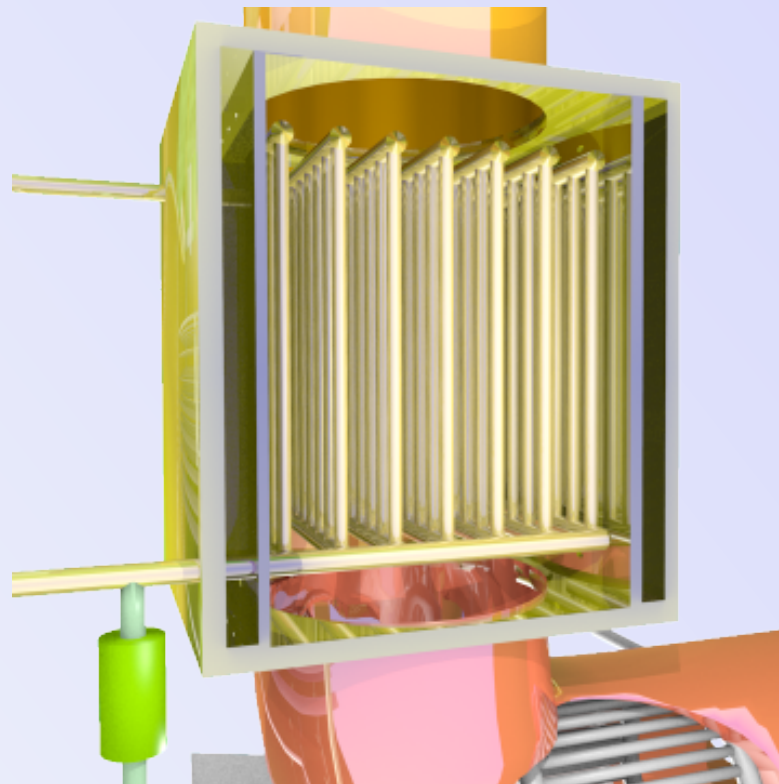


Der Dual-Fluid-Reaktor

Fabian Herrmann
Institut für Festkörper-Kernphysik Berlin gGmbH



Warum benutzen Menschen eigentlich Maschinen?!

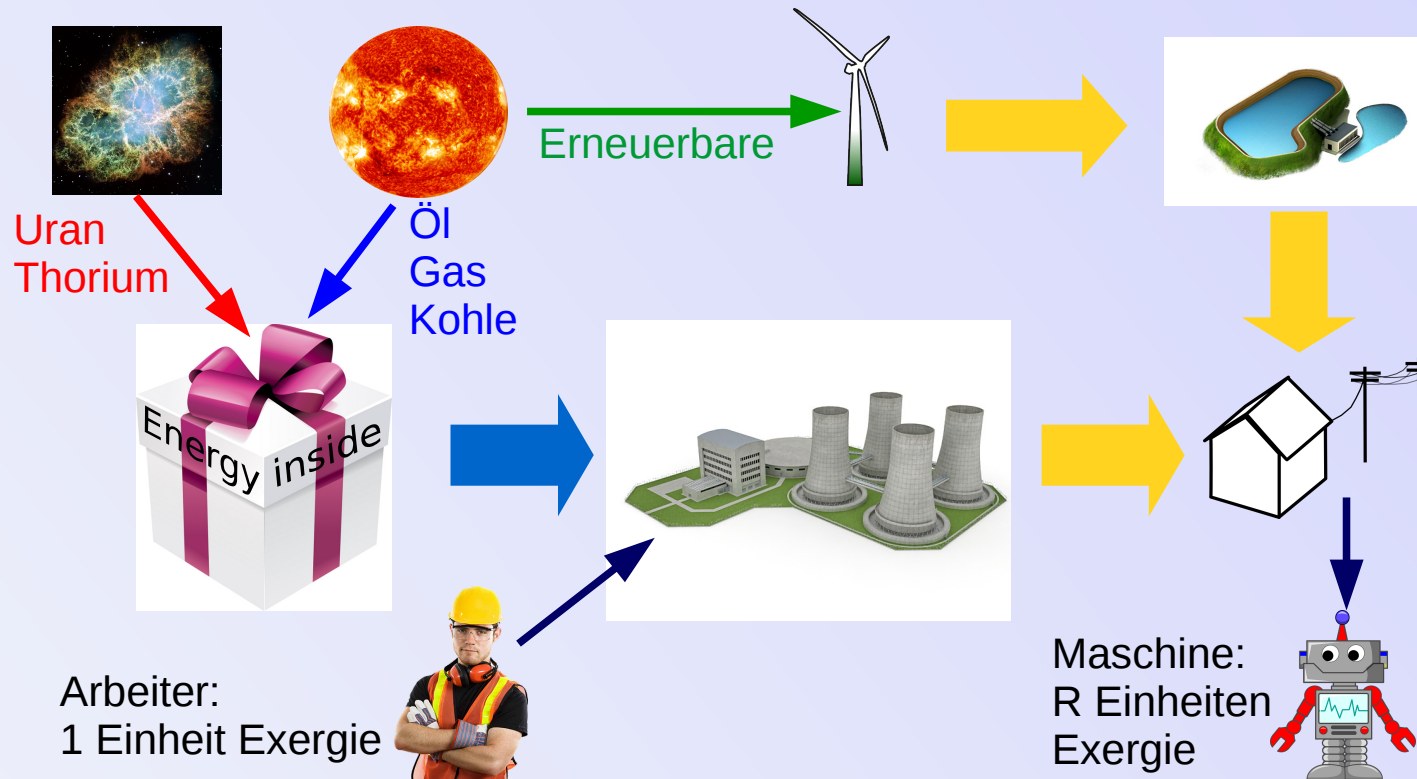
„Der Mensch soll sich von fremdbestimmten Tätigkeiten befreien und sie Maschinen überlassen, um sich selbst stärker zu entfalten.“

