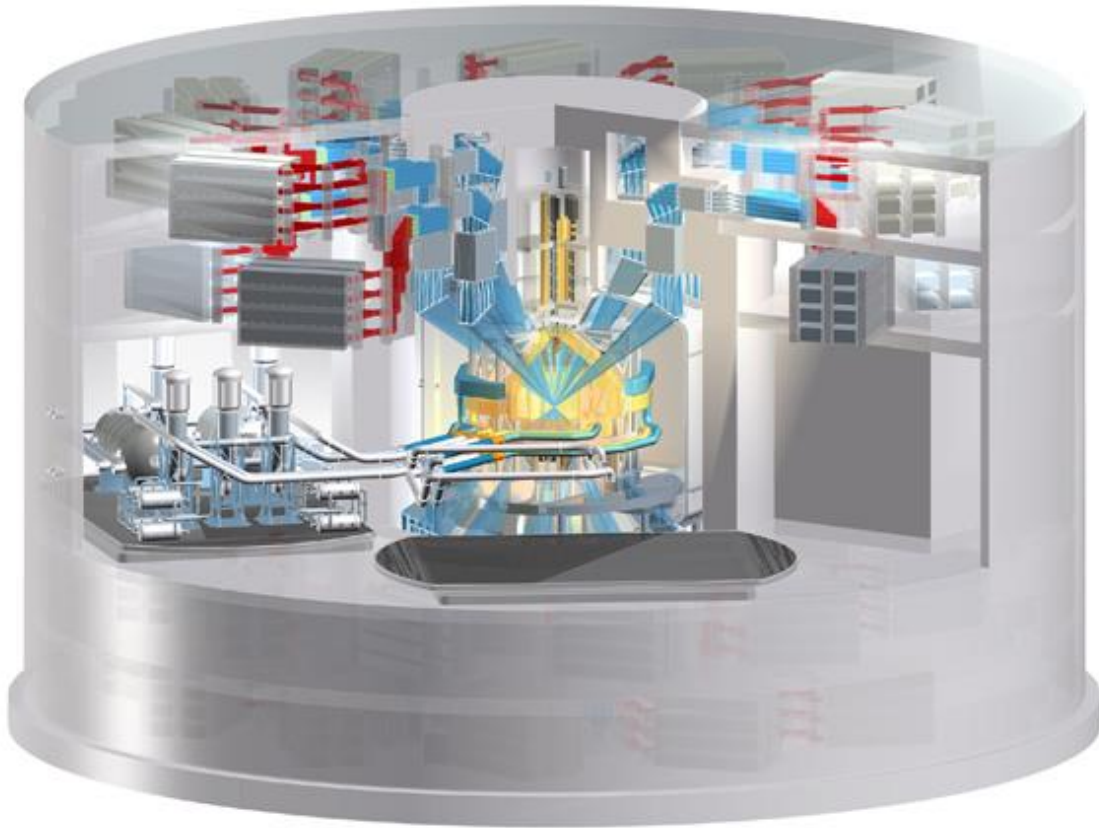
Verstärkte Förderung der Fusion durch den Bund



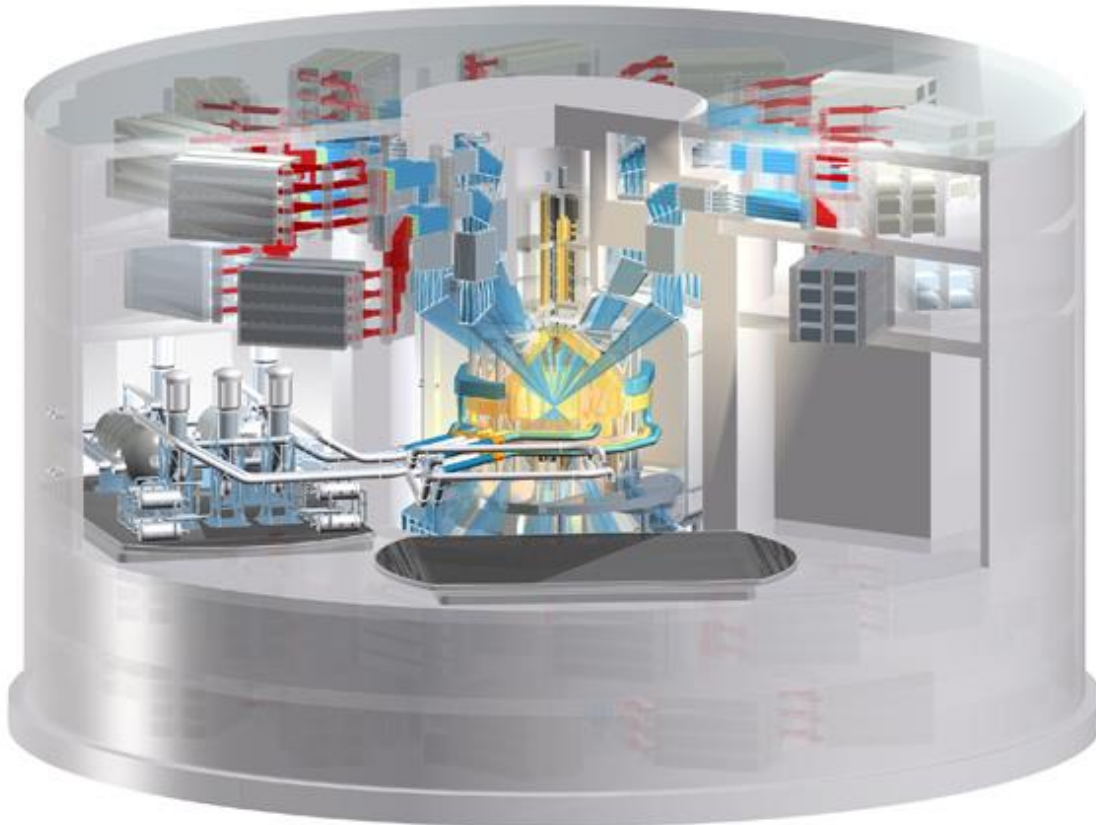
Ziele:

- Fusionsökosystem (Industrie, Forschungszentren, Universitäten)
- Etablierung von Zulieferketten in der Industrie

Ein Trägheitsfusionskraftwerk?



Ein Trägheitsfusionskraftwerk?



Bisher:

↓
300 MJ elektrische Energie

↓
2 MJ Laserenergie

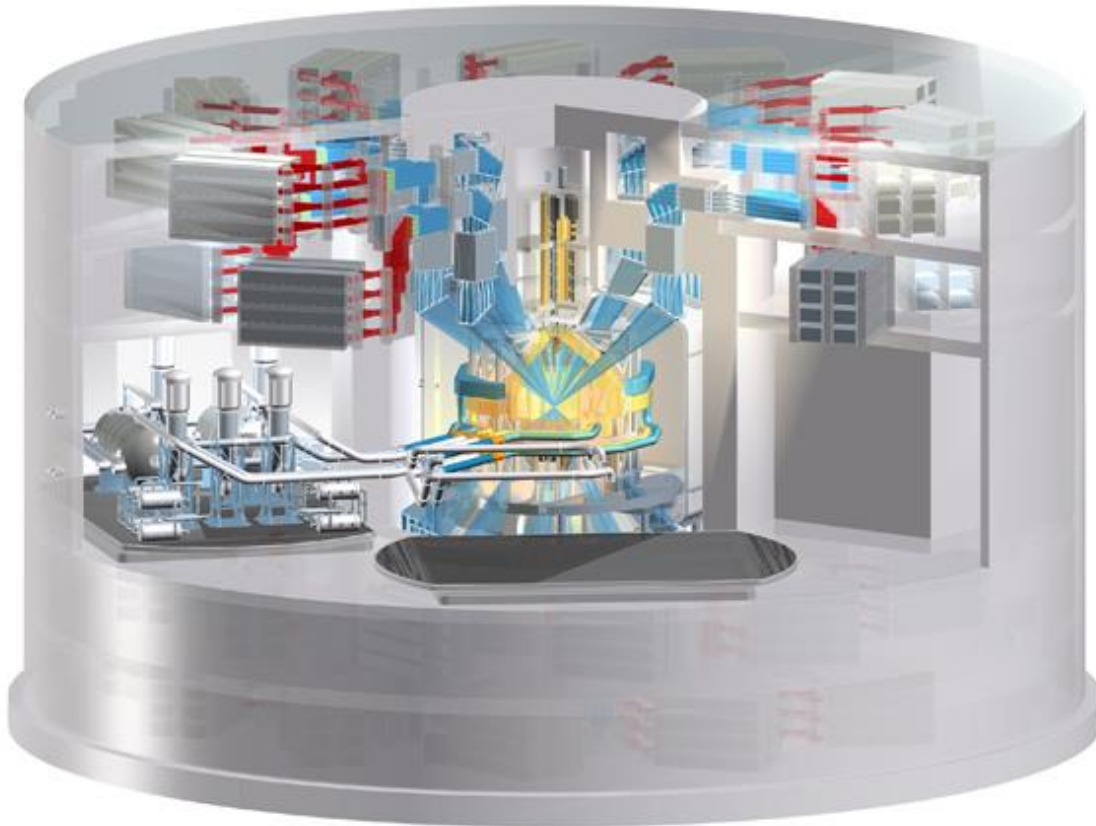
↓
20 kJ in DT-Plasma

↓
8,5 MJ Fusionsenergie

(und das max 1x am Tag)

Fusionskraftwerk müsste das 10x pro Sekunde durchführen

Ein Trägheitsfusionskraftwerk?



Bisher:

↓
300 MJ elektrische Energie

↓
2 MJ Laserenergie

↓
20 kJ in DT-Plasma

↓
8,5 MJ Fusionsenergie

(und das max 1x am Tag)

Fusionskraftwerk müsste das 10x pro Sekunde durchführen

Vergleich des Ziels von ITER (Magnetfusion):
10x mehr Energie aus Fusionsreaktionen als in das D-T-Plasma eingebracht wurde

Effizienzverbesserung

Bisher:

300 MJ elektrische Energie



2 MJ Laserenergie

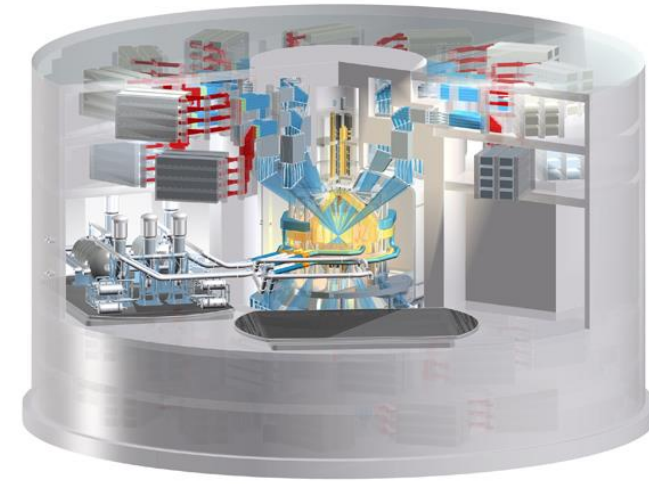


20 kJ in D-T-Plasma



8,5 MJ Fusionsenergie

Max. 1 Schuss am Tag



Effizienzverbesserung

Bisher:

300 MJ elektrische Energie



2 MJ Laserenergie



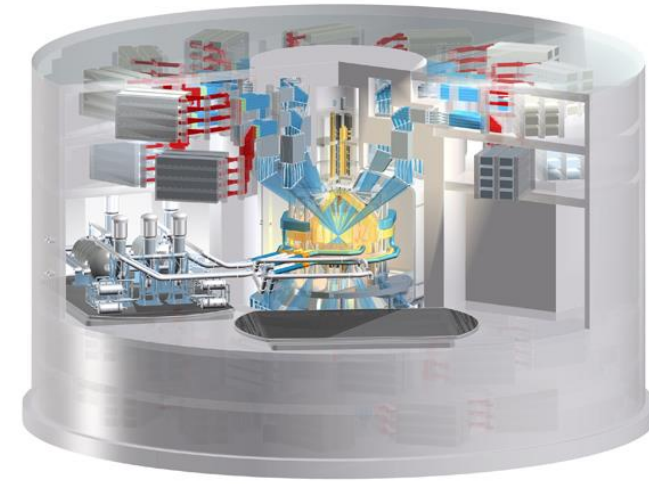
20 kJ in D-T-Plasma



8,5 MJ Fusionsenergie

} ~ 1%
}

Max. 1 Schuss am Tag



Effizienzverbesserung

Bisher:

300 MJ elektrische Energie



2 MJ Laserenergie



20 kJ in D-T-Plasma



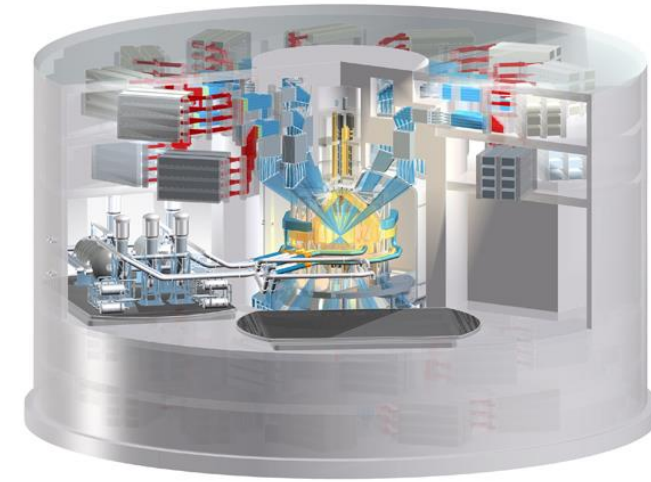
8,5 MJ Fusionsenergie

Max. 1 Schuss am Tag

} ~ 1%
}



10-20 % moderne Lasertechnologie



Effizienzverbesserung

Bisher:

300 MJ elektrische Energie



2 MJ Laserenergie

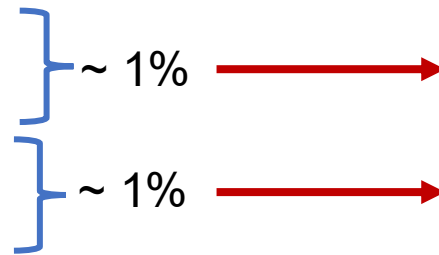


20 kJ in D-T-Plasma



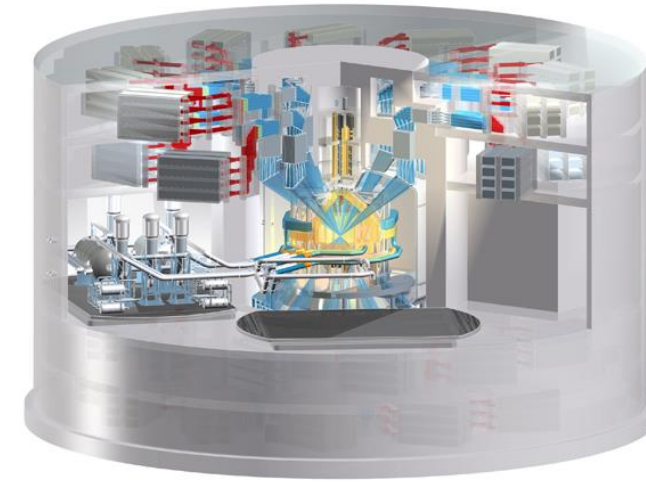
8,5 MJ Fusionsenergie

Max. 1 Schuss am Tag



10-20 % moderne Lasertechnologie

10-20% mit "Direct Drive" (ohne Hohlraum)
und "schneller Zündung" (Diesel vs Benziner)



Effizienzverbesserung

Bisher:

300 MJ elektrische Energie



2 MJ Laserenergie

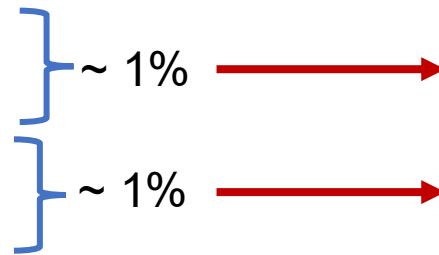


20 kJ in D-T-Plasma



8,5 MJ Fusionsenergie

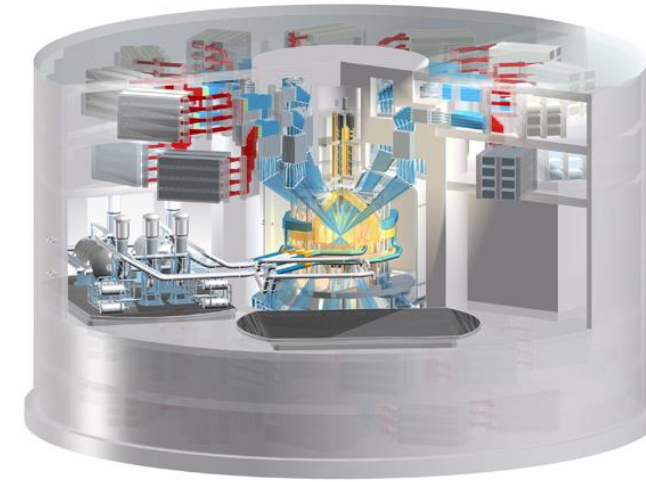
Max. 1 Schuss am Tag



10-20 % moderne Lasertechnologie

10-20% mit "Direct Drive" (ohne Hohlraum)
und "schneller Zündung" (Diesel vs Benziner)

200 MJ (mehr Laserenergie in D-T-Brennstoff)



Effizienzverbesserung

Bisher:

300 MJ elektrische Energie



2 MJ Laserenergie

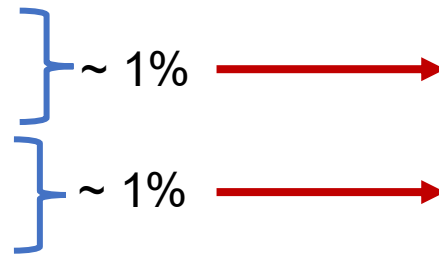


20 kJ in D-T-Plasma



8,5 MJ Fusionsenergie

Max. 1 Schuss am Tag

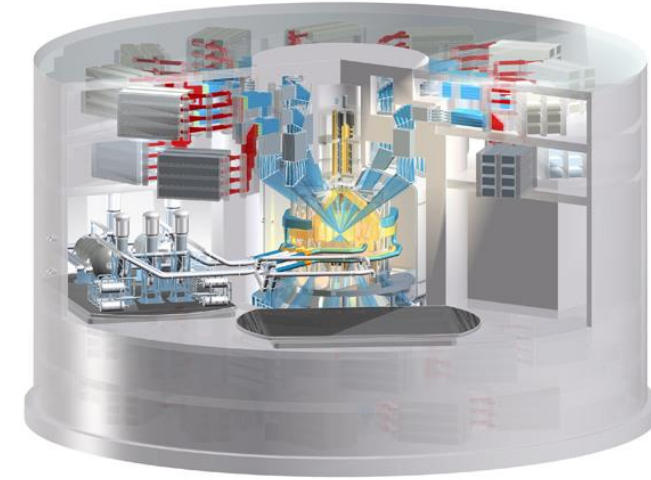


10-20 % moderne Lasertechnologie

10-20% mit "Direct Drive" (ohne Hohlraum)
und "schneller Zündung" (Diesel vs Benziner)

200 MJ (mehr Laserenergie in D-T-Brennstoff)

5-10 Hz (Lasertechnologie & Pelleteinschuss)



Ein Fusionskraftwerk basierend auf Laserfusion?

