

Neue Generationen von Kernkraftwerken

Klimaschutz, Landschaftsschutz, Versorgungssicherheit

Horst-Michael Prasser

Inhalt

- Erhalten
- Bauen
- Forschen



Schaffhausen, 24.11.2022

Ein denkwürdiger Artikel in der «Neue Zürcher Zeitung», 12.11.2022:
Christoph Eisenring: «Klimaneutral mit AKW in Gösgen und Leibstadt»

Slogan: «80 das neue 50 für AKW»

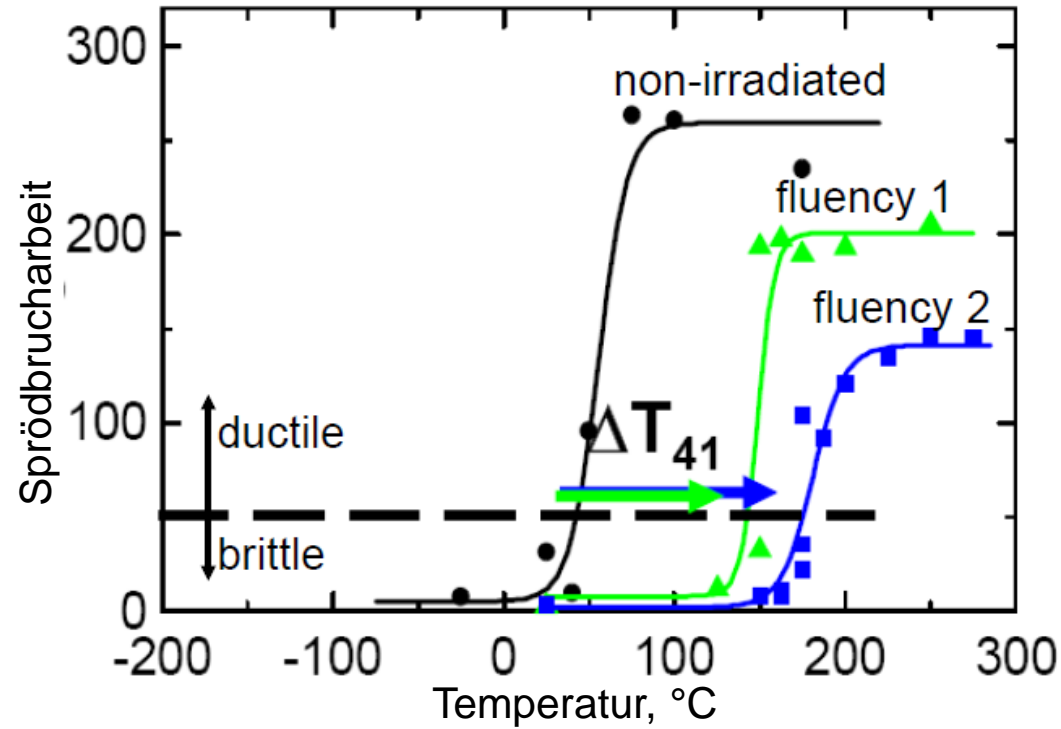
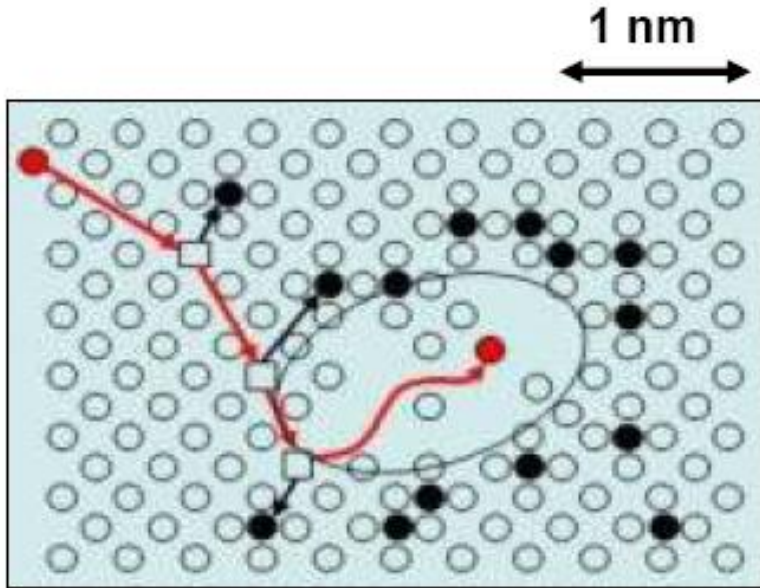
Nuclear Energy Agency (NEA) in Paris hat 3 Szenarien für die Schweiz analysiert:

- Solar-dominiertes Ausbau der Erneuerbaren
- Erneuerbare + 80 Jahre KKG & KKL
- Erneuerbare + 80 Jahre KKG & KKL + 2 KKW-Neubauten → **bestes Ergebnis**

Kristine Svinicki, ehem. Präsidentin der U.S.NRC: - 80 sicherer Betrieb sind möglich

Jan Horst Keppler, NEA, federführender Autor: - Instandhaltungskosten 1.3 Mrd. CHF
- Neubauanlagen ~6.4 Mrd. CHF
- Staatliche Garantien unverzichtbar

Ultimative Laufzeitbegrenzung: Neutronenversprödung des Reaktorstahls

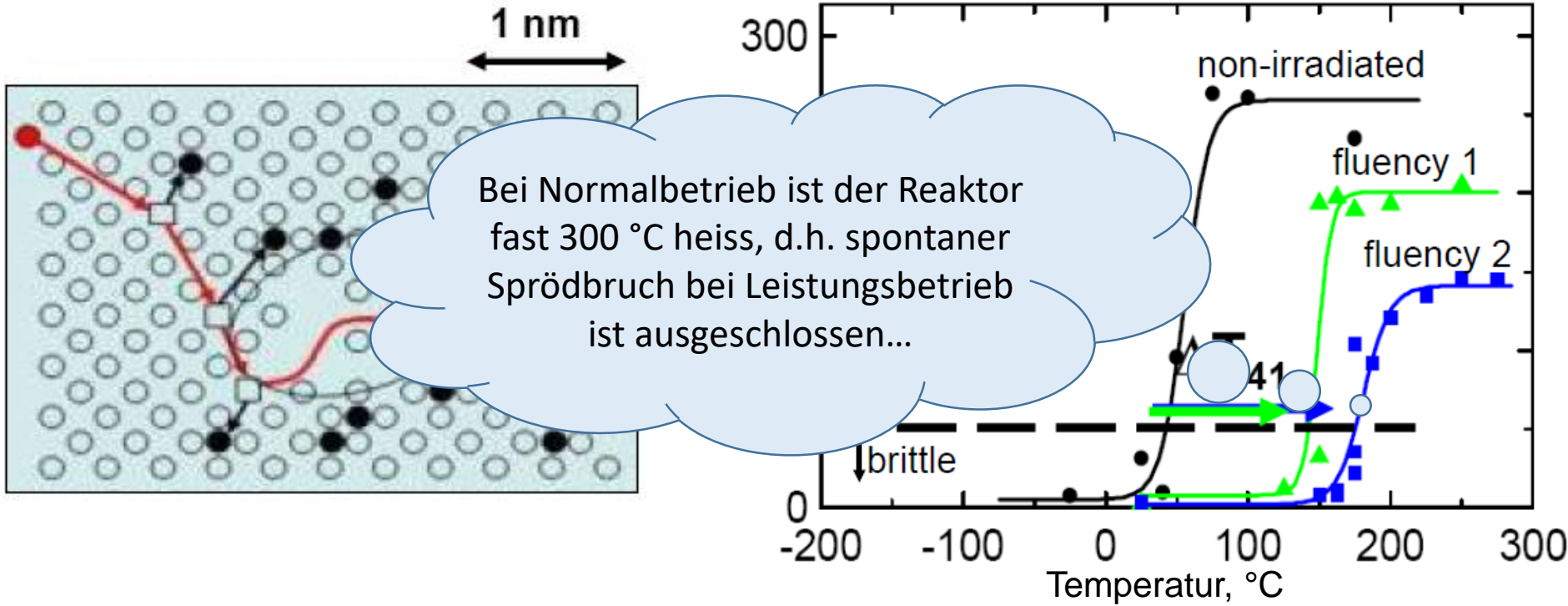


Rückstosskerne bei der Zusammenstoß mit schnellen Neutronen generieren Materialdefekte



Übergangstemperatur von plastischem zum spröden Verhalten steigt → Gefahr von Sprödbrech des Reaktordruckbehälters bei rascher Abkühlung durch eine störfallbedingte Noteinspeisung von kaltem Wasser

Ultimative Laufzeitbegrenzung: Neutronenversprödung des Reaktorstahls



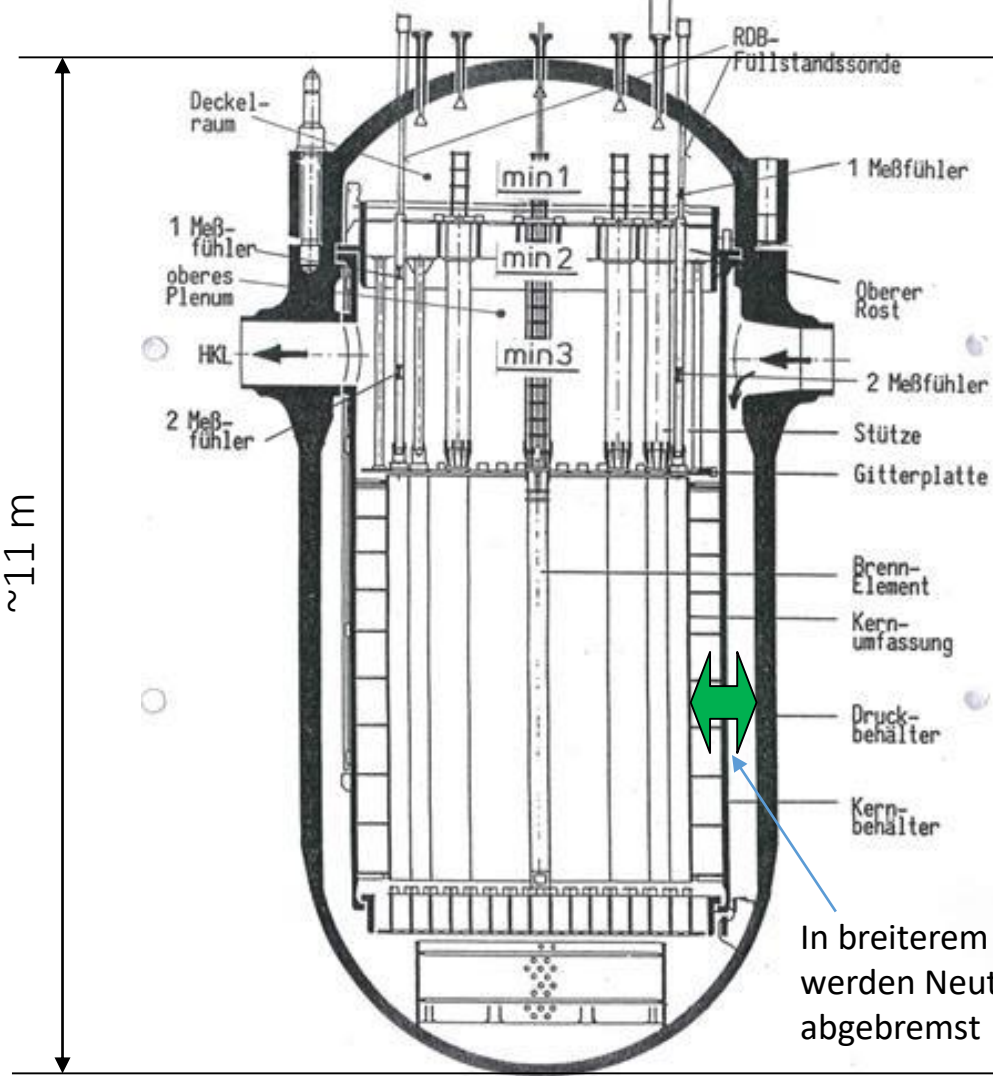
Bei Normalbetrieb ist der Reaktor fast 300 °C heiss, d.h. spontaner Sprödbbruch bei Leistungsbetrieb ist ausgeschlossen...

Rückstosskerne bei der Zusammenstoss mit schnellen Neutronen generieren Materialdefekte

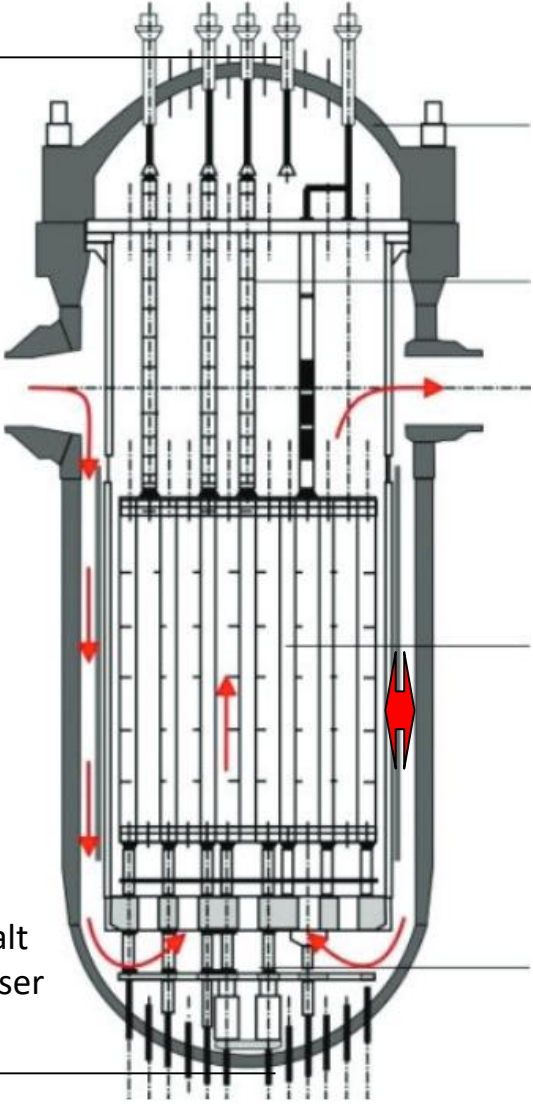


Übergangstemperatur von plastischem zum spröden Verhalten steigt → Gefahr von Sprödbbruch des Reaktordruckbehälters bei rascher Abkühlung durch eine störfallbedingte Noteinspeisung von kaltem Wasser