– Konrad Zuse



Maschinen ermöglichen es uns, mit weniger Arbeitseinsatz mehr zu leisten. Wie lässt sich diese Leistungsvervielfachung quantitativ ausdrücken?

Der Erntefaktor EROI (Energy Returned on Investment)



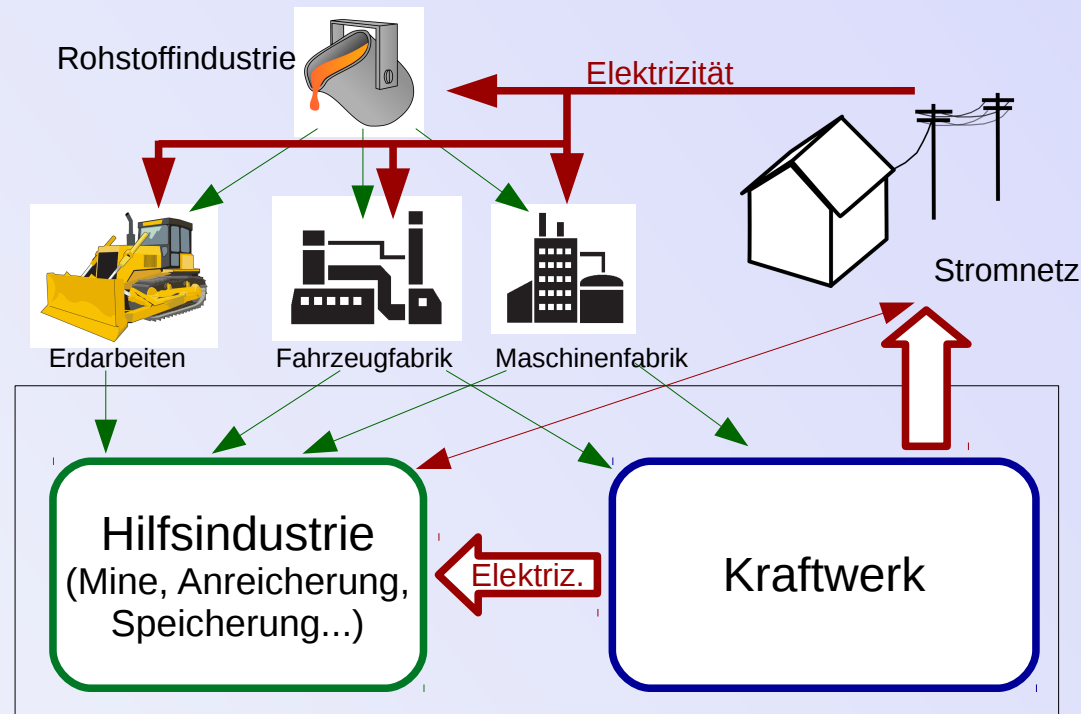
$$R = \frac{\text{Von einem Kraftwerk über die gesamte Lebensdauer gelieferte Exergie}}{\text{Exergie, die zu Bau, Betrieb, Instandhaltung, Brennstoffversorgung und Außerdienststellung nötig ist}}$$

Exergie: Gerichtete Energie (Elektrizität, bewegte Massen, Laser, u.a.)