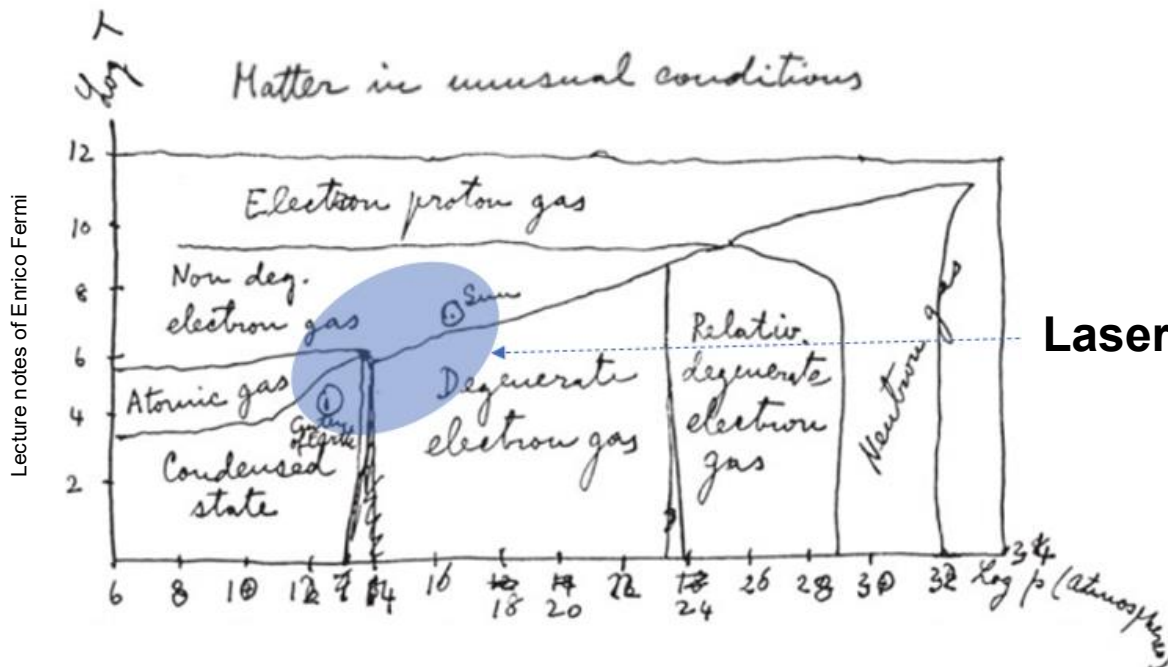
- Die Physikseite

- “Direct Drive“ (kein Hohlraum)
- Besseres physikalisches Verständnis von Materie bei hoher Energiedichten erreichen
- „Target gain“ \rightarrow 100 (Jetzt ~ 4)

Ein Fusionskraftwerk basierend auf Laserfusion?

- Die Physikseite

- „Direct Drive“ (kein Hohlraum)
- Besseres physikalisches Verständnis von Materie bei hoher Energiedichten erreichen
- „Target gain“ -> 100 (Jetzt ~4)



**Ein gutes Verständnis von
Materie bei hoher
Energiedichte erreichen!**

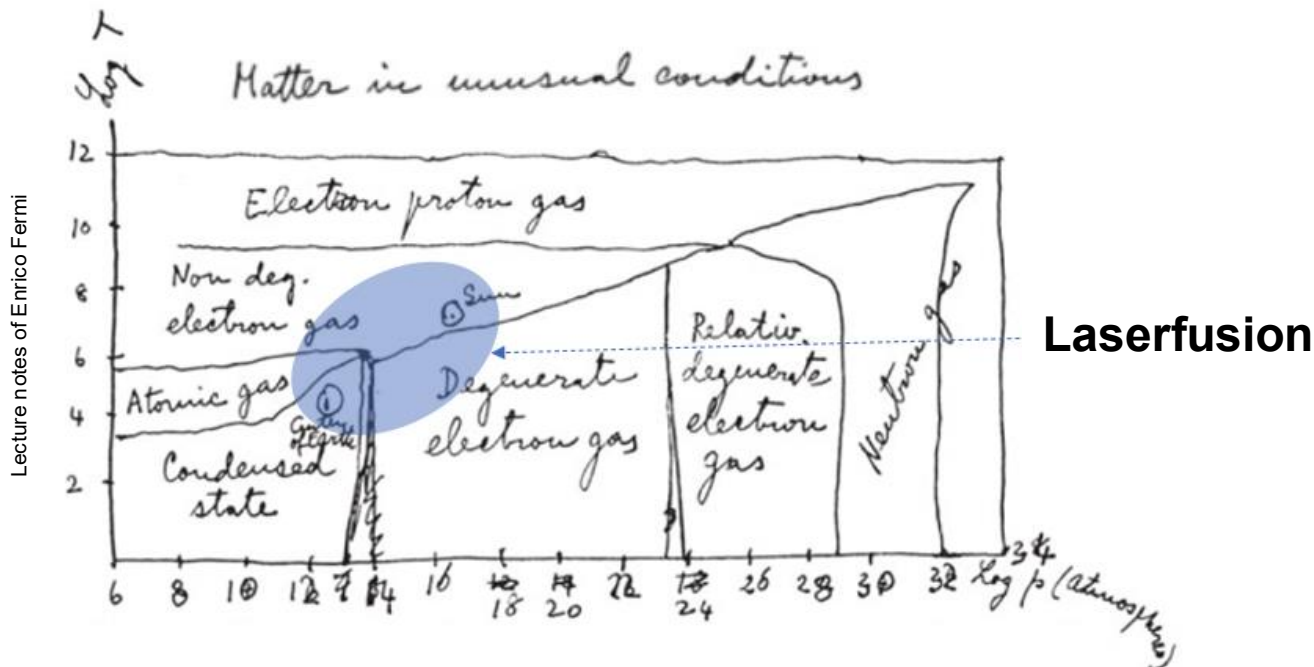
Ein Fusionskraftwerk basierend auf Laserfusion?