Neutronenversprödung schreitet in neueren Anlagen langsamer voran



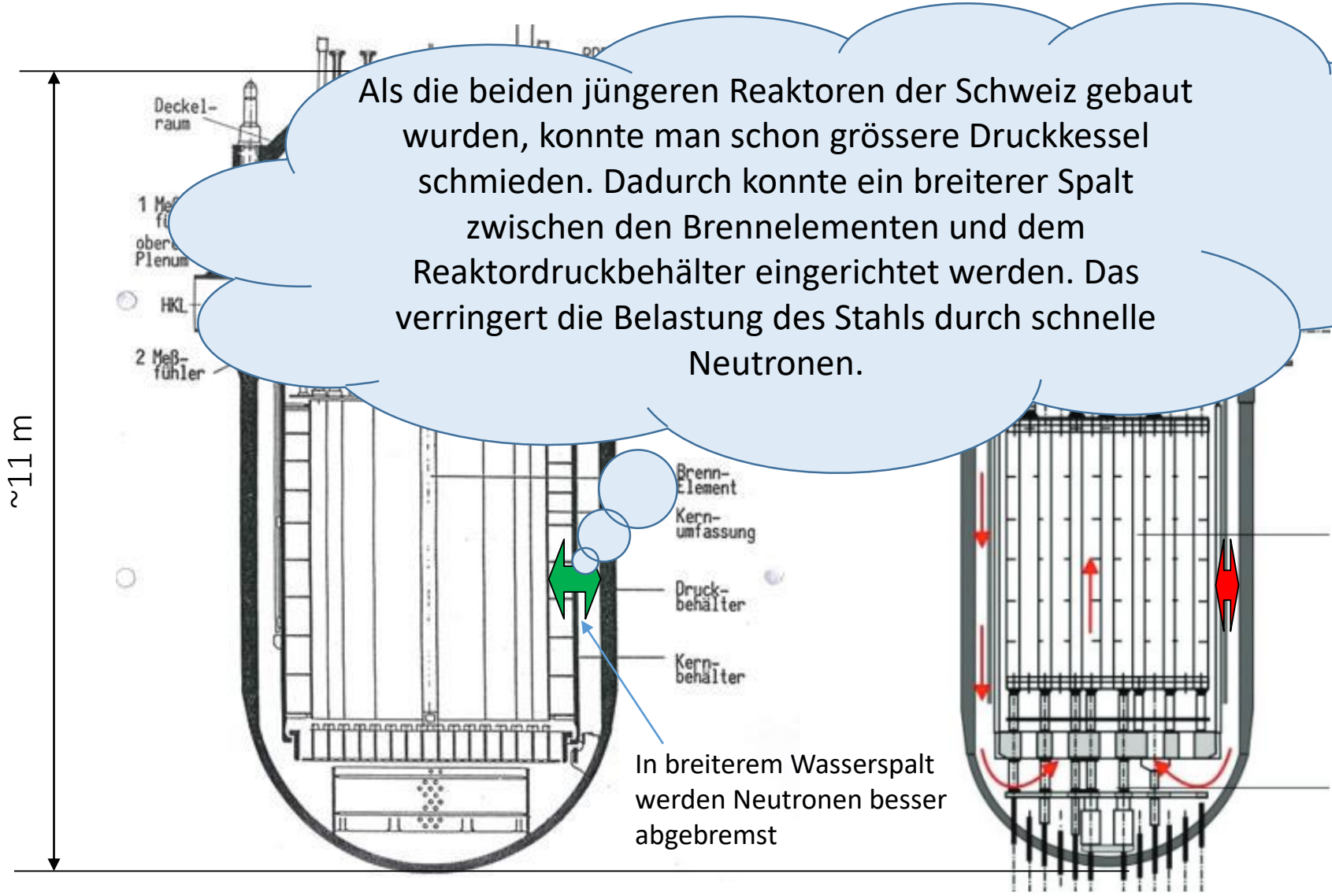
KKG - 80 Jahre möglich



KKB - Limit ist 60 Jahre

In breiterem Wasserspalt werden Neutronen besser abgebremst

Neutronenversprödung schreitet in neueren Anlagen langsamer voran



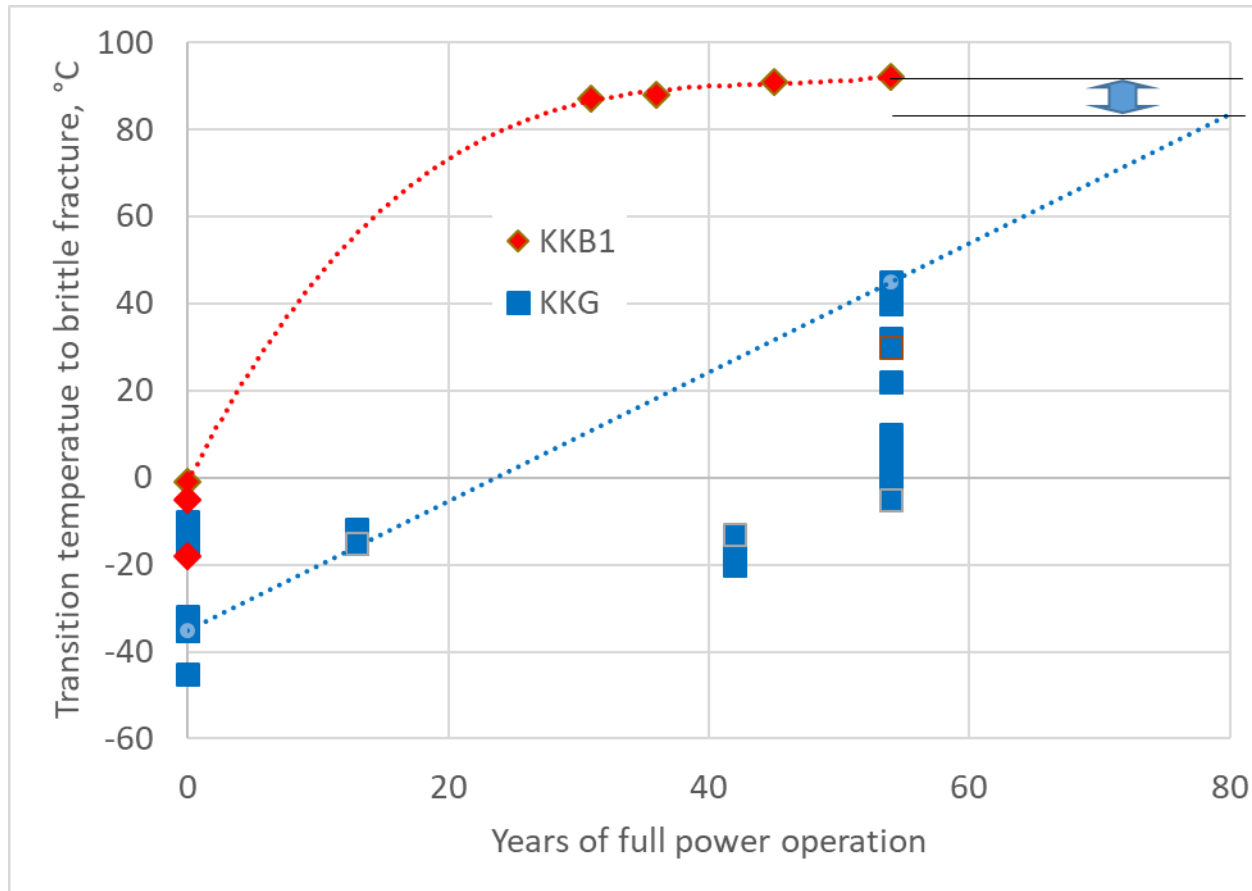
Als die beiden jüngeren Reaktoren der Schweiz gebaut wurden, konnte man schon grössere Druckkessel schmieden. Dadurch konnte ein breiterer Spalt zwischen den Brennelementen und dem Reaktordruckbehälter eingerichtet werden. Das verringert die Belastung des Stahls durch schnelle Neutronen.

In breiterem Wasserspalt werden Neutronen besser abgebremst

KKG - 80 Jahre möglich

KKB - Limit ist 60 Jahre

Grobe Abschätzung der Lebenszeit

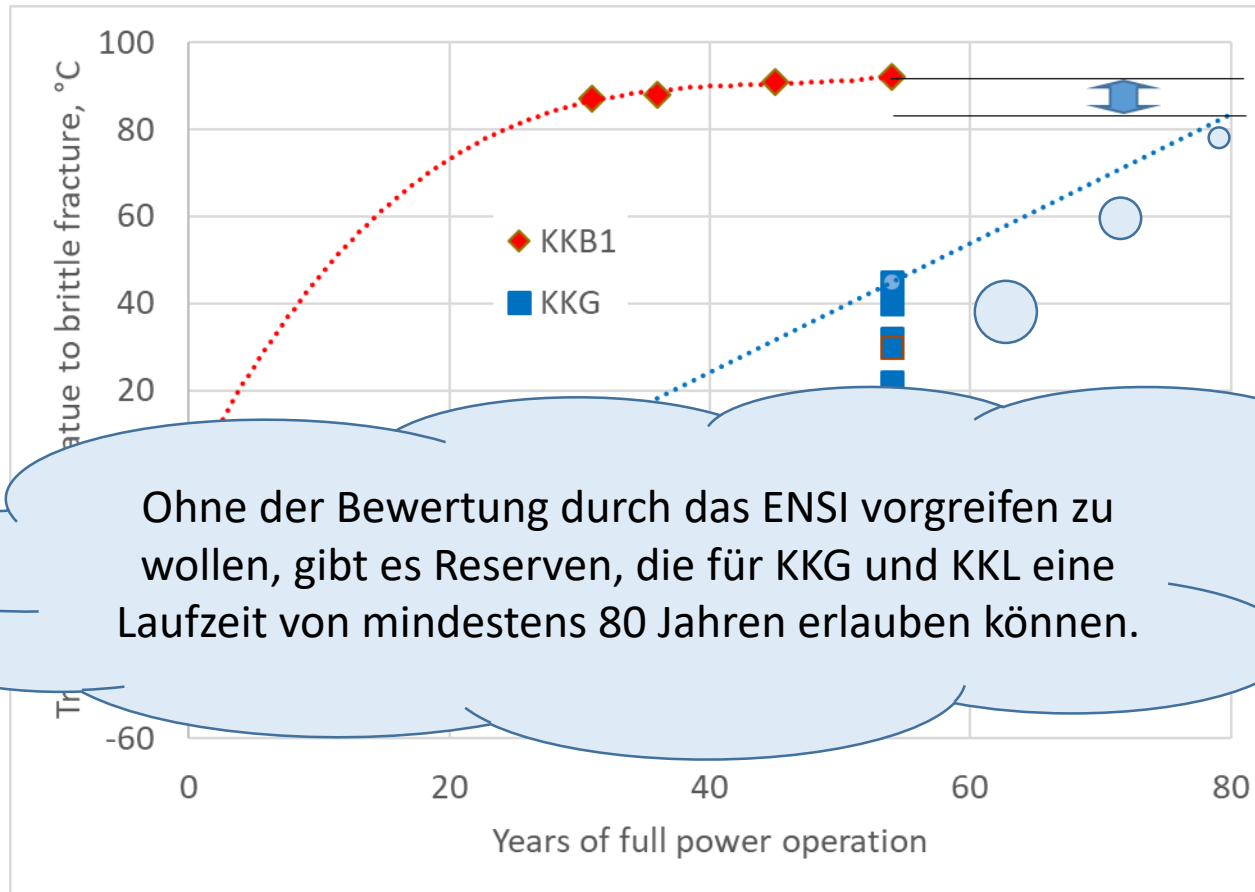


Punkte: Daten für die kritischste Stelle im Reaktorkessel aus verschiedenen ENSI-Berichten

Achtung - es gibt zusätzliche Reserven:

- Wachstum verlangsamt sich mit der Zeit
- Master curve concept noch nicht angewandt auf KKG
- Keine Vorwegnahme der Bewertung durch ENSI!

Grobe Abschätzung der Lebenszeit



Punkte: Zusammengeklaupte ENSI-Daten für die kritischste Stelle im Reaktorkessel

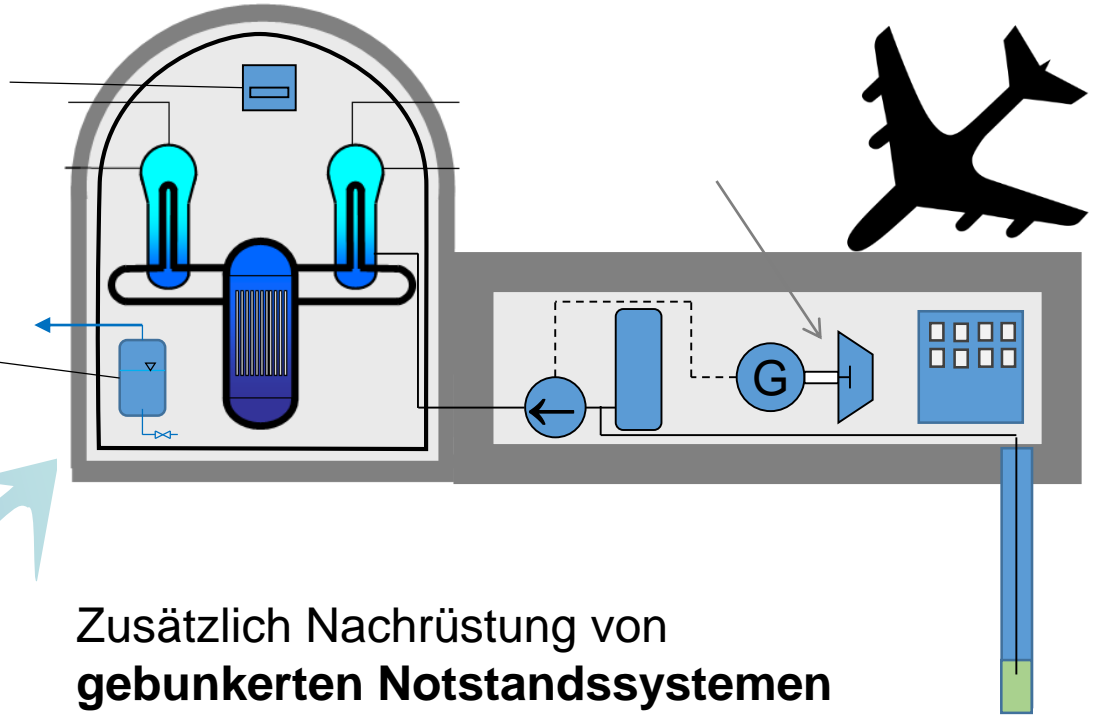
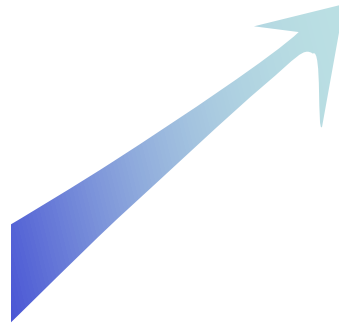
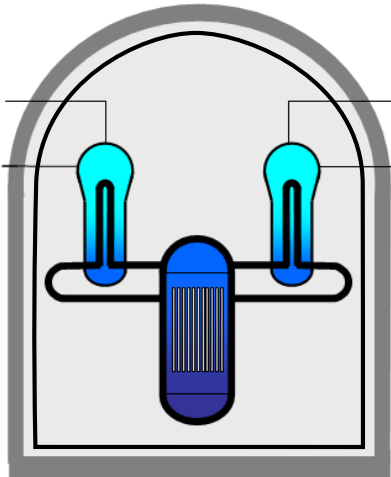
Achtung - es gibt zusätzliche Reserven:

- Wachstum verlangsamt sich mit der Zeit
- Master curve concept noch nicht angewandt auf KKG
- Keine Vorwegnahme der Bewertung durch ENSI!