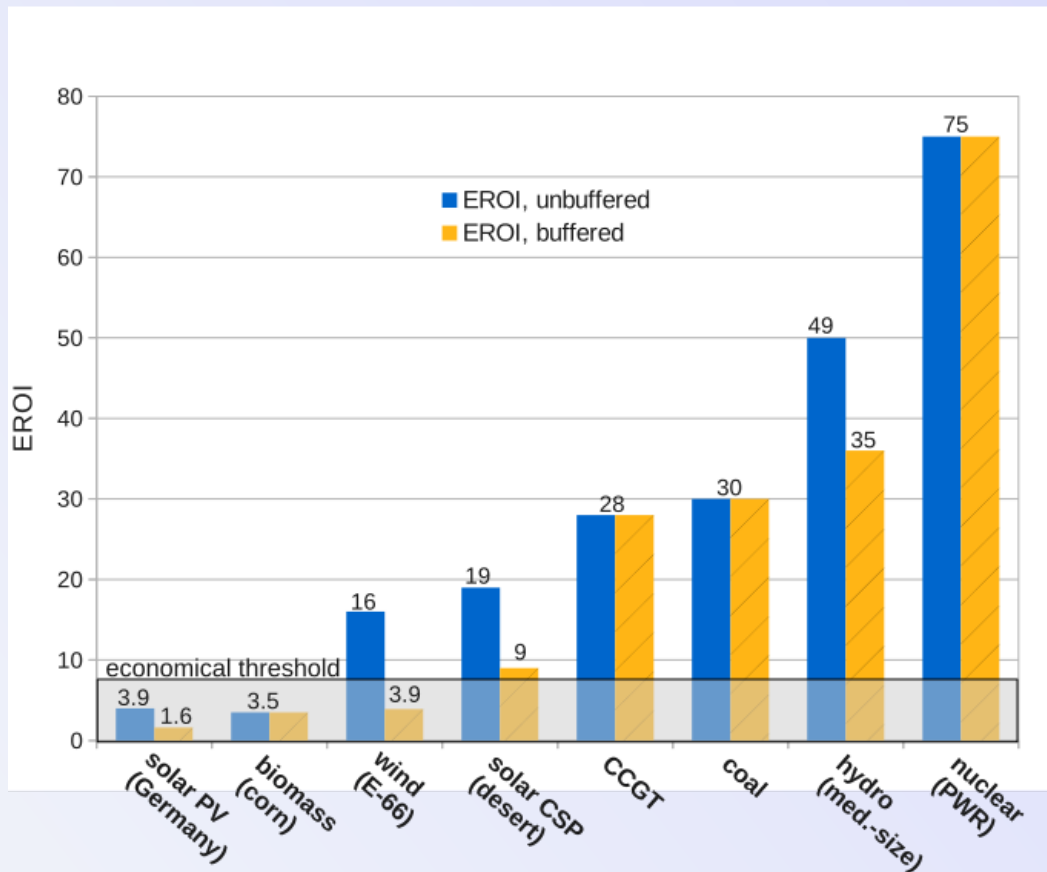


Der Erntefaktor EROI (Energy Returned on Investment)

- EROIs sind nicht einfach zu bestimmen, da die gesamte aufgewandte Exergie summiert werden muss.
- Systemgrenzen müssen gezogen werden – sinnvoll dort, wo die Exergiebeiträge unter den Größtfehler sinken.



Die EROIs verschiedener Technologien wurden nach einheitlichem Schema zusammengetragen



Höhere Effizienz (EROI) bedeutet:

- Geringere Auswirkungen auf die Natur
- Niedrigere Kosten

Wirtschaftlichkeitsgrenze für OECD-artige Länder $EROI = 7$

Der EROI von Leichtwasser-Kernkraft übertrifft den von fossiler Verbrennung ca. um das Doppelte!

Quelle: Weißbach et al.: „Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants“, Energy, Volume 52, pp. 210-221 (2013)



→ Warum nur das Doppelte?!

Knock Nevis - das größte Schiff das es je gab!
Es transportierte bis zu 565.000 t Rohöl.
Damit lässt sich z. B. der Bedarf Österreichs
für zwei Wochen decken.



Öl hat eine Energiedichte von ca. 42 MJ pro kg.
Die Knock Nevis konnte somit eine Energiemenge
von 24 Petajoule = 2.4×10^{16} J transportieren.

Kernenergie: einen zweiten Blick wert.

Uran hat eine Energiedichte von 80 MILLIONEN MJ / kg.
24 PJ sind enthalten in 300 kg Uran.
Dies entspricht ungefähr 1/3 des Volumens eines
Bierkastens.



Die Energiedichten von Aktiniden (Uran, Thorium...) übertreffen die von chemischen Brennstoffen um **zwei Millionen!**



→ Warum nur das Doppelte?!

- Neben der Energiedichte des Brennstoffs gehen auch noch Hilfsindustrien und der Gesamtaufwand zum Betrieb des Kraftwerks in den EROI ein.
- LWR-Kernkraftwerke nutzen nur 0.7% des Urans, benötigen Anreicherung mit viel Energieaufwand, zum Bau sind große Mengen Stahl und Beton erforderlich, mehrere Schichten von Sicherheitsmechanismen werden installiert...
- Daher können sie das Potential von Uran kaum ausschöpfen!



Wie kann man das wahre Potential von Uran und Thorium nutzbar machen?

- Der Reaktor muss die Aktinide komplett nutzen
→ schnelles Neutronenspektrum, effiziente Aufarbeitung.
- Er muss äußerst kompakt sein und wenig Baumaterial erfordern → hohe Leistungsdichte.
- Keine gestaffelten Sicherheitsvorkehrungen → inhärente Sicherheit durch Naturgesetze.
- Versorgung von nichtelektrischen Maschinen (Autos, Flugzeuge...) → hohe Betriebstemperatur zur Treibstoffsynthese.



Der Dual-Fluid-Reaktor

Flüssigbrennstoffreaktor mit zwei Kreisläufen:

- * Brennstoff
- * Kühlung

Aufarbeitung in
Pyrochemischer
Prozesseinheit (PPU)
– direkt an Reaktor
angeschlossen.