• Die Physikseite

- “Direct Drive“ (kein Hohlraum)
- Besseres physikalisches Verständnis von Materie bei hoher Energiedichten erreichen
- „Target gain“ -> 100 (Jetzt ~4)

• Die Ingenieurseite:

- Lasereffizienz:
Blitzlampen (1%) -> Laserdioden (20%)
- 10 Hz Schussrate
- Tritium-Brüten
- Umgang mit Energiedeposition durch Neutronen

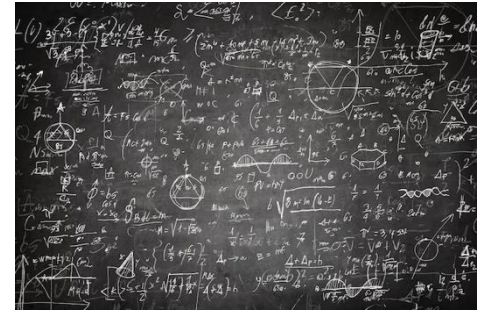


**Ein gutes Verständnis von
Materie bei hoher
Energiedichte erreichen!**

Es steht Arbeit an

- Physik von brennenden Fusionsplasmen und Erhöhung der Energieausbeute
 - Upgrade der National Ignition Facility
- Kraftwerkskompatible Treiberdesigns
 - Neue Labore: Erst “sub-scale”, dann “full-scale”

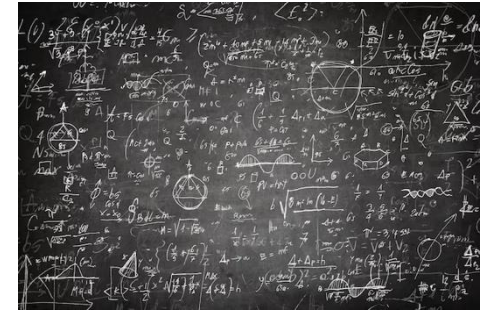
Grundlagenforschung



Es steht Arbeit an

- Physik von brennenden Fusionsplasmen und Erhöhung der Energieausbeute
 - Upgrade der National Ignition Facility
- Kraftwerkskompatible Treiberdesigns
 - Neue Labore: Erst “sub-scale”, dann “full-scale”
- Wiederholrate
 - Dioden-gepumpte Laser, billige Materialien, Positionierung & Timing
- Energieumwandlung
 - Energiedeposition von vielen Neutronen und effiziente Umwandlung in Wärme und Strom
- Kraftwerkskompatibles Tritium-Brüten

Grundlagenforschung

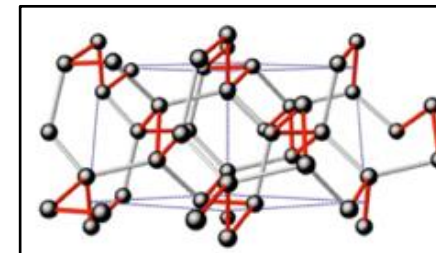
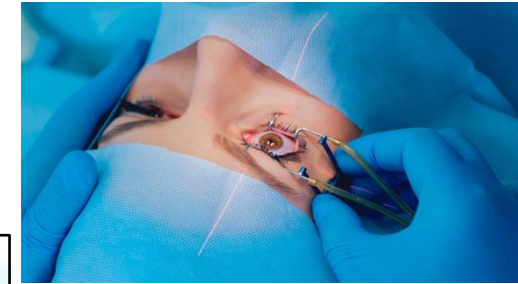
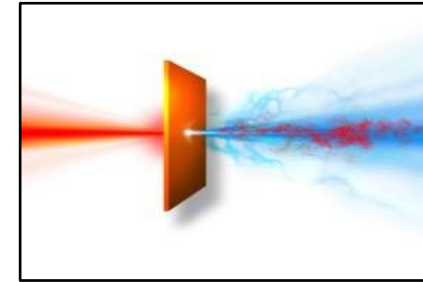