Erweiterter Schutz bei bestehenden Anlagen

Wasserstoffrekombinatoren
(in allen Schweizer Anlagen)

Gefilterte Druckentlastung (in
(in allen Schweizer Anlagen)



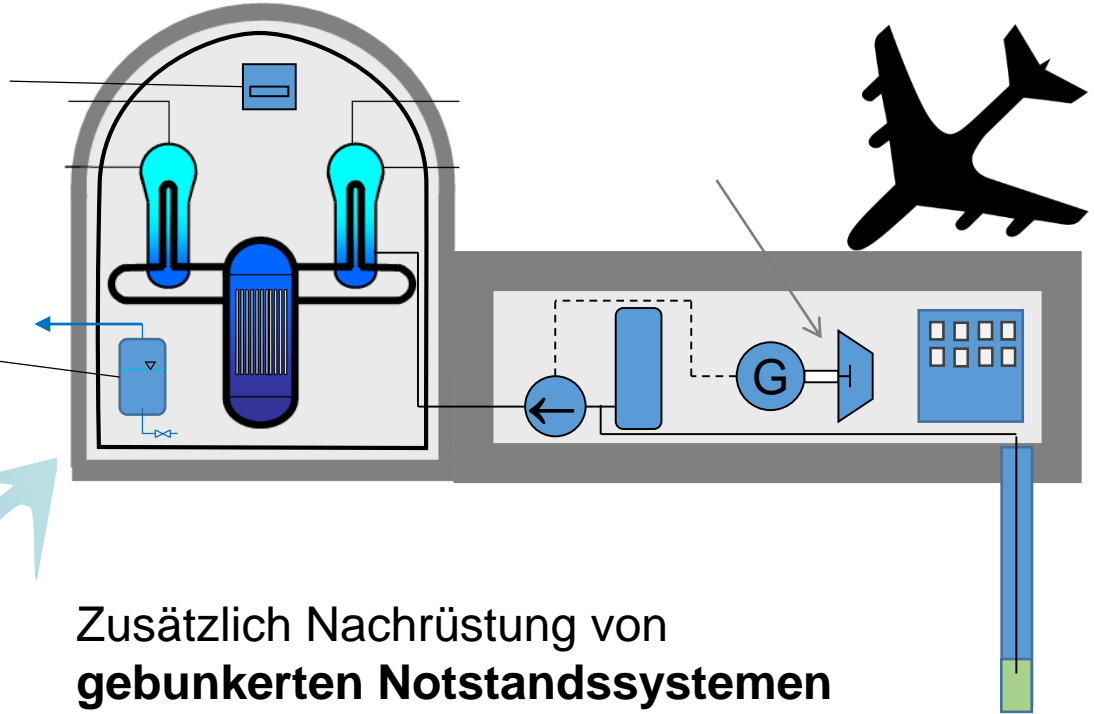
Zusätzlich Nachrüstung von
gebunkerten Notstandssystemen
(Bei KKL und KKG seit Betriebsbeginn)

Das «Normale»: Doppelwandiges Containment
Reaktorschutz (inhärent sichere Rückkopplungseffekte)
Mehrsträngige Notkühlung
Redundante Notstromversorgung / geschützte Dieselgeneratoren

Erweiterter Schutz bei bestehenden Anlagen

Wasserstoffrekombinatoren
(in allen Schweizer Anlagen)

Gefilterte Druckentlastung (in
(in allen Schweizer Anlagen)



Zusätzlich Nachrüstung von
gebunkerten Notstandssystemen
(Bei KKL und KKG seit Betriebsbeginn)

Essenz:

- Die noch laufenden Schweizer Kernkraftwerke waren schon lange vor der Katastrophe in Fukushima gut vor vergleichbaren Einwirkungen von aussen geschützt.

Redundante Notstromversorgung / geschützte Dieselgeneratoren

Da

Bierdeckel zu 80 Jahren KKW-Betrieb

KKL + KKG

Leistung ca. 2'250 MW

verfügbarkeit: >92 %

= 18 Mrd kWh pro Jahr

GondoSolar: 23.3 GWh/a

Baukosten: 42 Mio. CHF

18 Mrd kWh pro Jahr → 770 x GondoSolar

→ Investition: **~32 Mrd CHF**

Aber:

+ Speicherkosten

+ Systemkosten

Keine CO₂-Reduktion

Bierdeckel zu 80 Jahren KKW-Betrieb

Essenz:

- Natürlich machen auch Solaranlagen im Gebirge Sinn, wenn der Landschaftsschutz beachtet wird (auf Lavinenverbauungen sowieso...)
- Ein Grossteil des Solarausbaus muss aber in der gegenwärtigen Strategie die Kernkraft ersetzen
- Das spart keine Tonne CO₂ ein und ist teurer, weniger umweltfreundlich als ein optimaler Anteil Kernenergie

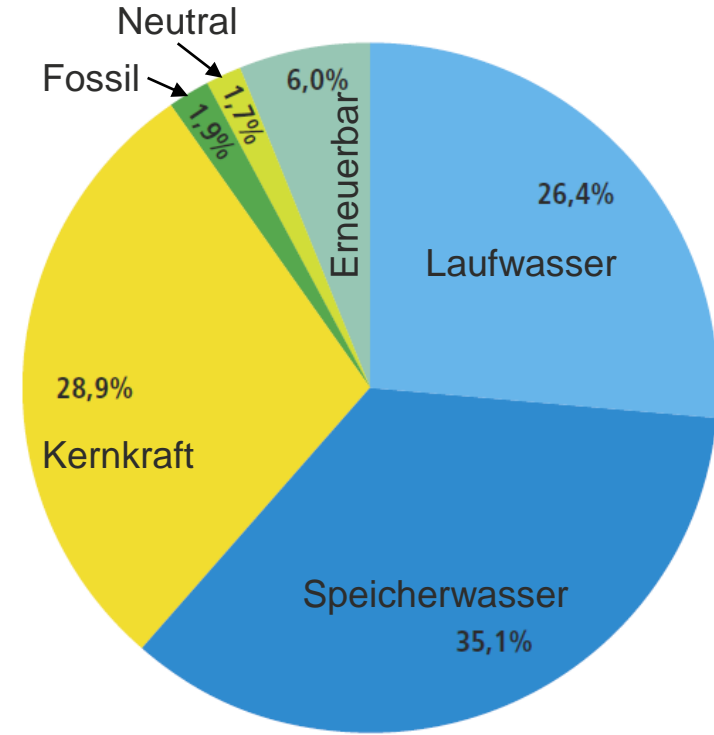
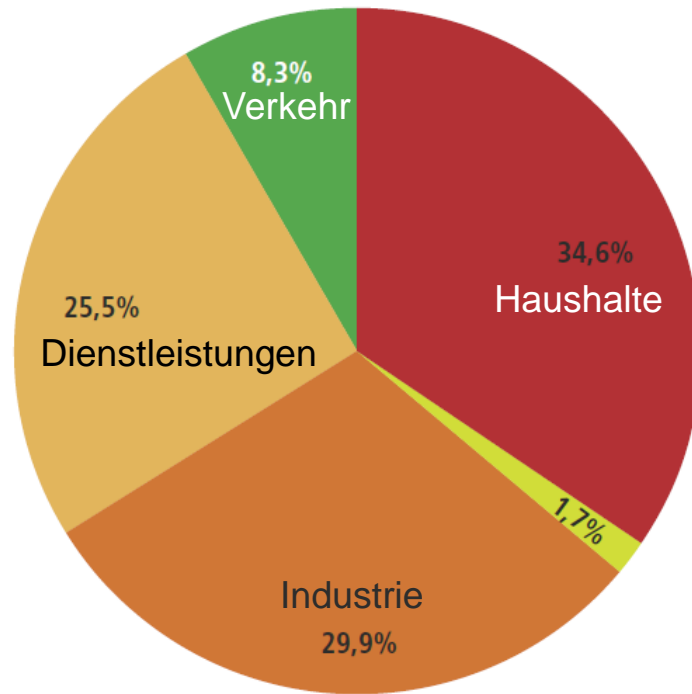
→ Investitionskosten in CHF

+ Speichererkosten

+ Systemkosten

Keine CO₂-Reduktion

Vision: Energie für den Industriestandort



BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021

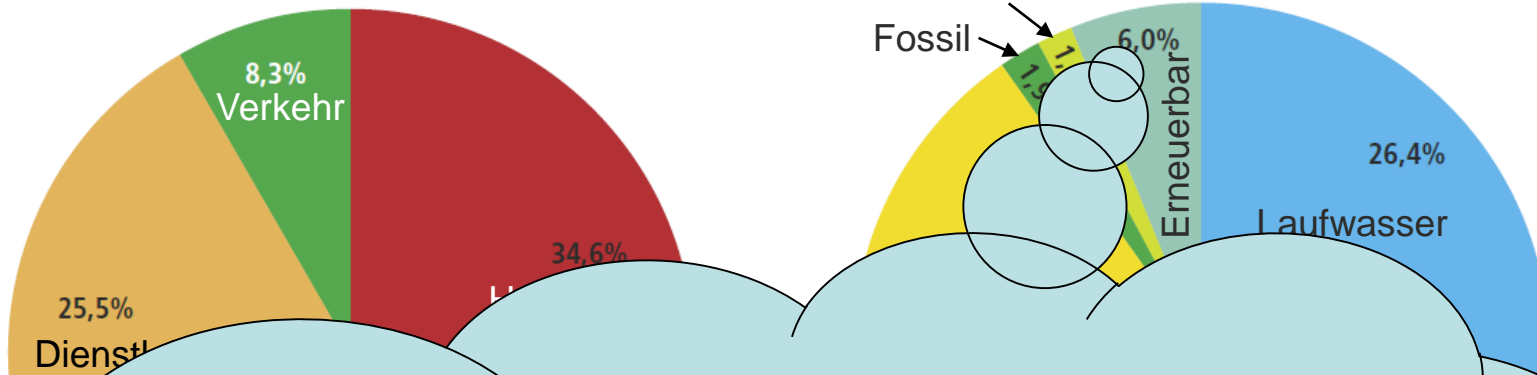


- 24 Stunden / 7 Tage die Woche
- Ohne Speicherbedarf

Speichern =

- Energieverluste
- Investitions- und Betriebskosten
- Umweltbelastung (Rohstoffe...)

Vision: Energie für den Industriestandort



Essenz:

- Wenn die Kernkraft die Grundlast (vorrangig) für die Industrie übernimmt, kann der Ausbau der Erneuerbaren sich auf die Deckung des wachsenden Strombedarfs für die Dekarbonisierung von Verkehr und Gebäudeheizung, sowie im Wohn- und Dienstleistungsbereich konzentrieren
- Dabei werden Kosten und Umwelteinfluss reduziert. Die Industrie hat es leichter, auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig zu bleiben (besonders wenn andere Länder ihren Energiemix durch Hinzunahme der Kernkraft optimieren).
- Ausserdem entsteht ein höherer Grad der Diversifizierung der Stromversorgung - das System wird stabiler gegen absehbare und unerwartete Ausfälle

Investitions- und Betriebskosten
Umweltbelastung (Rohstoffe...)

Wissenschaftlich-technischer Fortschritt bei der Sicherheit

❖ *Autarkie:*

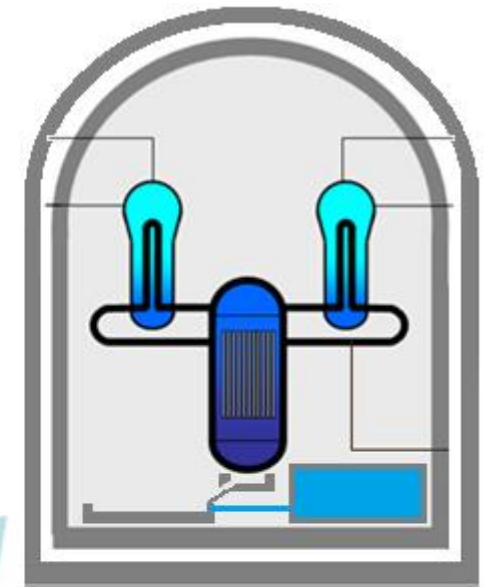
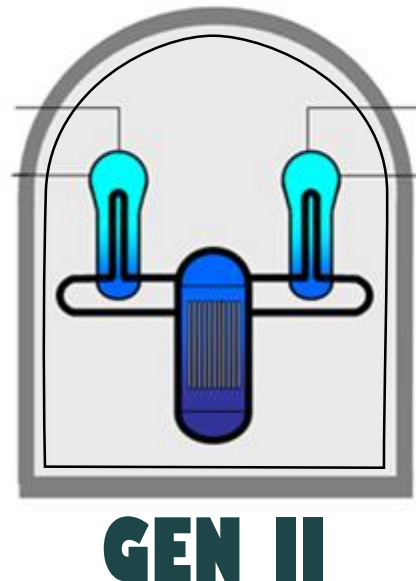
- Entkopplung von der Notstromversorgung (*oder* massiv gebunkerte Diesel)

❖ *Autonomie:*

- Zurückdrängung des Faktors Mensch

❖ *Robustheit:*

- Entkopplung von Kernschaden und Freisetzung
- Starker Schutz vor externen Einwirkungen



Druckwasserreaktoren
Siedewasserreaktoren

Wissenschaftlich-technischer Fortschritt bei der Sicherheit

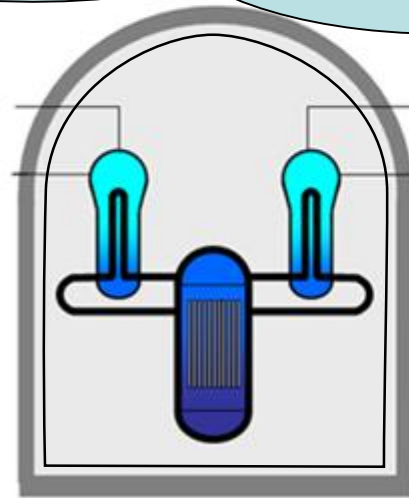
❖ **Autarkie:**

- Entkopplung von der Notstromversorgung (*oder* massiv gebunkerte Diesel)

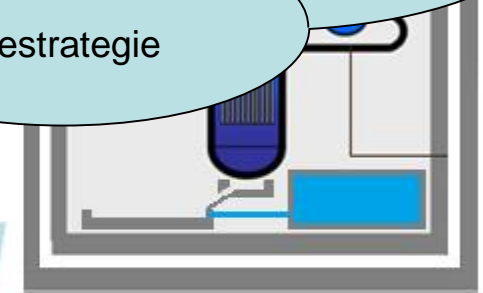
❖ **Autonomie:**

Essenz:

- Kernkraftwerke der Generation III und III+ (Gen III) haben ein sehr hohes Sicherheitsniveau
- Gen III wird an vielen Orten gebaut und z.T. schon betrieben
- Gen III kann auch in der Schweiz schon jetzt in die Energiestrategie einbezogen werden