- Natural Uranium
- Depleted Uranium
- Thorium
- Spent fuel

- Fission products
- Medical radioisotopes
- Fissile material

Pyroprocessing
Unit (PPU)

Flüssigblei zum Kühlen

Turbine
loop

Coolant
loop

Heat exchanger
to conventional
part (turbine loop)

Coolant pump

Residual heat
storage

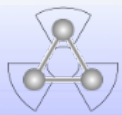
1000
Grad

Fuel
loop

DFR
core

Kern besteht aus
10.000 dünnen Röhren,
durch die Brennstoff
zirkuliert.

- * Schnelles Neutronenspektrum, kein Moderator.
- * Betriebstemperatur: 1000 Grad.
- * Inhärente Sicherheit.
- * Recycling von Atommüll.
- * Brennstoffressourcen für fast unendliche Zeit.



Der Dual-Fluid-Reaktor

- In üblichen Flüssigsalzreaktor-Designs muss das Salz sowohl den Brennstoff transportieren wie auch als Kühlung dienen! Dies erfordert Kompromisse.
- Der DFR nutzt zwei Medien: Salz (DFR/s) oder Metallschmelze (DFR/m) für den Brennstoff, Blei zum Kühlen.
- Jede der Flüssigkeiten tut somit das, was sie besonders gut kann! Dadurch wird die Leistungsdichte des Reaktors maximiert.
- Der DFR nähert sich der theoretischen Effizienzobergrenze der Kernspaltung, bei der Hauptbeiträge aus der Brennstoffbeschaffung stammen: Dies ermöglicht **EROIs von 2000 (DFR/s) bis 5000 (DFR/m)**.



Baustoffe

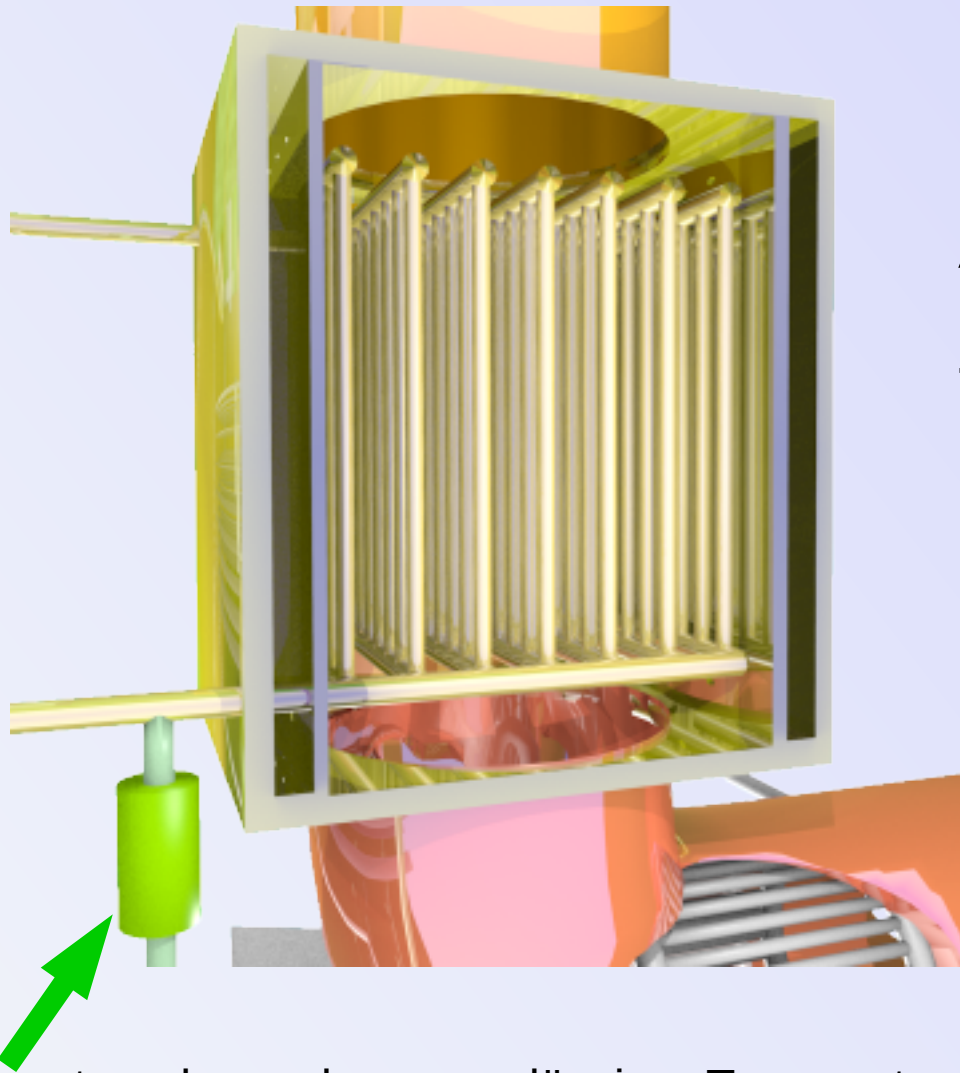
- In der kommerziellen Kerntechnik kennt man fast nur Stähle. Diese würden jedoch den energiereichen Neutronen und hohen Temperaturen nicht standhalten.
- **Für das Bleirohr: molybdänbasierte Legierung.**
- **Für den Reaktor: Refraktärmetalle oder Siliziumkarbid.**
- Siliziumkarbid kann auch 3D-gedruckt werden. Dies könnte eine besonders günstige Methode sein, die 10.000 dünnen Röhren für den Kern herzustellen.
- Die geringe Größe des Reaktors (100 g Refraktärmetalle vs. 1 kg Stahl für leistungsgleichen LWR) erlaubt die Nutzung dieser teuren Materialien, ohne den Energiepreis nennenswert zu erhöhen.