Angewandte Forschung & Engineering

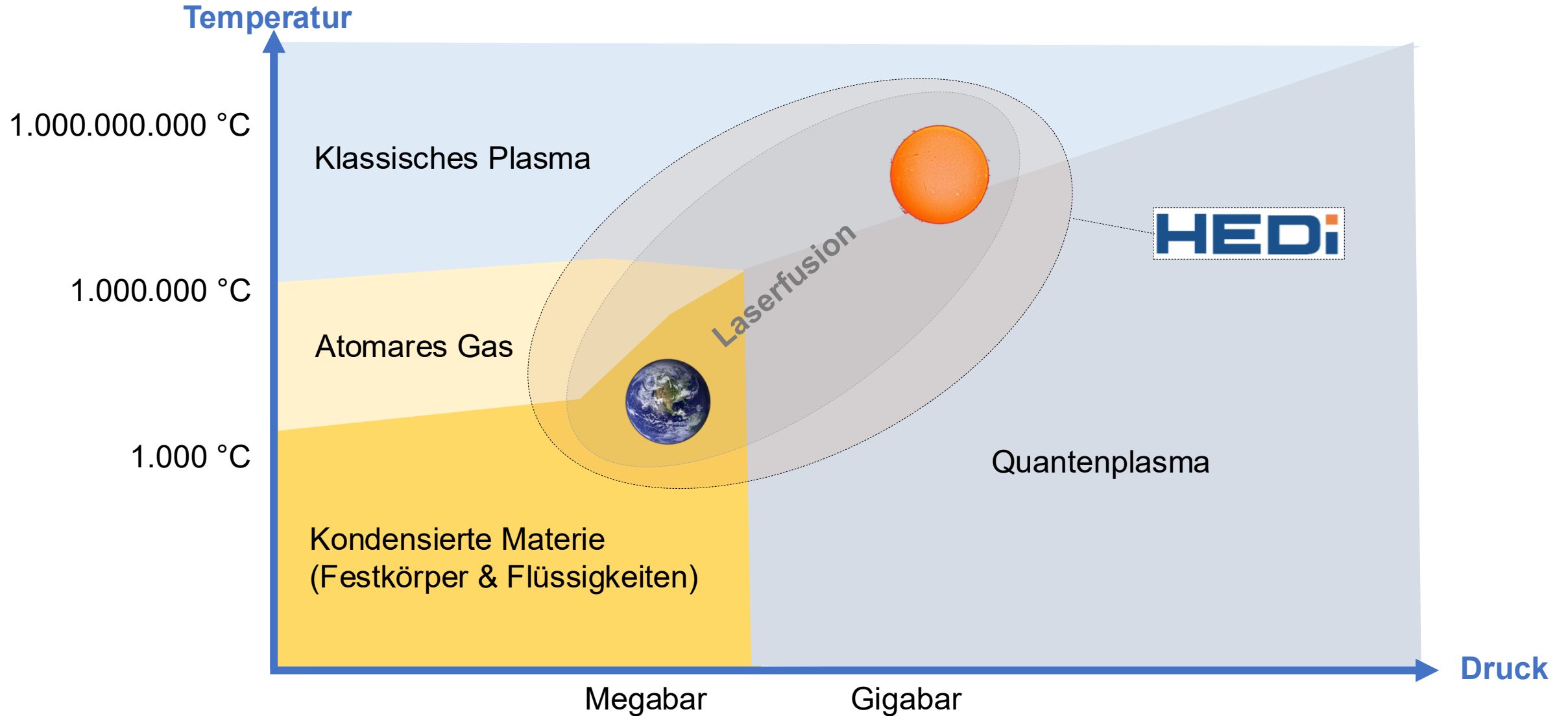


“Spin-offs” der Laserfusion

- Lasertechnologie
(z.B. CPA-Laser, Nobelpreis 2018)
- Kompakte Laser-getriebene Teilchenbeschleuniger
- Ein besseres Verständnis des Universums durch “Laborastrophysik”
 - Das Innere von Planeten und Sternen, Simulation von Supernovae, etc.
- Neue leistungsfähige Materialien über extreme Bedingungen, z.B. bessere Diamanten, Supraleiter bei nahezu Raumtemperatur, uvm.



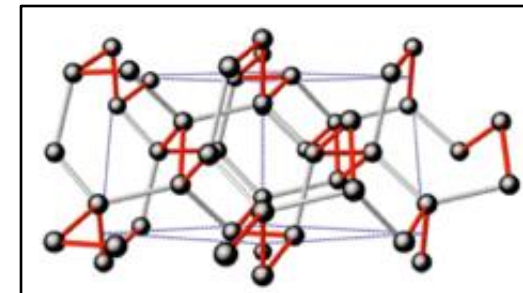
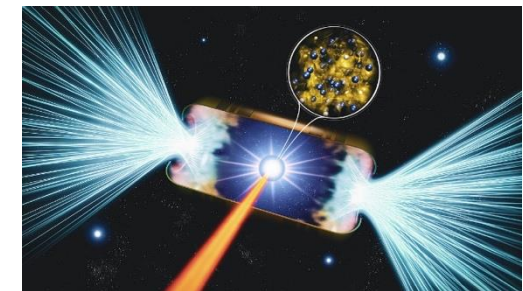
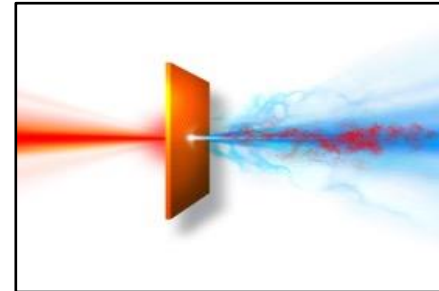
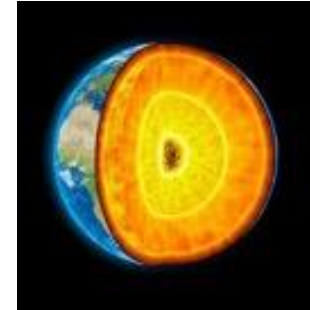
Materie bei hoher Energiedichte



Materie bei hoher Energiedichte

Megabar- bis Gigabar-Drücke sind relevant für:

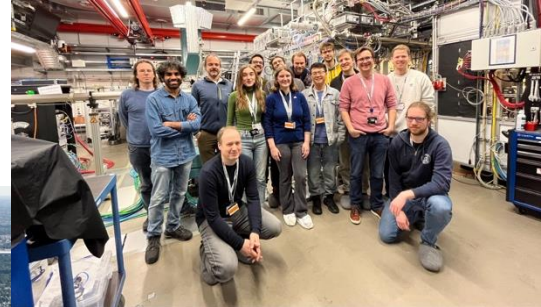
- Entwicklung von Sternen und Planeten
- Klassifizierung von Exoplaneten
- Erdmagnetfeld
- Entstehung des Lebens
- Hochintensitäts-Lasertechnologie mit Anwendungen in der Materialbearbeitung, Teilchenbeschleunigung **und Laserfusion**
- Synthese nützlicher Materialien über extreme Bedingungen: "bessere" Diamanten, Nanoteilchen für die Katalyse, Supraleiter