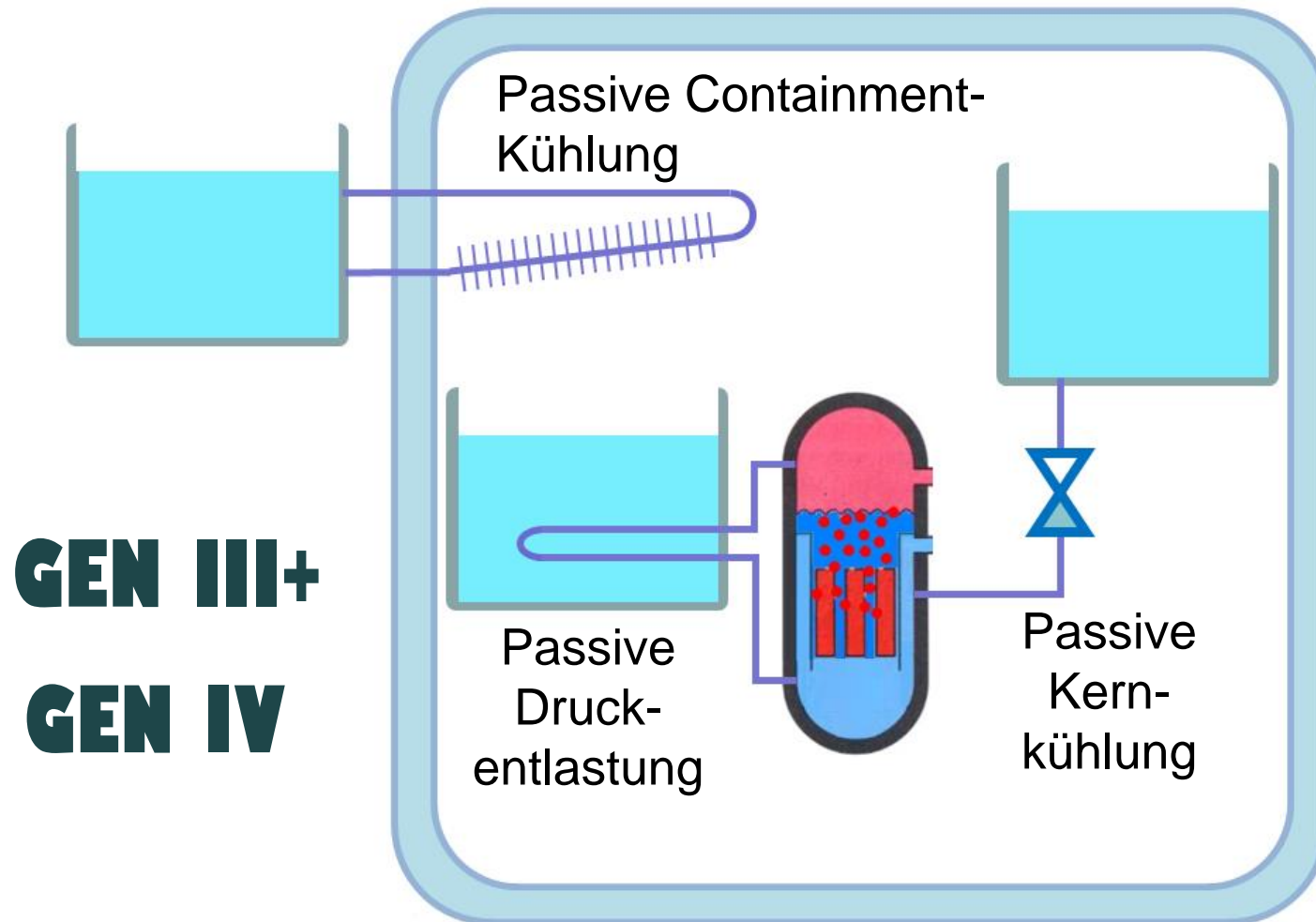
GEN II



GEN III

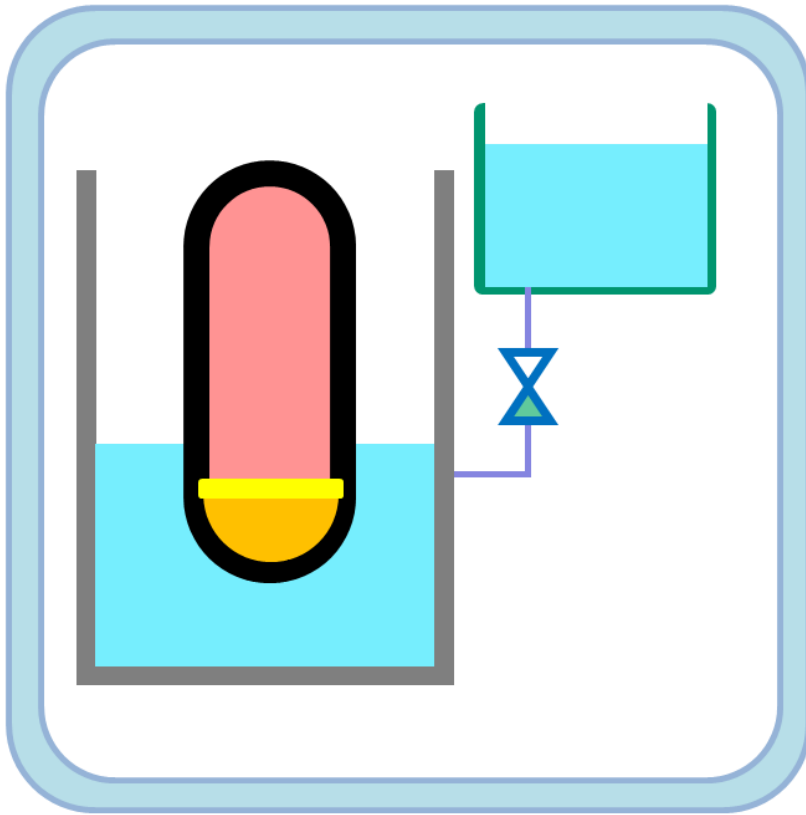
Druckwasserreaktoren
Siedewasserreaktoren

Passive Sicherheitssysteme – ab Gen III+



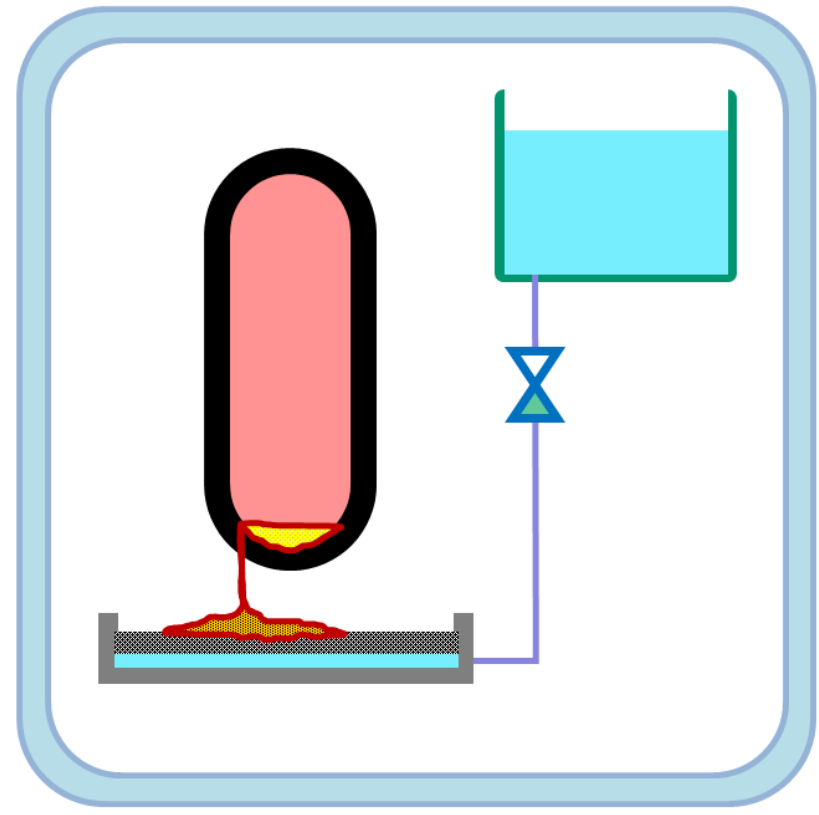
- Keine Notstromdiesel erforderlich
- Mehrere Tage Unabhängigkeit von Operatoraktionen

Rückhaltung der Kernschmelze, ab Gen III



Rückhaltung im
Reaktordruckbehälter

Schmelzekühlung durch passive
Flutung der Reaktorgrube

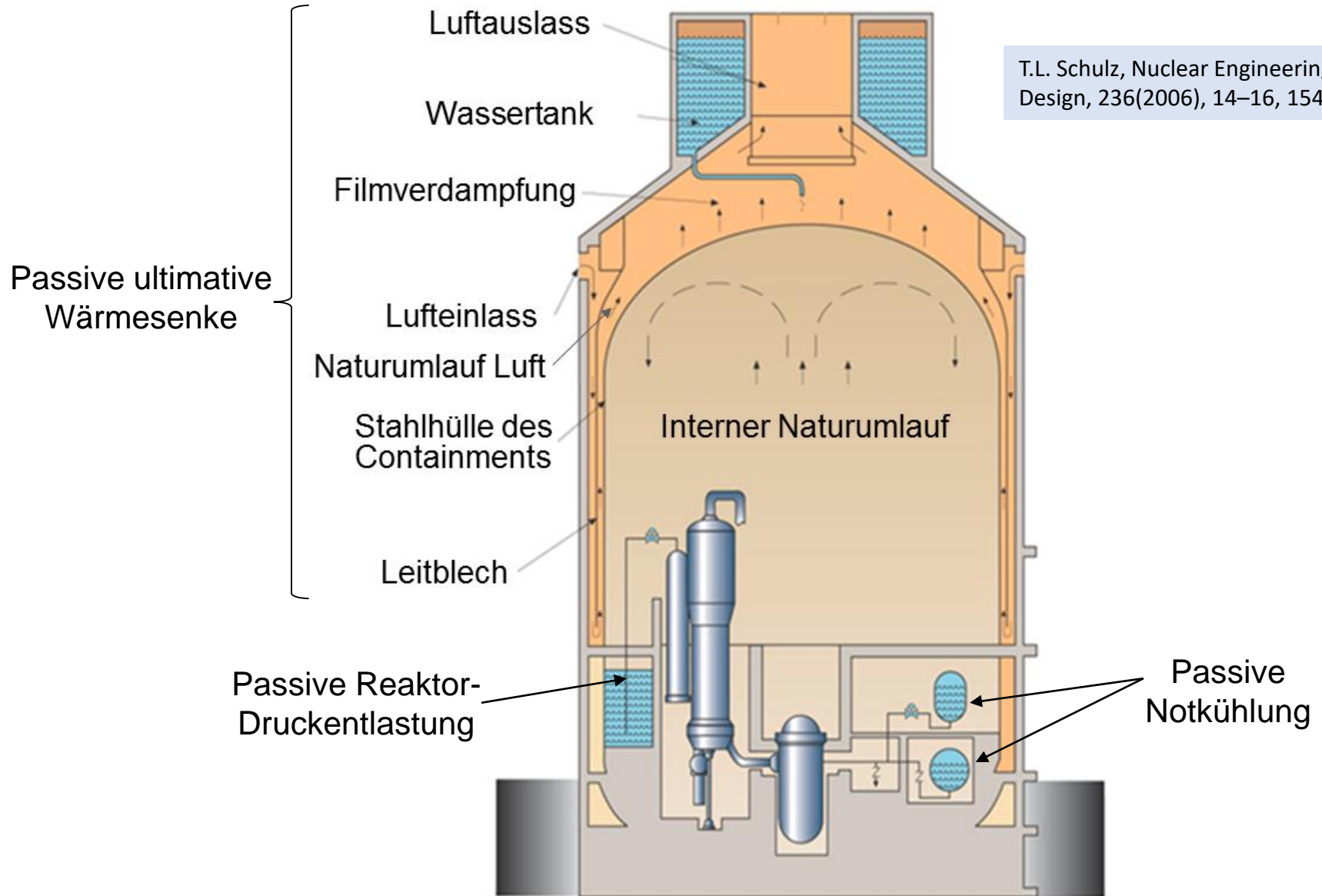


Kernfänger («Core Catcher»)
im Containment

Passive Kühlung der Bodenplatte
des Kernfängers

Erhalt der Containment-Integrität → Keine Freisetzung trotz Kernschaden

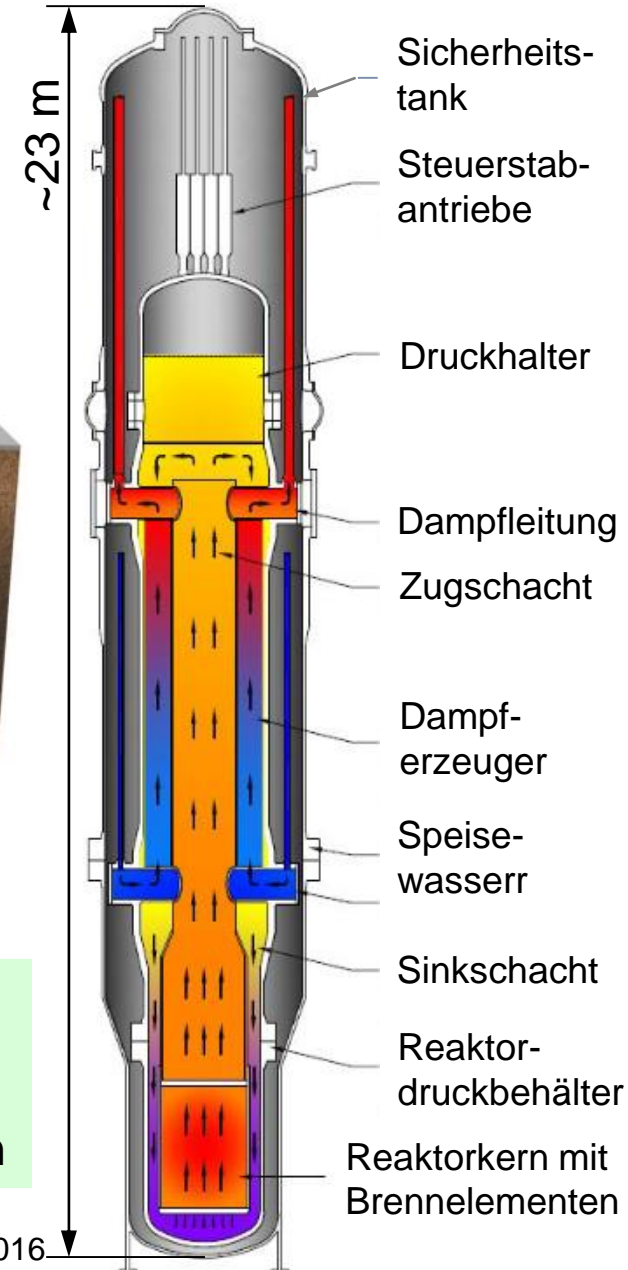
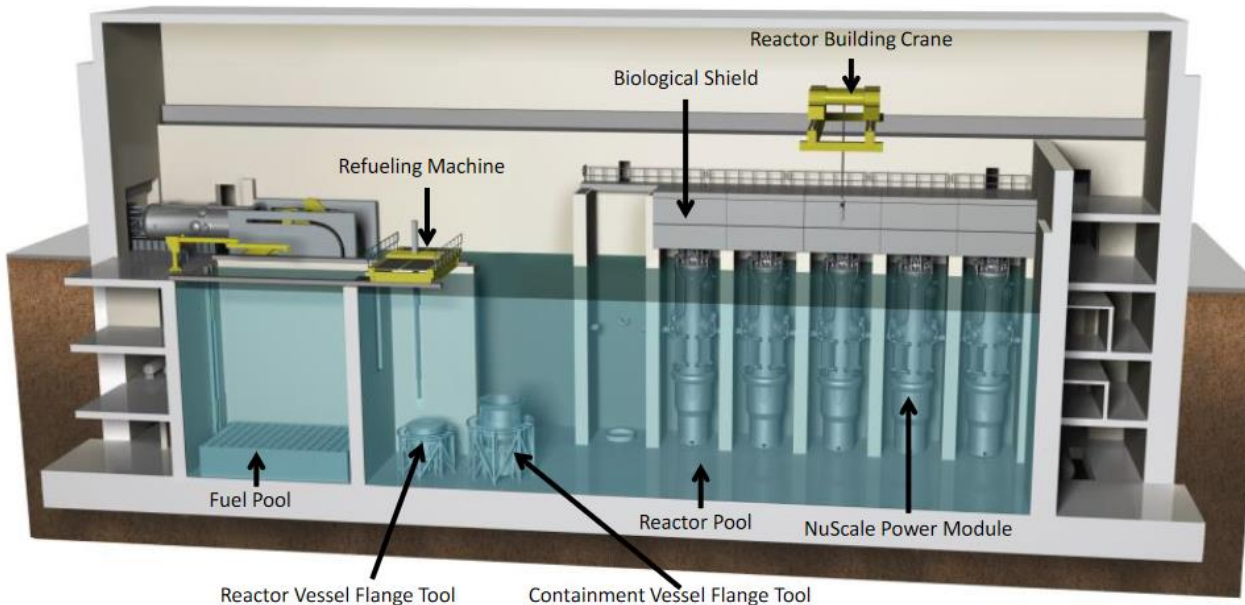
Beispiel für einen Druckwasserreaktor der Generation III



AP1000 (Westinghouse): Alle Sicherheitseinrichtungen arbeiten passiv

Beispiel für einen Kleinen Modulare Druckwasserreaktor

NuScale SMR Technology, Oregon, USA



J, Reyes et al., 2018.

1 Modul: $250 \text{ MW}_{\text{th}}$, $77 \text{ MW}_{\text{el}}$ (brutto)

Ökonomie der Grösse $\xrightarrow{\text{???}}$ Ökonomie der Serie

Kleinere Investitionsschritte $\xrightarrow{\text{???}}$ schnellere Amortisation

J. Doyle et al, 2016

Baukosten-Bierdeckel

Sorgenkind EPR

~10 Mrd CHF Baukosten

Leistung: 1600 MW für 60 Jahre

verfügbarkeit: 92 %

= 770 Mrd kWh

→ 0.013 CHF/kWh

PV Installation in CH: >1500 CHF/kWp

verfügbarkeit: 900 Volllaststunden im Jahr

Betriebsdauer: 30 Jahre

= 27'000 kWh

→ 0.055 CHF/kWh

Aber: + Speicherkosten!