Sicherheit

Durch Ausdehnung/Kontraktion der Flüssigkeit bei Erhitzung/Abkühlung verfügt der DFR über einen derart starken negativen Temperaturkoeffizienten, dass er **keine Regelstäbe braucht!**

Er folgt der **Leistungsentnahme selbsttätig!**



Kommt es dennoch zu unzulässiger Temperaturexkursion, schmelzen die **Sicherheitsstopfen**. Die Brennstoffflüssigkeit fließt in unterkritische Auffangtanks. **Dieser Mechanismus beruht nur auf Naturgesetzen.**



Atommüll: Energie für Jahrhunderte!

Massen beziehen sich auf den Schwermetallanteil. Angaben in metrischen Tonnen.

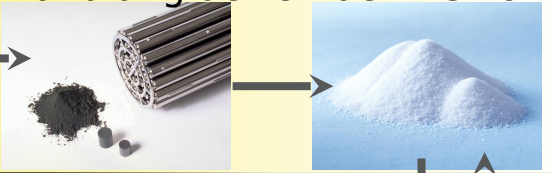
1,000 t pro Reaktor, über 40 Jahre angesammelt.

25 t / Jahr, sofern der Reaktor noch arbeitet.

Heutiger Druckwasserreaktor (1400 MW_e)

Schritt 1 Vorbehandlungsanlage

- Zerlegung der Brennelemente
- Zerkleinern der Pellets
- Wandlung der Oxide in Chloride



Massenverringierung um Faktor 33 in 2 Jahren

Schritt 2 Partitionierung

Spaltprodukte
30 Tonnen, davon 3 t langlebig. 300 Jahre Lagerzeit.

Als Energiequelle nicht nutzbar.

PPU
Max. 500 t / Jahr

Chloridsalze
Chlor (wiedergewonnen)

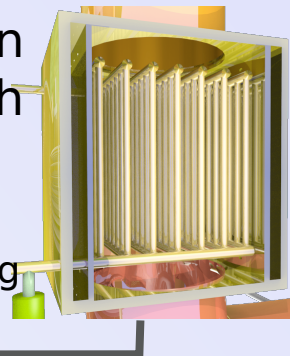
Aktinidenlager
960 t Uran
9 t Plutonium
1 t Minore Aktinide