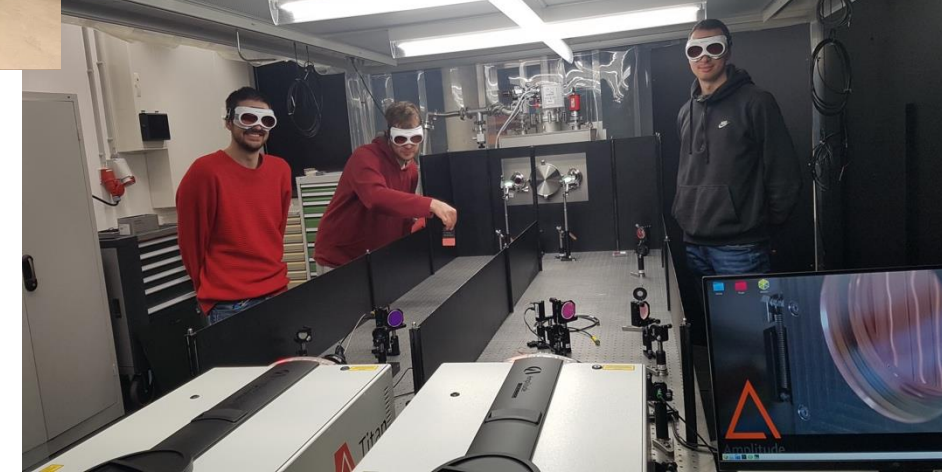
Experimente zur Hochenergiedichtephysik



National Ignition Facility, USA

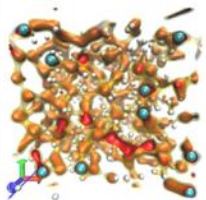
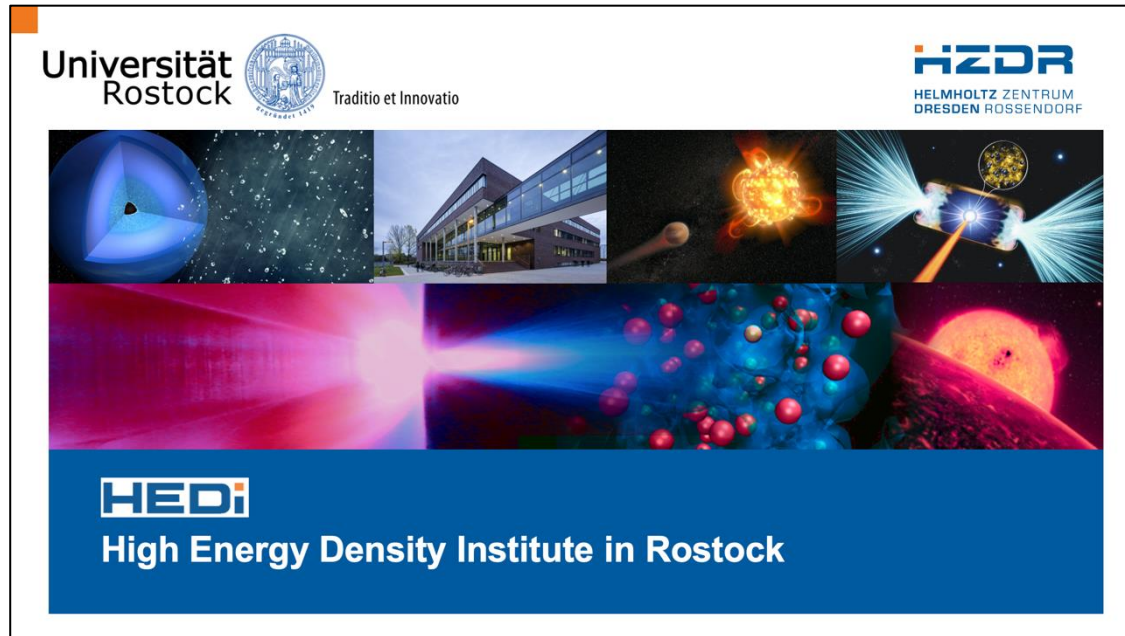


European XFEL, Schenefeld

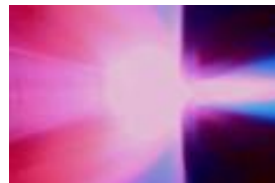


Universität Rostock

HEDI



HED Theorie

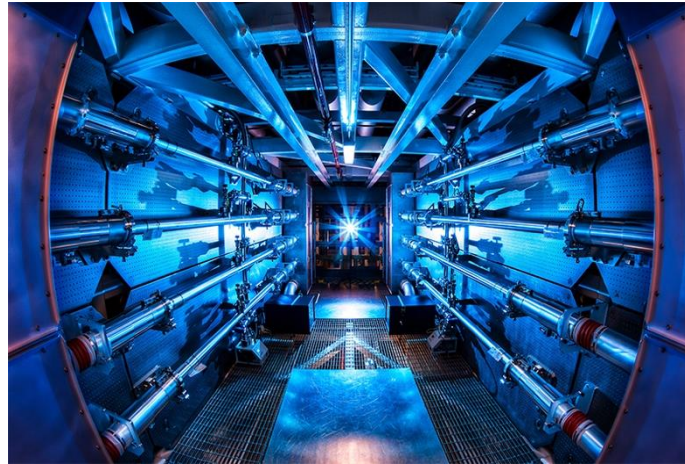


HED Experiment



HED Anwendungen,
insbesondere Trägheitsfusion

Spannende Zeiten !



Energiegewinnung durch (Trägheits-) Fusion



Erzeugung nützlicher Materialien

Suche nach lebensfreundlichen Planeten

Danke!

www.hed.physik.uni-rostock.de