Baukosten-Bierdeckel

Sorgenkind EPR

~10 Mrd CHF Baukosten

Leistung: 1600 MW für 60 Jahre

verfügbarkeit: 92 %

= 770 Mrd kWh

→ 0.013 CHF/kWh

Achtung:

- Die Kosten für die Erzeugung einer Kilowattstunde enthalten zusätzlich Betriebs- und Entsorgungskosten und im Fall der Kernenergie Brennstoffkosten, im Fall der Photovoltaik zusätzlich Speicherkosten

Aber: ... Kosten!

Es ist zu erwarten, dass die Baukosten sinken, wenn bei den Herstellern wieder «Routine» einkehrt.

○
Sorgenkind EPR

~10 Mrd CHF Baukosten

Leistung: 1600 MW für 60 Jahre

verfügbarkeit: 92 %

= 770 Mrd kWh

→ 0.013 CHF/kWh

Achtung:

- Die Kosten für die Erzeugung einer Kilowattstunde enthalten zusätzlich Betriebs- und Entsorgungskosten und im Fall der Kernenergie Brennstoffkosten, im Fall der Photovoltaik zusätzlich Speicherkosten

Aber: ... Kosten!

Werden Baukosten verwechselt mit Finanzierbarkeit?

PV:

- Finanziert aus Spareinlagen des Mittelstands (Dachanlagen)
- Mittelstand schöpft Fördersummen ab
- Mittelstand erzielt für 30 Jahre bessere Rendite als auf der Bank
- Förderung finanziert durch alle privaten Stromkunden über Erneuerbarenumlage
- Nach 30 Jahren neue Kosten für Rückbau, (vielleicht) Recycling und Neuinvestition

KE:

- Grossprojekt mit renditeorientiertem Finanzierungsmodell
- Stromkunde finanziert Kapitaldienste für 30 Jahre
- Danach ≥ 30 Jahre Gewinnzone
- Rendite kann dann für die Finanzierung neuer KKW (oder Rentenfonds?) genutzt werden
- Nach 60-80 Jahren Rückbau und Entsorgung über Rückstellungen

Werden Baukosten verwechselt mit Finanzmarktbarkeit?

PV:

- **Finanzie** Mittel
Muss man nun das eine oder das andere tun?
 - Man kann und muss beides tun, den beides wird gebraucht.
- **Mittel**
 - Der Vorwurf, ein Kernkraftwerk sei in der Anschaffung zu teuer, ist eine Nebelkerze.
 - Wenn ein Land etwas dringend braucht, dann wird es finanziert, siehe NEAT für 24 Mrd. CHF
 - Wenn ein Land etwas dringend braucht, und die Wirtschaft ist nicht stark genug, dann ist (m.M. nach) der Staat in der Pflicht
 - Energie ist Grundbedarf. Strom steht am Anfang der «industriellen Nahrungskette». Damit sollte (m.M. nach) nicht am freien Markt spekuliert werden.
- **Nach** Rückbau, (v) Neuinvestition

Kostentrend Solaranlagen

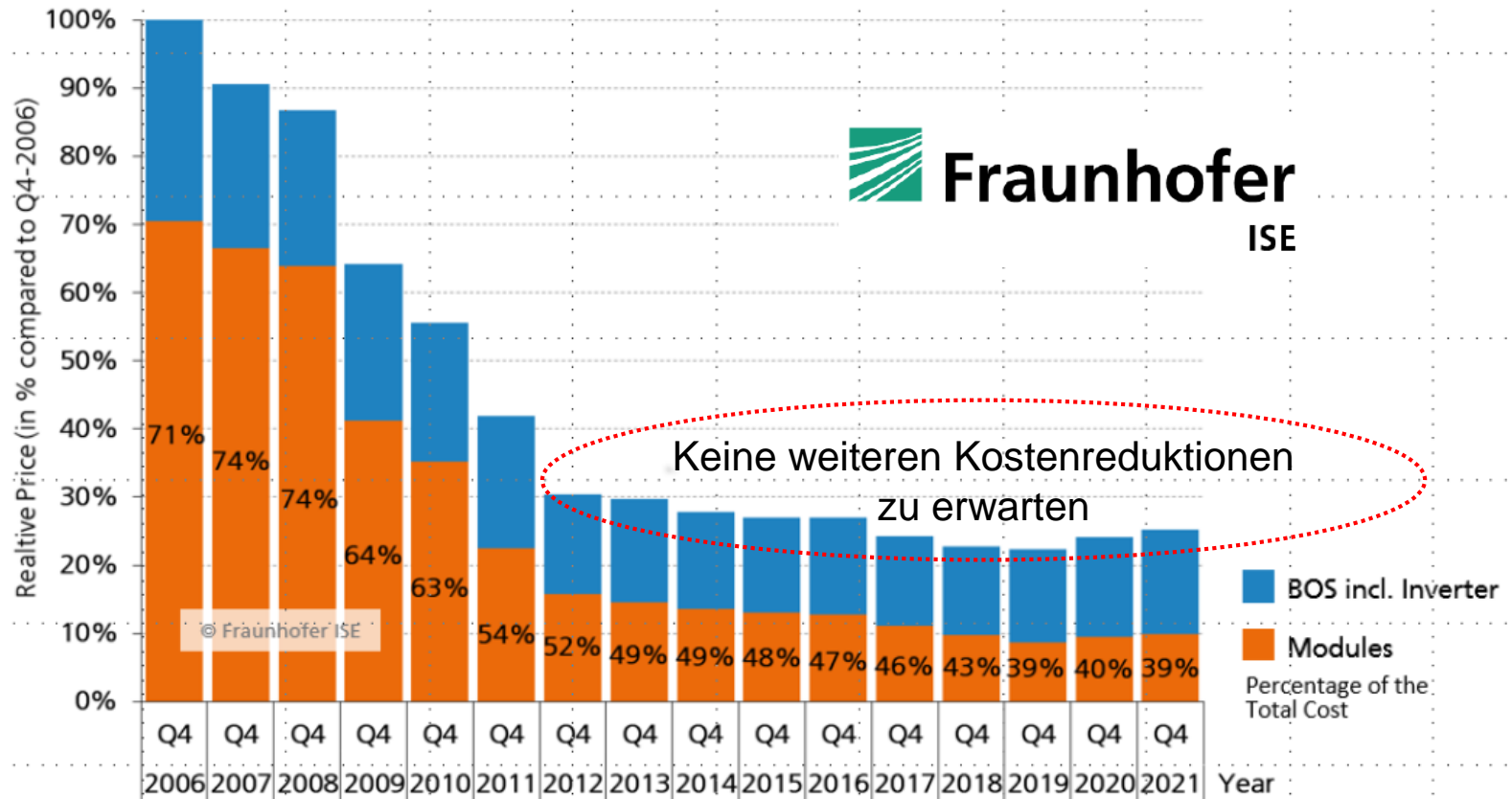


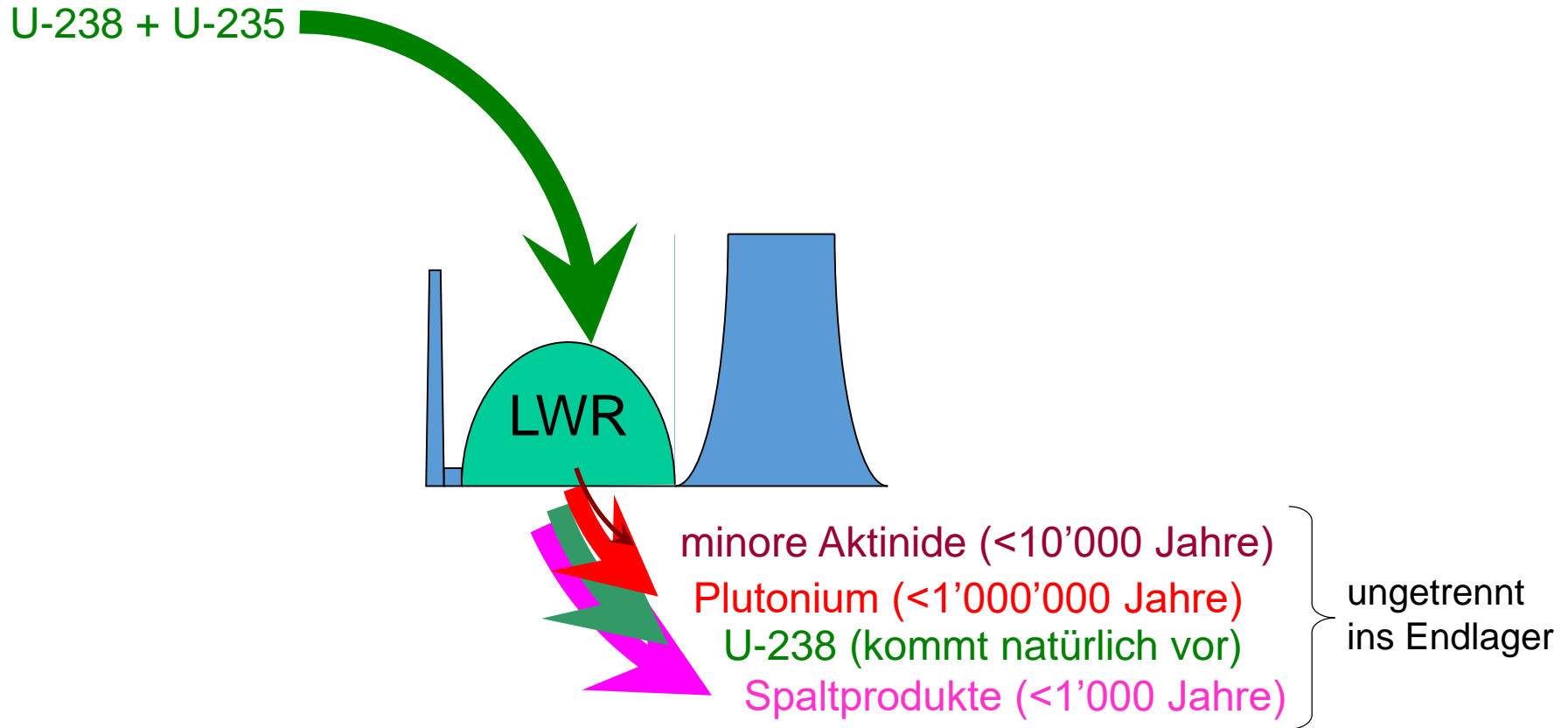
Abbildung 5: Entwicklung des durchschnittlichen Endkundenpreises (Systempreis, netto) für fertig installierte Aufdachanlagen von 10 – 100 kW_p [ISE5], Daten BSW-Solar.

Ersetzen PV-Anlagen fossile und nukleare Kraftwerke?

«Nein, zumindest nicht in den nächsten Jahren» - Das Fraunhofer Institut sieht Herausforderungen bei dem Aufbau der nötigen Energiespeicherkapazitäten

Direkte Endlagerung

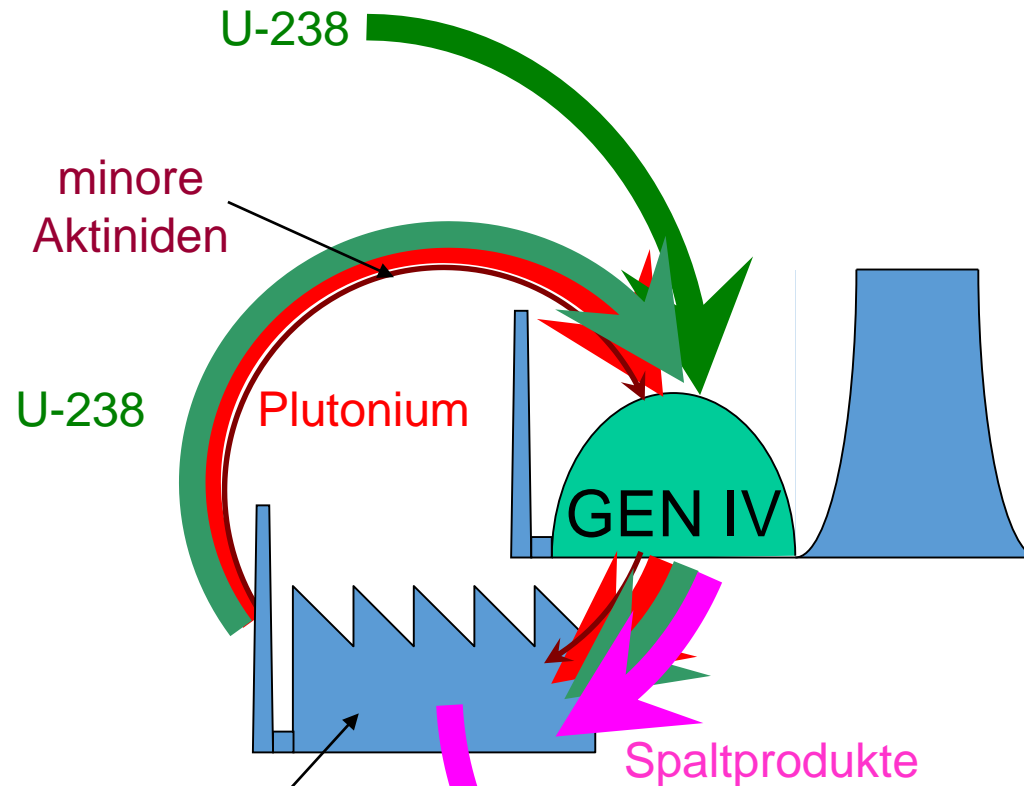
Langlebige Komponenten bestimmen die notwendige Einschusszeit



Einschlusszeit: Abfall der Radiotoxizität unter das Niveau des ursprünglich eingesetzten Uranerzes

Geschlossener Brennstoffzyklus

Mehr Nachhaltigkeit bei Brennstoffversorgung



Die Hauptarbeit leistet die **Wiederaufbereitung** (derzeit politisches Verbot)

Mehr Nachhaltigkeit beim Abfall
Nur Spaltprodukte zum Endlager
(Einschlusszeit <1000 Jahre)

Geschlossener Brennstoffzyklus

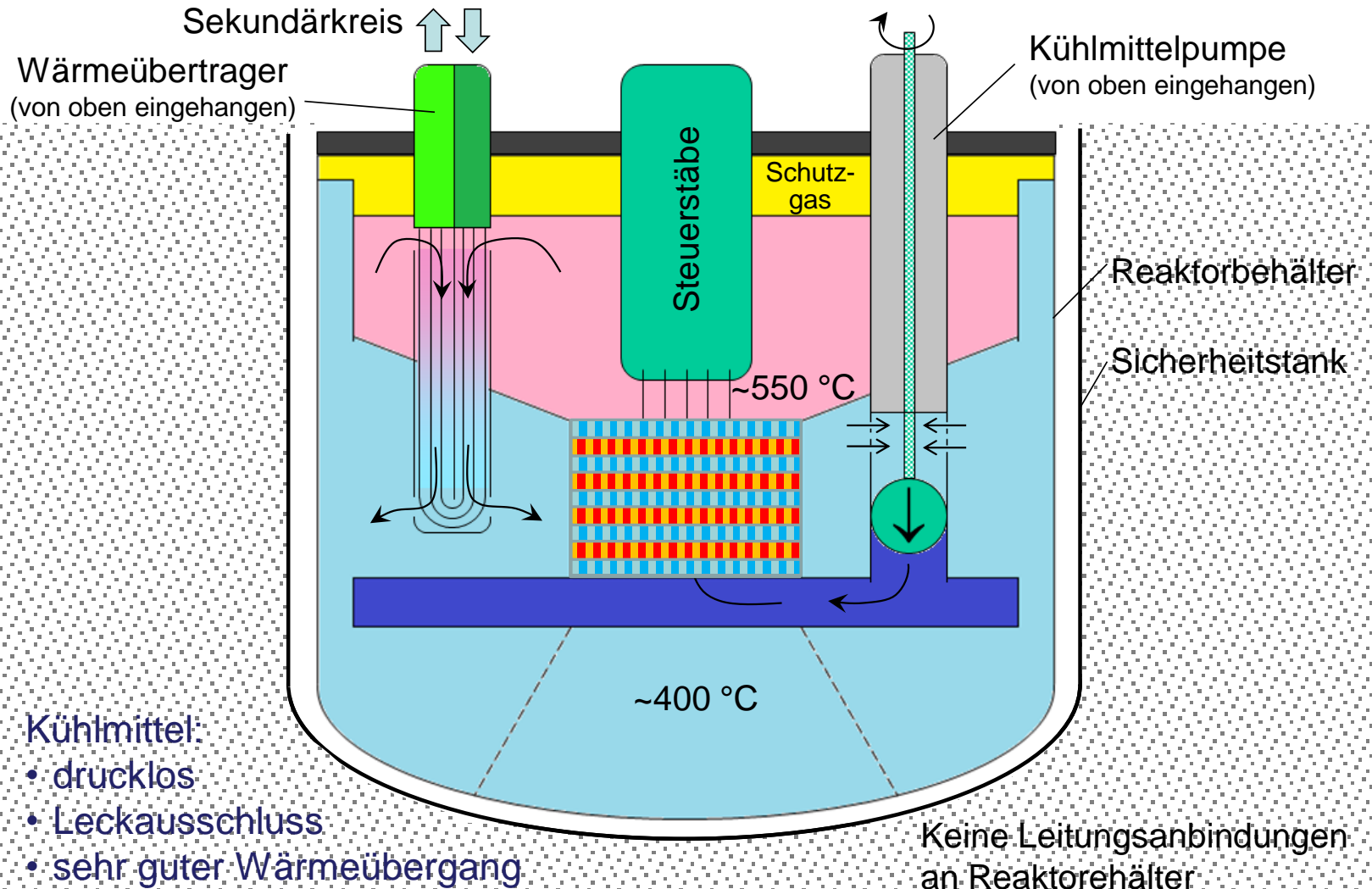
Achtung!