Energiequelle

Schritt 3 Transmutationsanlage

DFR-Kern
3 GW thermisch

- Anwendungen:
- Prozesswärme
 - Stromerzeugung

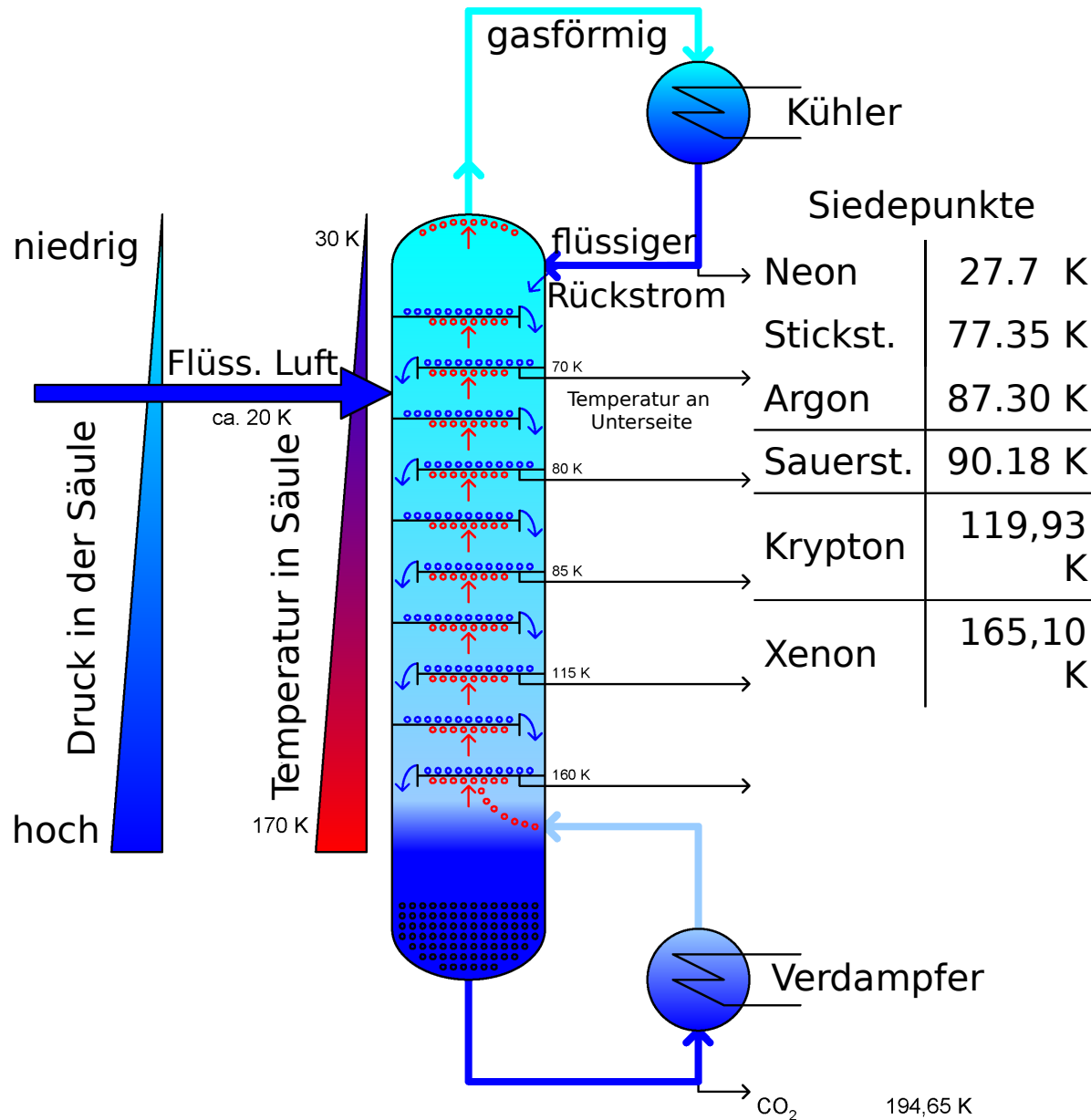


Verbrennung von Aktiniden im DFR-Kern

Verbrauch: 1.2 t / Jahr

Außerdem können 0.3 t / Jahr an langlebigen Spaltprodukten transmutiert werden.

PPU (Pyroprocessing Unit) statt PUREX



Bsp.: Rektifikation von flüssiger Luft

Wie bei bei etablierten Destillationsverfahren werden Temperaturdifferenzen genutzt, um das Stoffgemisch in der Brennstoffflüssigkeit durch Verdampfung fast elementrein(!) aufzutrennen.

Die PPU arbeitet im Gegensatz zu PUREX ökonomisch, effizient und fast ohne Giftmüll.

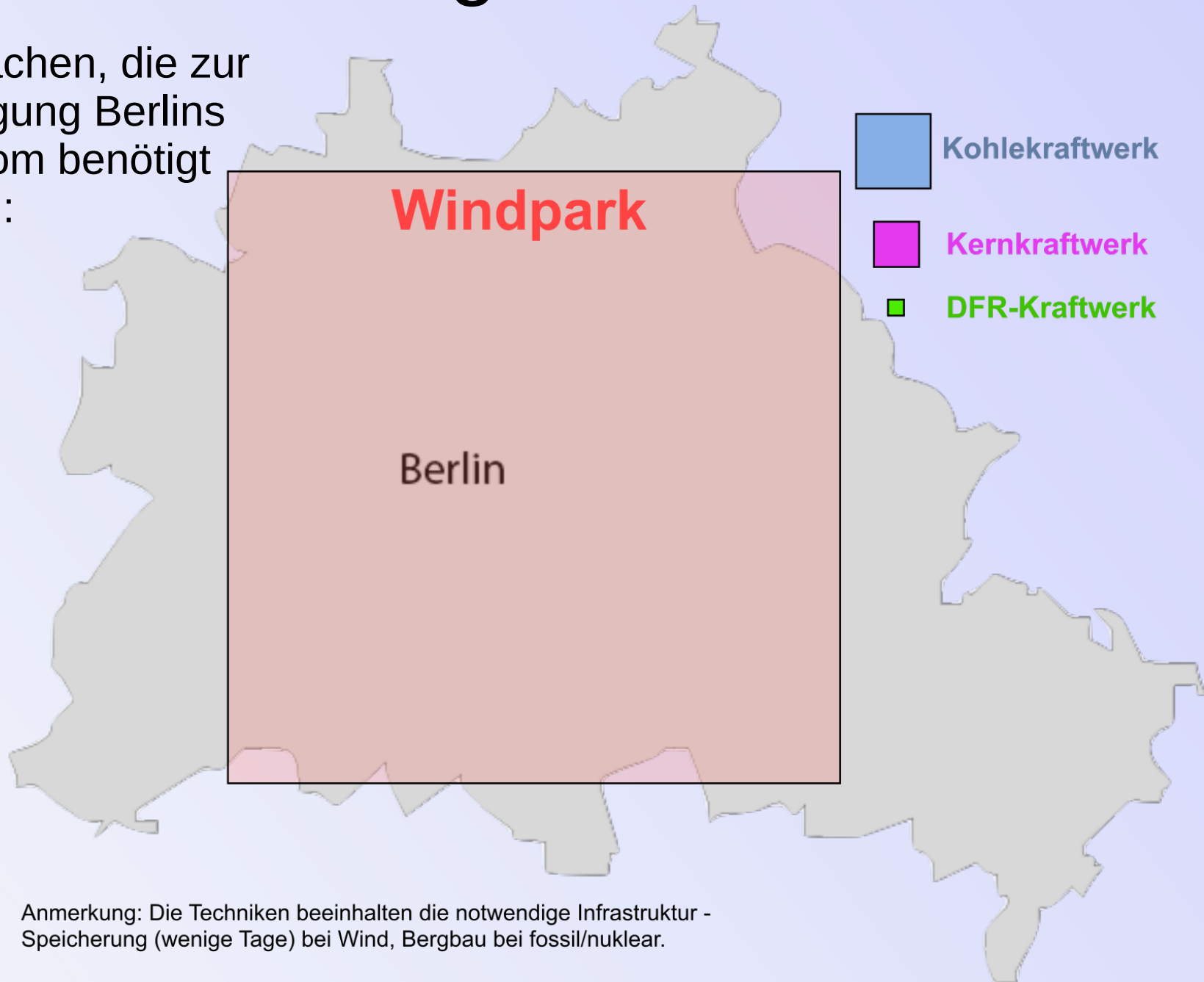
Beim DFR/m muss die Flüssigkeit vorher in ein Salz umgewandelt werden, da Metalle zu hochsiedend sind.

Die PPU dient auch zur Zugabe der Brennstoffe: Natururan, abgereichertes Uran, Thorium, Atommüll, Plutonium, etc.

Mittels DFR+PPU kann das medizinisch wichtige Isotop Molybdän 99 einfach und billig gewonnen werden.

Energieflussdichte

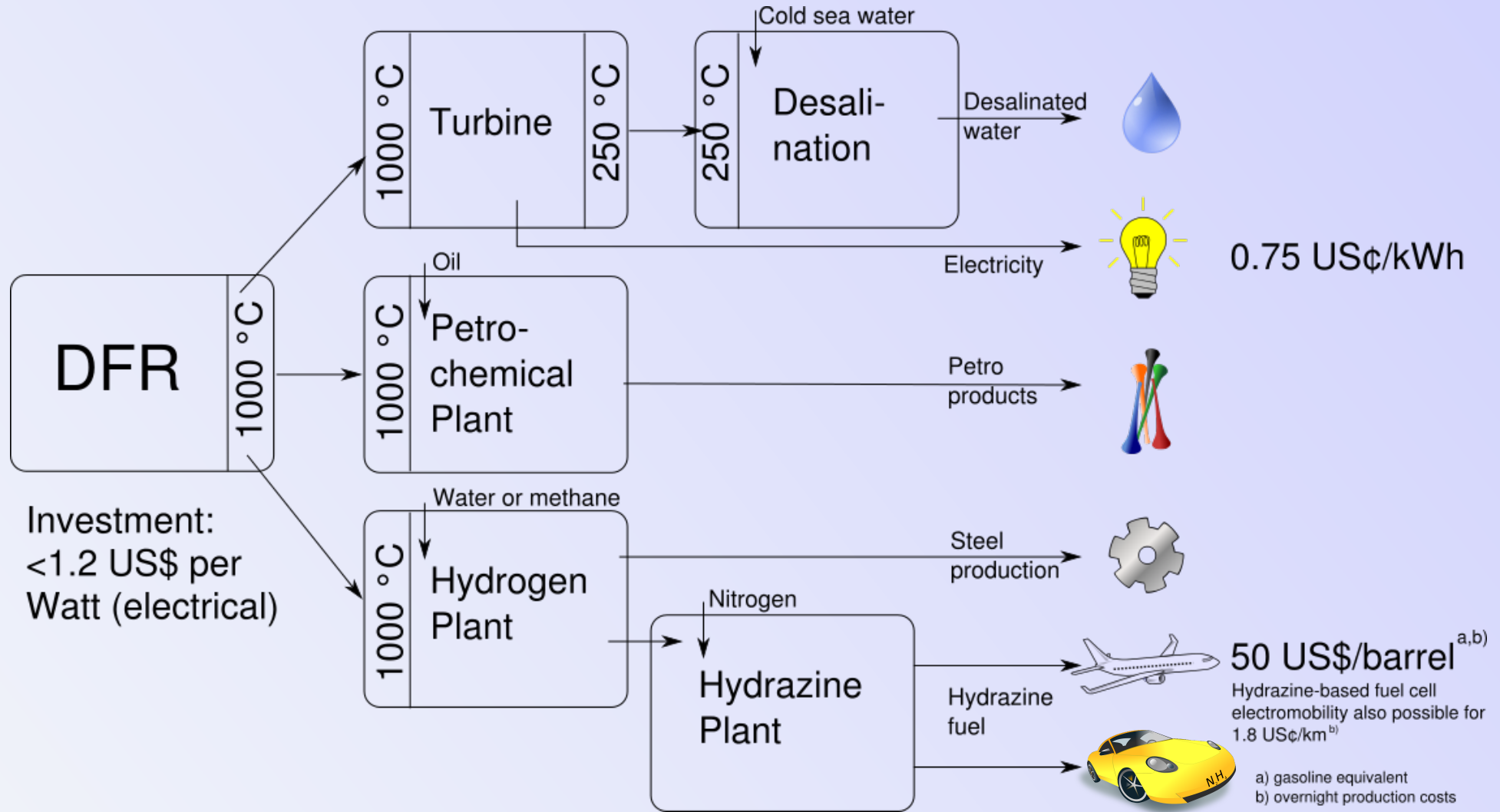
Landflächen, die zur
Versorgung Berlins
mit Strom benötigt
werden:



Anmerkung: Die Techniken beeinhalten die notwendige Infrastruktur -
Speicherung (wenige Tage) bei Wind, Bergbau bei fossil/nuklear.