- Der Brennstoffkreislauf wird von einem Wiederaufarbeitungswerk geschlossen, der Reaktor sorgt dafür, dass sich Plutonium und weitere Transuran-Isotope (Minore Aktinoide) nicht immer weiter anhäufen können.
- Plutonium und weitere Transuran-Isotope (Minore Aktinoide) bleiben im Kreislauf eingeschlossen und somit in industriellen Anlagen an der Erdoberfläche. Ihre Menge wächst eine Zeit lang an, danach bleibt sie konstant (man spricht von einem Gleichgewicht zwischen Bildung und Verbrauch). Im Gegensatz dazu gelangt bei der direkten Tiefenlagerung der ausgedienten Brennelemente alles zusammen tief unter die Erde.
- Auch beim geschlossenen Brennstoffzyklus fallen hochaktive Abfälle an. Deren Gesamtaktivität ist pro produzierter Kilowattstunde fast genauso hoch, wie beim offenen Brennstoffzyklus - nur der Abfall zerfällt schneller.

Die Hauptarbeit ist
die **Wiederaufarbeitung**
(derzeit politisches Verbot)

Mehr Nachhaltigkeit beim Abfall
Nur Spaltprodukte zum Endlager
(Einschlusszeit <1000 Jahre)

Natriumgekühlte Reaktoren mit schnellen Neutronen



Natriumgekühlte Reaktoren mit schnellen Neutronen

Wärm
(von

Essenz:

- Natrium klingt gefährlich (reagiert heftig mit Wasser unter Wasserstoffbildung, Explosionsgefahr, ist brennbar), hat aber auch viele Vorteile
- Hoher Siedepunkt → druckloser Reaktor, Leckstörfälle können ausgeschlossen werden
- Hoher Siedepunkt → hohe Abschalttemperatur → einfachere Notkühlung durch hohe Temperaturdifferenz zur Umwelt
- Keine Korrosion von Edelstahl im Natrium (im Gegensatz zu Blei/Wismut und z.T. auch Wasser)
- Hohe Wärmeleitfähigkeit (~100x besser, als Wasser) → gutes Kühlmittel
- Und natürlich - wie auch bei anderen Kühlmitteln ungleich Wasser - kaum Neutronenabbremung → gutes Kühlmittel für Reaktoren mit schnellen Neutronen

Keine Leitungsanbindungen
an Reaktorehälter

Natriumgekühlte Reaktoren mit schnellen Neutronen

Wärm
(von

Essenz:

- Natrium klingt gefährlich (reaktiv mit Wasser),
Schnelle Neutronen werden gebraucht,
 - damit der Reaktor aus U-238 oder Th-232 mehr neuen Spaltstoff produzieren kann, als er verbraucht
 - damit der Reaktor alle Isotope der Transurane (Neptunium, Plutonium, Americium, Curium, Berkelium, Californium...) spalten und damit in kürzerlebige Spaltprodukte umwandeln kann, und nicht nur einige spezielle Isotope unter ihnen

Blei/

- Hohe Wärmeleitfähigkeit (~100x Wasser) → gutes Kühlmittel

- Und natürlich - wie auch bei anderen Kühlmitteln ungleich Wasser - kaum Neutronenabbremung → gutes Kühlmittel für Reaktoren mit schnellen Neutronen

• dru

• Leckage

• sehr guter Wärmeübergang

Keine Leitungsanbindungen an Reaktorehälter

Kurz vor Inbetriebnahme: Der Natriumgekühlte Brüter in Xiapu, China



- Inbetriebnahme erwartet in 2023 (Baustart 2017)
- Baustart 2. Einheit: 2020
- 1500 MWth, 600 MWe, 41% Wirkungsgrad, Dampf mit 480°C, Bruterate 1.1
- Lebensdauer 40 Jahre
- Passive Sicherheitssysteme
- Im Bild: ROSATOM liefert Erstbeladung und erste Umladung

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Fuel-despatched-to-China-for-CFR-600-fast-neutron>

Salzschmelzereaktor

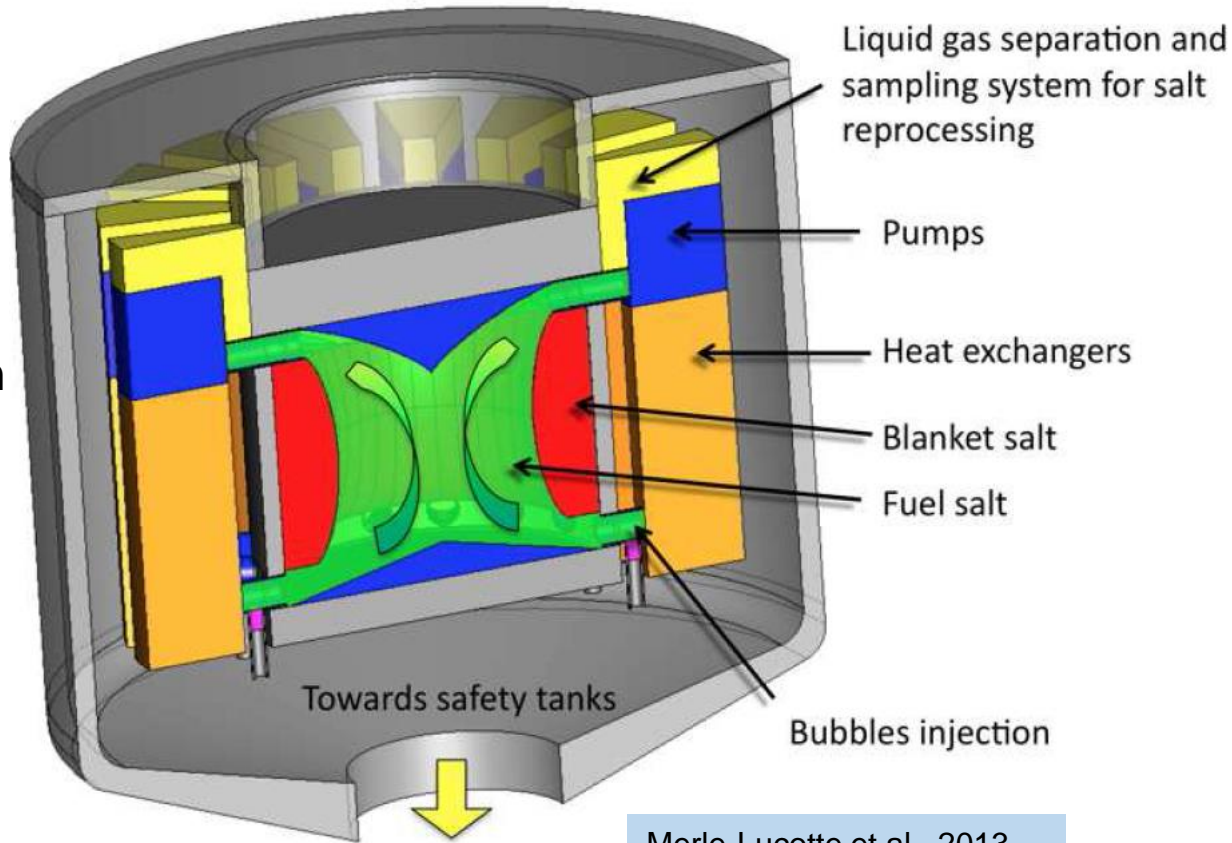
Brennstoff ist aufgelöst in geschmolzenem Trägersalz

z.B. FLiNaK = LiF, NaK, KF

Viele unterschiedliche Typen in Entwicklung

Grösste Herausforderungen:

- Chemie
- Korrosion → Werkstoffe



Merle-Lucotte et al., 2013

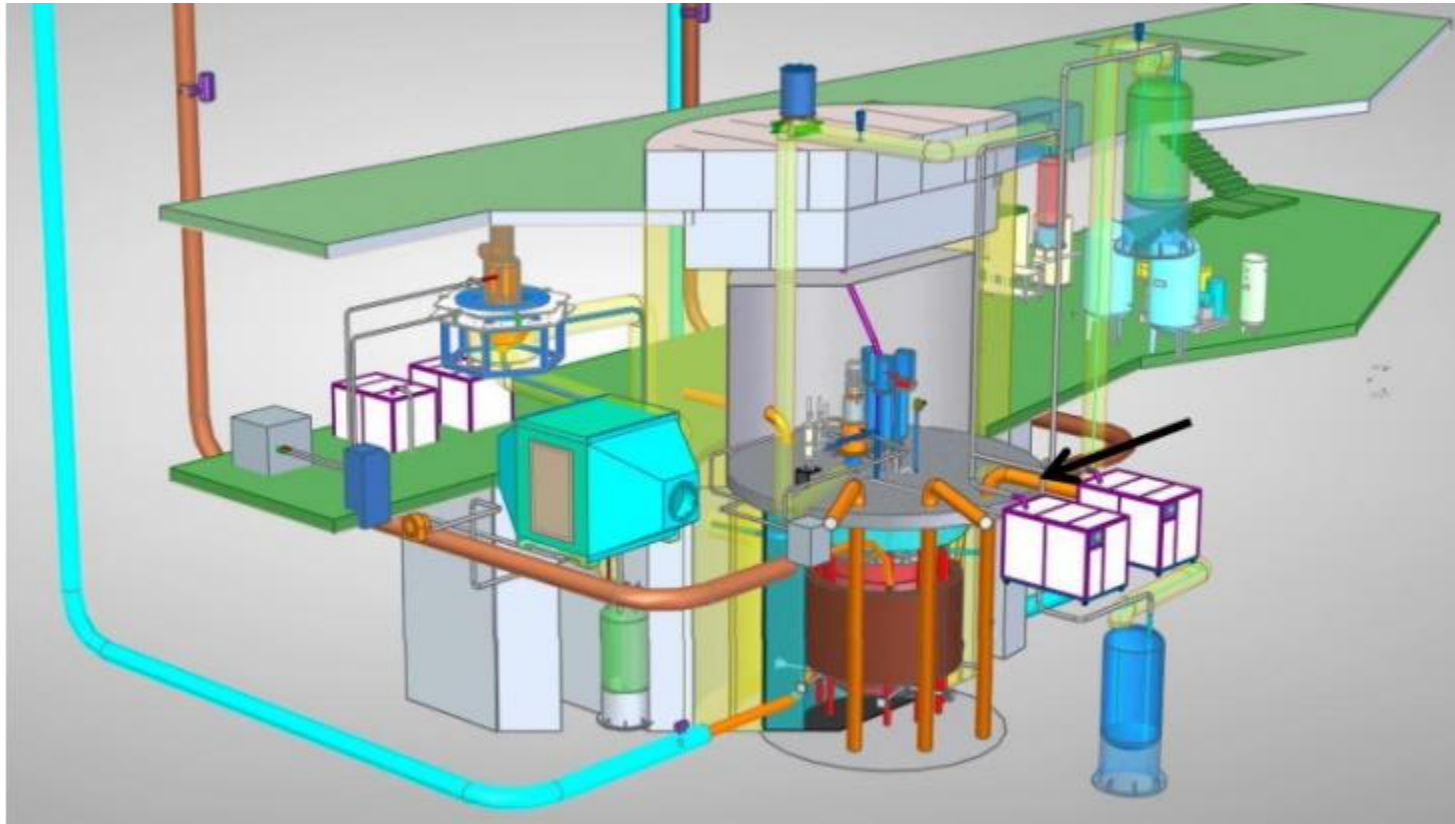
Kontinuierliche Entfernung gefährlicher Spaltprodukte → geringe Inventare, geringe radioaktive Freisetzungen

Kontinuierliche Brennstoffzufuhr → keine Überschussreaktivität → keine unkontrollierte Kettenreaktion

Hoher Siedepunkt → hohe Betriebs- und Abschalttemperatur → einfache Notkühlung & guter Wirkungsgrad

Brennstoffvermischung → gleichmässiger Abbrand → gute Brennstoffauslastung

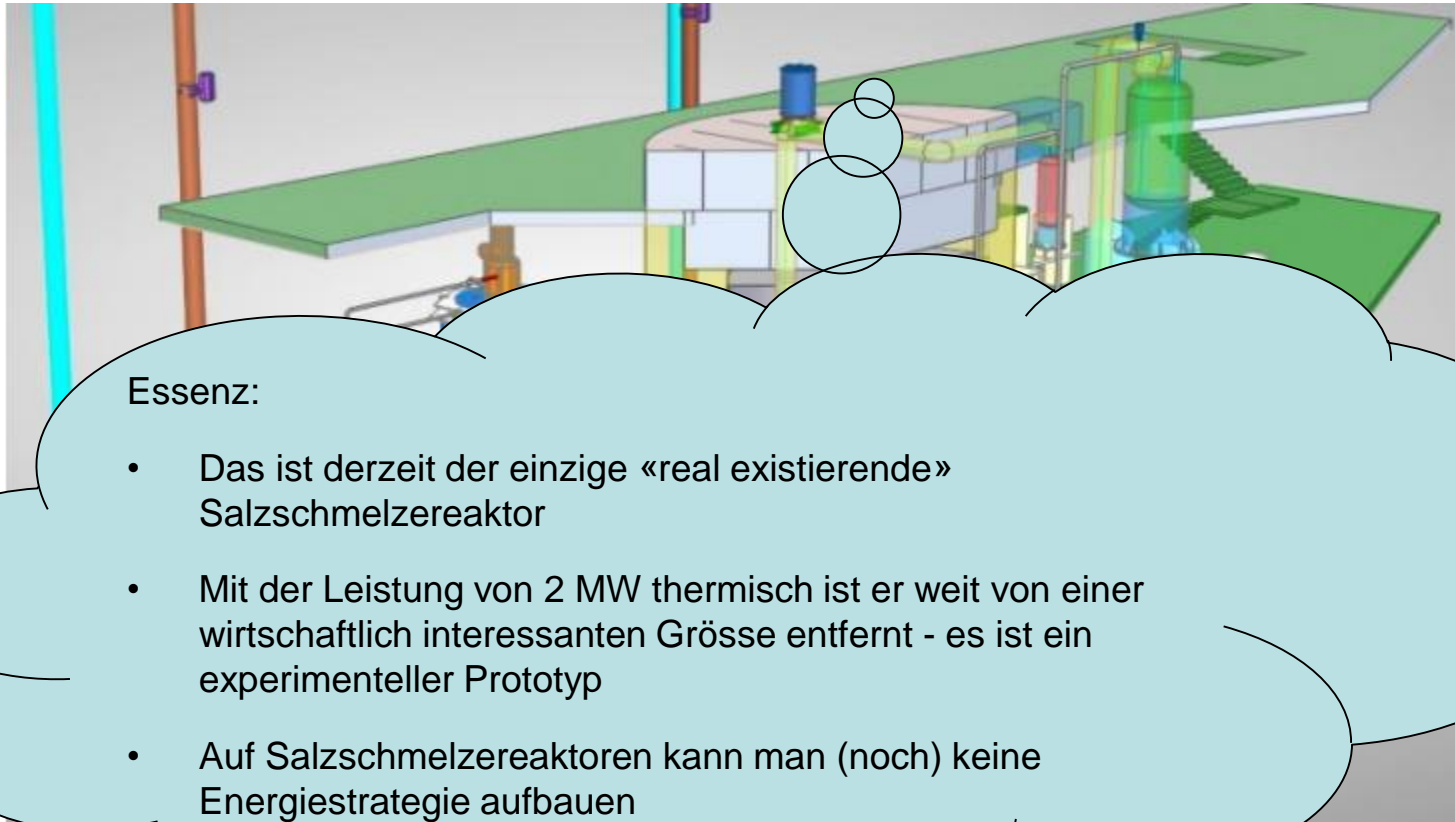
TMSR-LF1 - Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP)



- Leistung 2 MW_{th} → fertiggestellt 2021 (Nachfolger geplant für 2030 mit $373 \text{ MW}_{\text{th}}$)
- Salz Reaktor: Lithium-Berylliumfluorid (FLiBe) mit 99.95% Li-7 + UF_4 (19.75% U-235) + 50 kg Thorium
- Salz Kühlkreislauf: Lithium-Berylliumfluorid (FLiBe)
- Reaktorausstrittstemperatur: $650 \text{ }^\circ\text{C}$, Kühlmitteltemperatur: $580 \text{ }^\circ\text{C}$
- Mit erbrütetem U-233 später Übergang zu reinem Th/U3

Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP)
Chinese Academy of Sciences (CAS)

TMSR-LF1 - Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP)



Essenz:

- Das ist derzeit der einzige «real existierende» Salzschnmelzereaktor
- Mit der Leistung von 2 MW thermisch ist er weit von einer wirtschaftlich interessanten Grösse entfernt - es ist ein experimenteller Prototyp
- Auf Salzschnmelzereaktoren kann man (noch) keine Energiestrategie aufbauen

- Leistung 2 MW_{th} → 2030 mit 373 MW_{th})
- Salz Reaktor: Lithium-Berylliumfluorid (FLiBe) mit 99.95% Li-7 + UF₄ (19.75% U-235) + 50 kg Thorium
- Salz Kühlkreislauf: Lithium-Berylliumfluorid (FLiBe)
- Reaktoraustrittstemperatur: 650 °C, Kühlmitteltemperatur: 580 °C
- Mit erbrütetem U-233 später Übergang zu reinem Th/U3

Zoo der Salzschnmelzkonzepte

Canada:

Terrestrial Energy - Integral Molten Salt Reactor (IMSR) is an (SMR) 400MWth 190MWe, moderation graphite, low-enriched uranium compact and replaceable Core-unit. Decay heat removal by N₂. Pre-licensing in Canada

Denmark:

Copenhagen Atomics - MSR heavy water moderated, fluoride-based, thermal spectrum and autonomously controlled, D₂O cooled below 50 °C, 2nd version molten lithium-7 deuteride (7LiOD) moderator, thorium fuel + Pu for cycle start, --> thorium breeder. Stage: component testing.

Seaborg Technologies - compact molten salt reactor (CMSR). The CMSR, single salt, thermal MSR designed, on LEU. NaOH moderator. Once through core for 12 years. First version 250 MWth power and 100 MWe power.

France:

Various MSR projects like FHR, MOSART, MSFR, and TMSR / Theoretical studies - EU-funded Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor (SAMOFAR) project, in which several European research institutes and universities collaborate

Germany:

German Institute for Solid State Nuclear Physics in Berlin - dual fluid reactor - fast breeder lead-cooled MSR

India:

In 2015, MSR design as alternative path to thorium (India's three-stage nuclear programme)

Indonesia:

Thorcon TMSR-500 molten salt reactor, thorium-fueled nuclear reactors

Zoo der Salzschnmelzekonzepte (Fortsetzung)

Japan:
Fuji Molten Salt Reactor - similar to the Oak Ridge project. Hot containment. lack funding

Russia:
In 2020, Rosatom announced plans to build a 10 MWth FLiBe burner MSR. fueled by Pu and MA from VVER. Fluorides

United Kingdom
Moltex Energy - start

Essenz:

- Es gibt sehr viele Varianten und Entwickler von Salzschnmelzereaktoren
- Nur in einem Fall (TMSR-LF1) wird gegenwärtig ein Reaktor kleiner Leistung in Betrieb genommen.
- Alle anderen sind noch weit entfernt vom Bau eines Versuchsreaktors

United States
Idaho
of 10

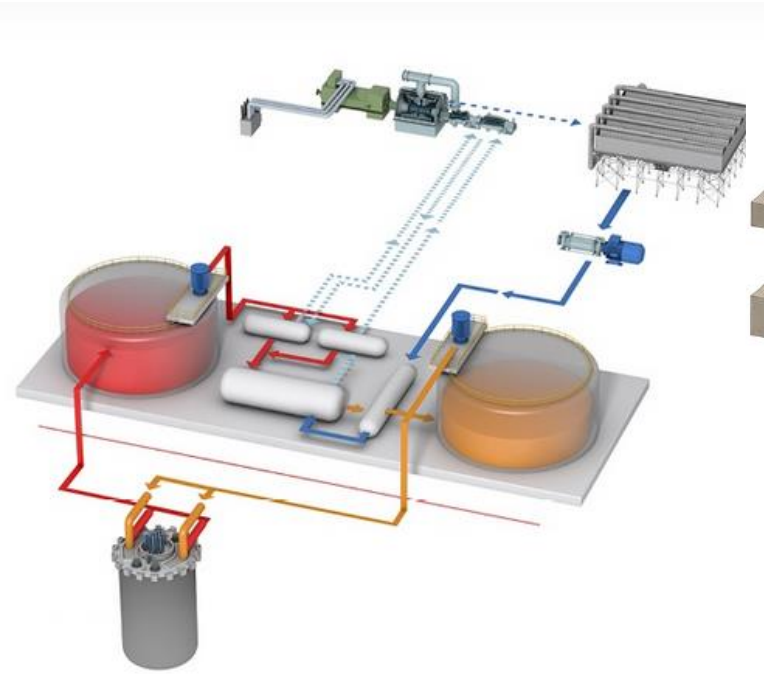
Flibe En
Transatomic Power

DoE - awarded Southern Company molten chloride fast reactor (MSR) - early British design, fast MSR at IRNL / Southern Company + TerraPower Molten Chloride Reactor Experiment

Kairos Power - TRISO-fueled, fluoride salt-cooled 50MWt test reactor at Oak Ridge, Tennessee

Abilene Christian University (ACU) has applied for a 1MWt molten salt research reactor (MSRR), criticality by December 2025

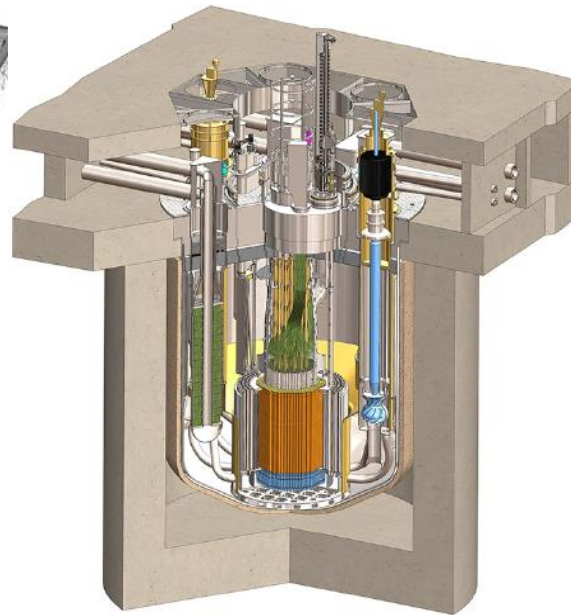
TerraPower



NATRIUM

Sodium Fast Reactor
Mit Hochtemperatur-
Energiespeicher auf
Salzschmelze-Basis

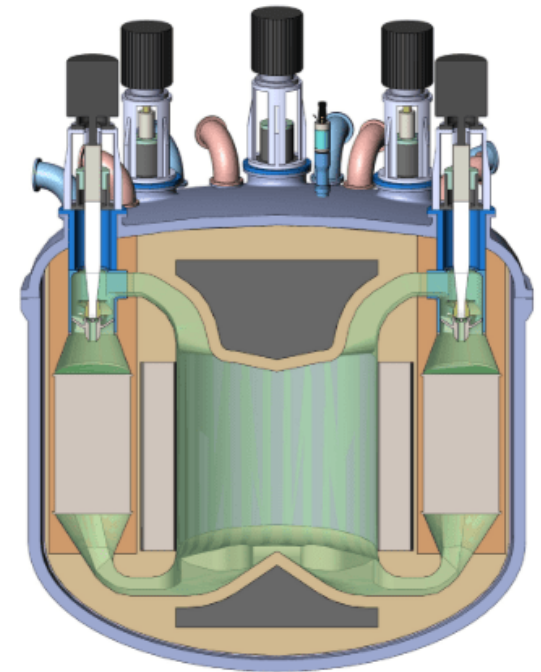
345 MW_{el} mit Spitzenlast von
500 MW_{el} für 5.5 Stunden



TWR

Travelling Wave Reactor

Betrieb für 10-30 Jahre
ohne Umladung



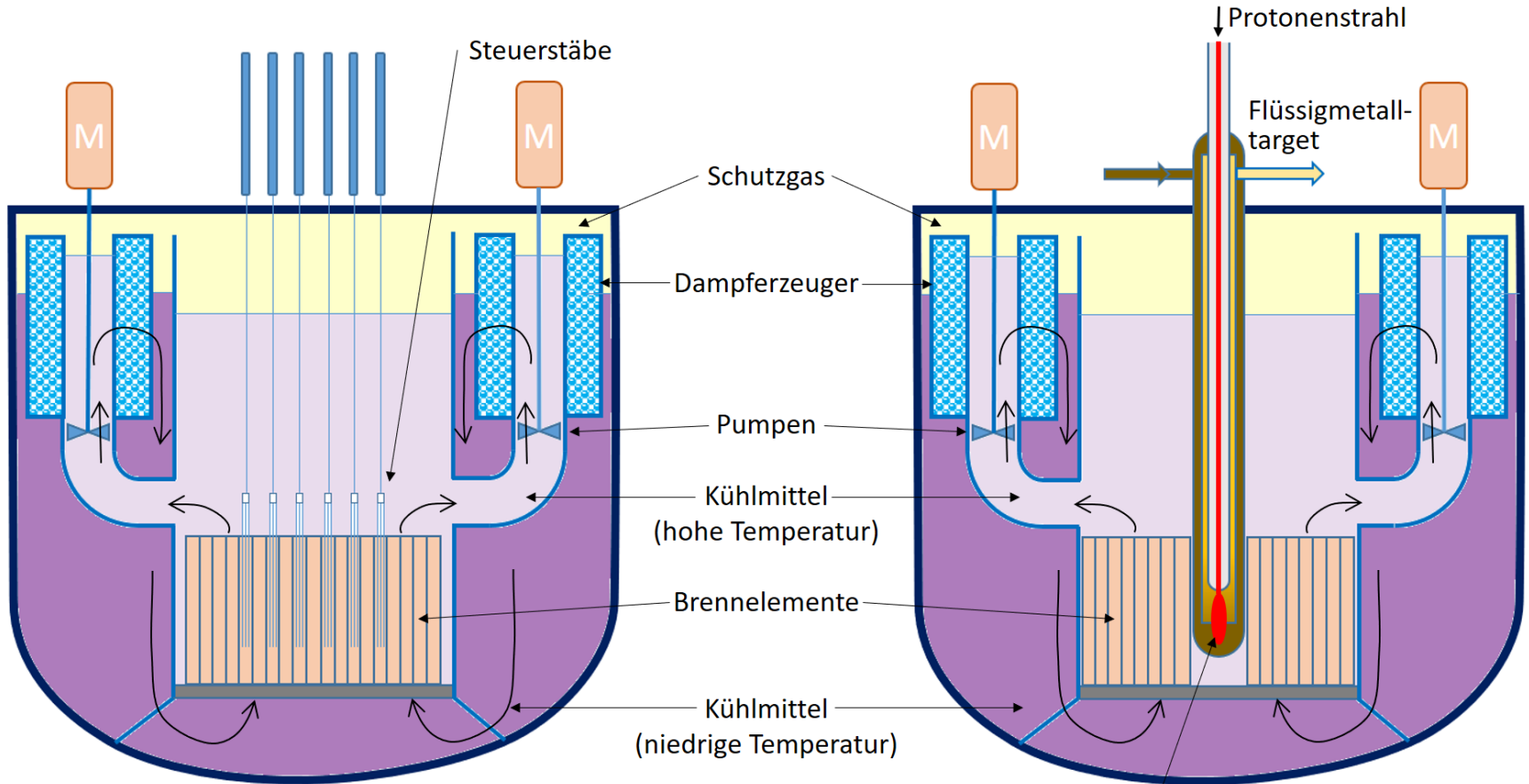
MCFR

Molten Chloride Fast Reactor

Flexibles Brennstoffregime
(U-238, U-nat, Pu-239, höhere
Aktinoide, Thorium...)