Mehr als nur Strom: Trinkwasser, Plastik, Stahl und Hydrazin



Es sind auch modulare Mini-DFRs (wenige 100 MW) möglich – für Inseln oder Regionen ohne Stromnetz!



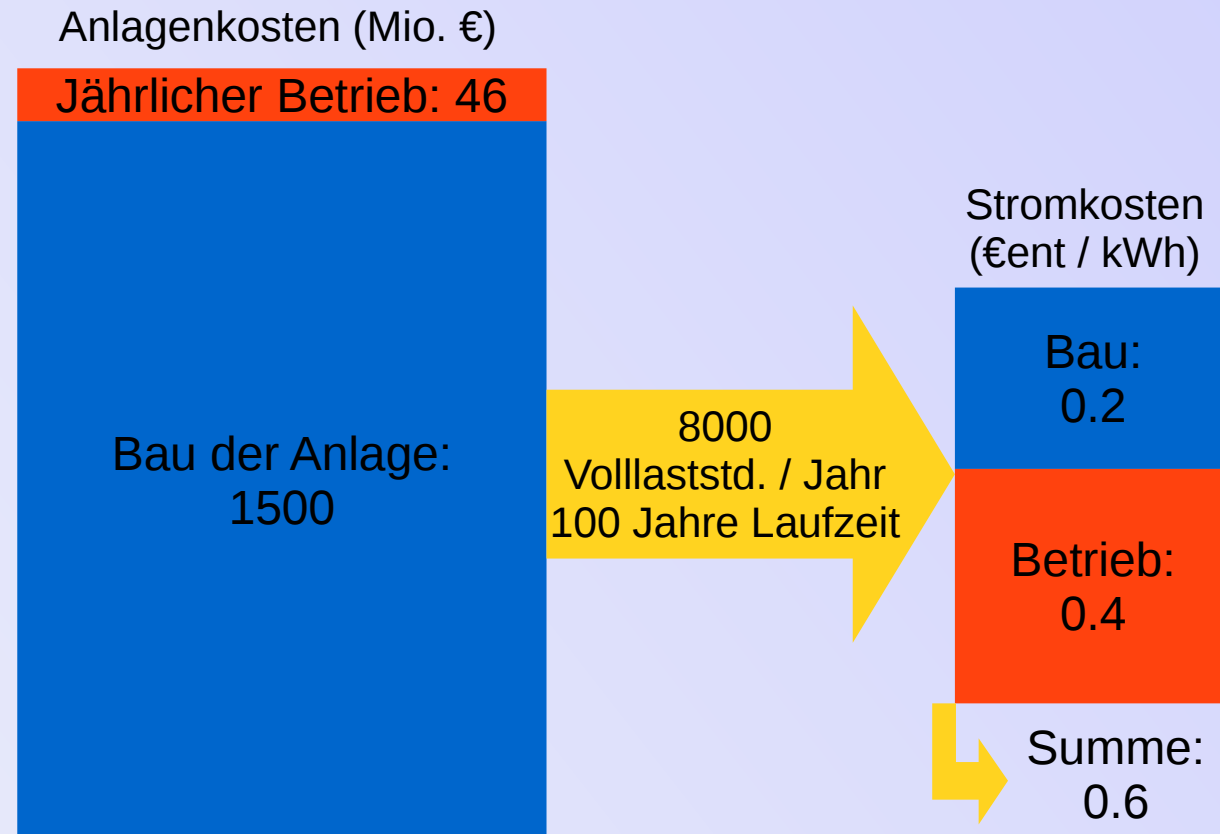
Kosten

Die kompakte Größe und das Fehlen aufwändiger mehrschichtiger Sicherheitsvorrichtungen macht den Bau eines DFR so billig wie den eines Kohlekraftwerks.

Im Gegensatz zu diesem sind beim DFR die Brennstoffkosten jedoch völlig vernachlässigbar.

Das bedeutet:
Wir haben es geschafft...

1500 MWe DFR



(Alle Kosten ohne Zinsen.)



...postfossile Energie billiger als Kohlestrom!!



EROI = 2000 – 5000 !!

Vielen Dank!



Der sehr hohe EROI von 2000...5000 übertrifft den heutiger Kraftwerke um zwei Größenordnungen.
Welche neuen Industrieprozesse und Organisationsformen damit wohl möglich werden?!

Siehe z. B.: <https://www.thevenusproject.com/> oder <http://geocities.ws/curiepolis/>

Institut für Festkörper-Kernphysik

Institute for Solid-State Nuclear Physics

Oktober 2017