<https://www.terrapower.com/>

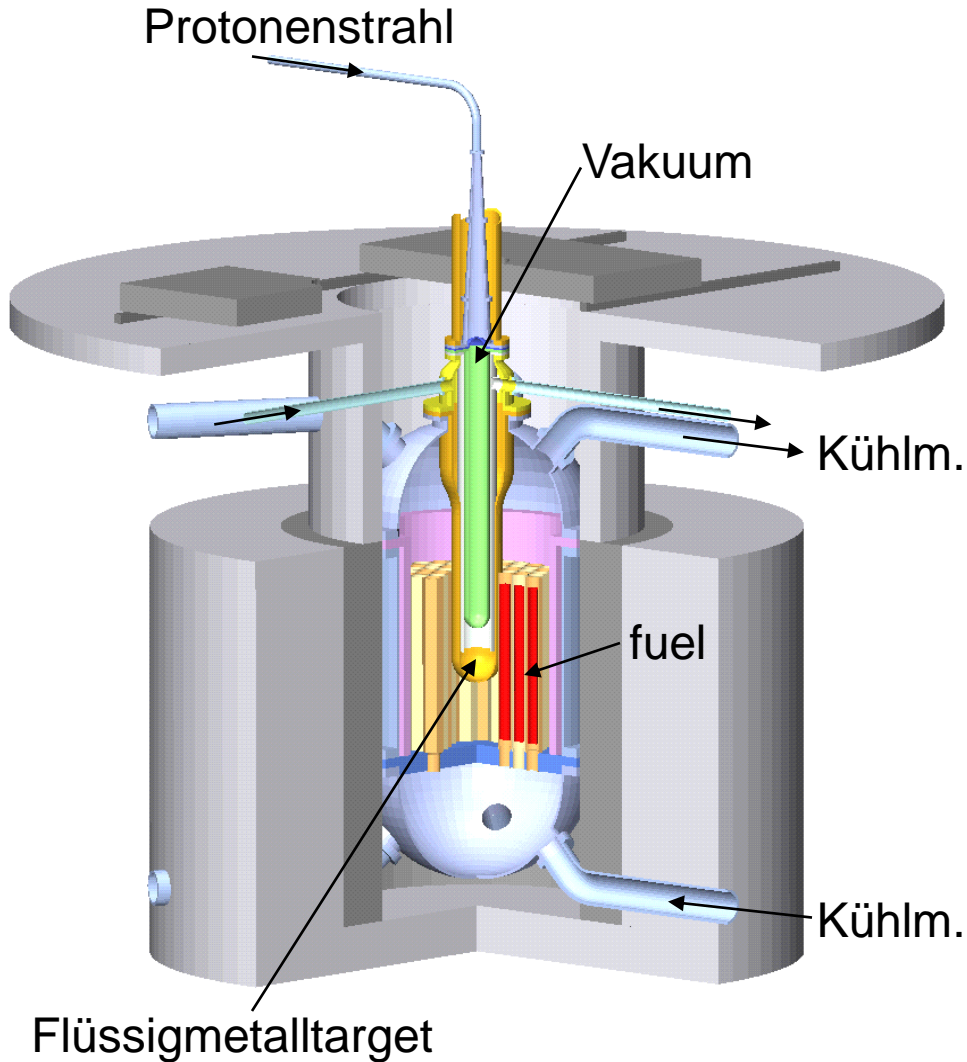
Bleigekühlte Reaktoren mit schnellen Neutronen



Reaktor mit selbsterhaltender Kettenreaktion

Reaktor getrieben von Spallationsneutronenquelle

Alternative: ADS = Accelerator Driven Systems



Kühlmittel: Blei-Wismut Eutektik

Target: Blei-Wismut Eutektik

Spektrum: Schnelle Neutronen

Neutronenquelle:

Spallation von schweren Kernen (Blei) durch Protonen hoher Energie

(Ausbeute ~20 Neutronen pro Proton)

Zweck: Effizienteste Transmutation langlebiger Transurane in einem Reaktor ohne selbsterhaltende Kettenreaktion

Nachteil: Hohe Kosten der Neutronen

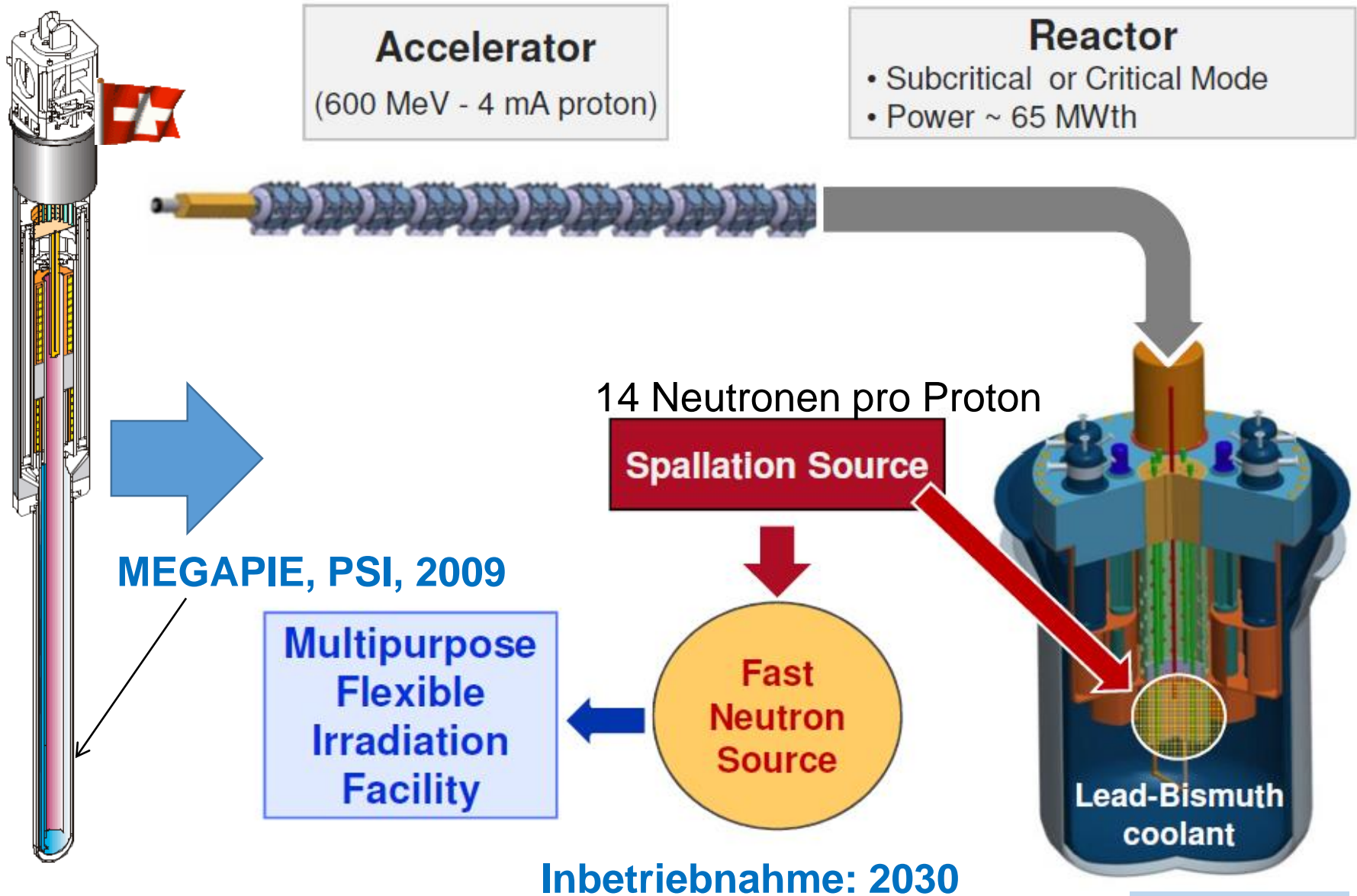
Kritikalitätsstörfälle sind ausgeschlossen

Sichere Nachkühlung ist dennoch immer notwendig

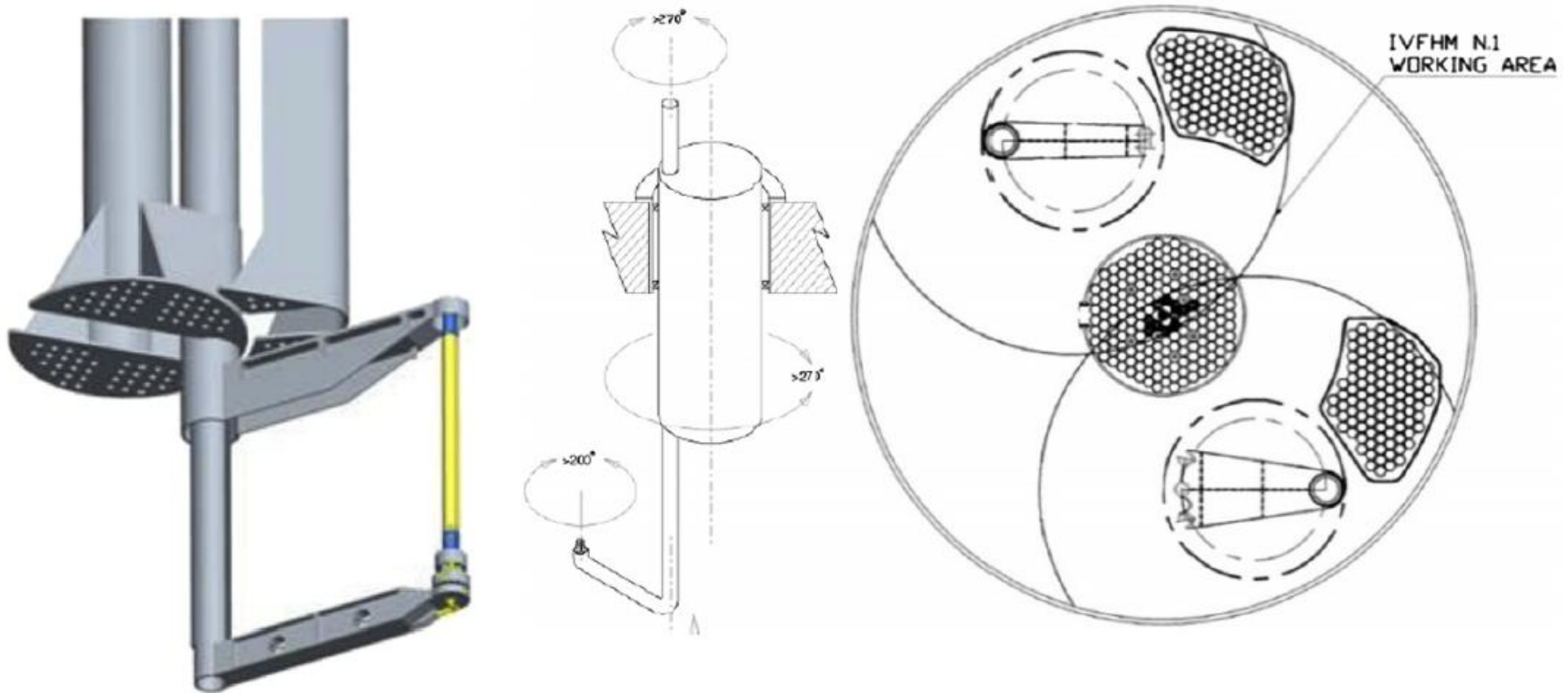
Neutronenanzahl: $n = \frac{\dot{S}_{n,\text{spallation}}}{(1 - k_{\text{eff}})} \cdot I \quad \dot{S}_{n,\text{spallation}} \approx 20 \cdot \dot{n}_p$

MYRRHA project (Mol, Belgium)

Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications



Umlademaschinerie von MYRRHA



Interessantes Detail: Brennstäbe sind leichter als das Kühlmittel Blei-Wismut.
Sie werden deshalb von unten in den Reaktorkern eingeladen

Engelen et al., Int. J. Hydrogen Energy, 40(2015) 15137-15147.
Abderrahim et al., Energy Conversion and Management 63 (2012) 4–10.

Thorium-Irrtümer

Thorium

- ❖ ist 500 x häufiger als spaltbares Uran ... aber nur 3 x häufiger als Pu aus U-238
... und noch weniger intensiv erkundet
- ❖ Nebenprodukt bei den Seltenen Erden ... Uran Nebenprodukt bei Kupfer, Phosphor
Nickel u.v.a.m.
... Konkurrenz: Riesige Lagerbestände von
abgereichertem Uran
- ❖ ist spaltbar ... muss erst in U-233 umgewandelt werden
- ❖ kann keine Kernschmelze machen ... Spaltprodukte sind nahezu die selben,
Nachzerfallswärme entsteht ebenso →
sichere Notkühlung ist unabdingbar
- ❖ keine durchgehende Kettenreaktion ... Reaktorkinetik wie bei U und Pu
- ❖ ist leichter zu verarbeiten ... U-233 (mit U-232) strahlt stark
- ❖ erzeugt viel weniger Abfall ... nur auf langen Zeitskalen (>500 Jahre)
- ❖ ist Proliferationsresistent ... erfolgreiche Kernwaffentests mit U-233
... leichter Zugang über Pa-233

Thorium-Irrtümer

Thorium

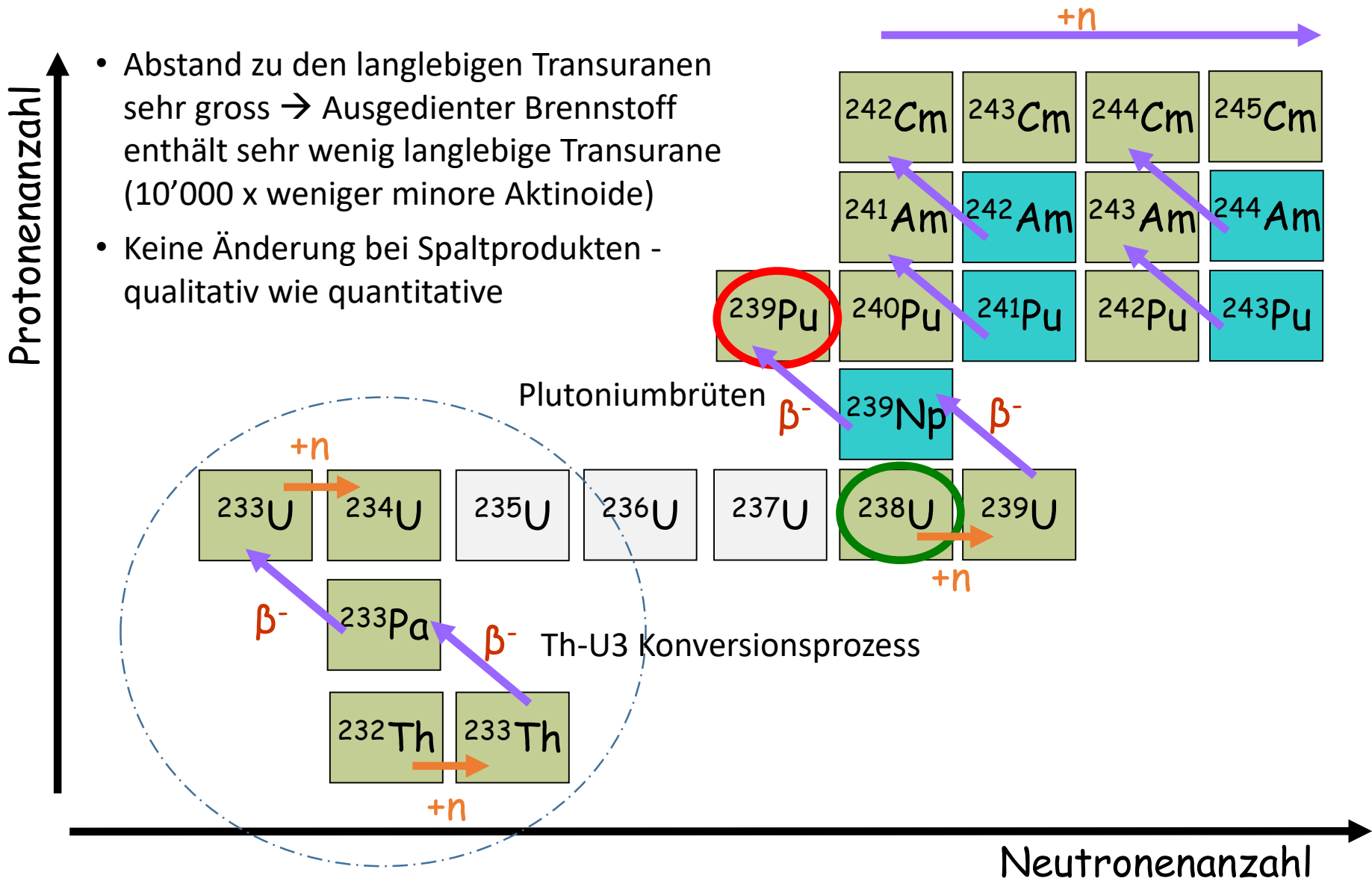
- ❖ ist 500 x häufiger als spaltbares Uran ... aber nur 3 x häufiger als Pu aus U-238
- ❖ Nebenprodukt bei der Selbsterwärmung von Thorium, Phosphor

Essenz:

- Thorium ist eine Alternative, aber sicher nicht der Traumstoff, für den es viele halten.
 - Der geschlossene Brennstoffkreislauf mit Uran und Plutonium hat eine vergleichbare Nachhaltigkeit
 - Nebenbei: Thorium / Uran 233 kann in vielen unterschiedlichen Reaktortypen zum Einsatz kommen, nicht nur in Salzschmelze-reaktoren. Der erste Reaktor, in dem grosstechnisch Thorium verwendet wurde, war die Anale in Shippingport, USA - ein Druckwasserreaktor
- ❖ erzeugt viel weniger radioaktive Abfälle (>500 Jahre)
 - ❖ ist Proliferationsresistent ... leichter Zugang über Pa-233

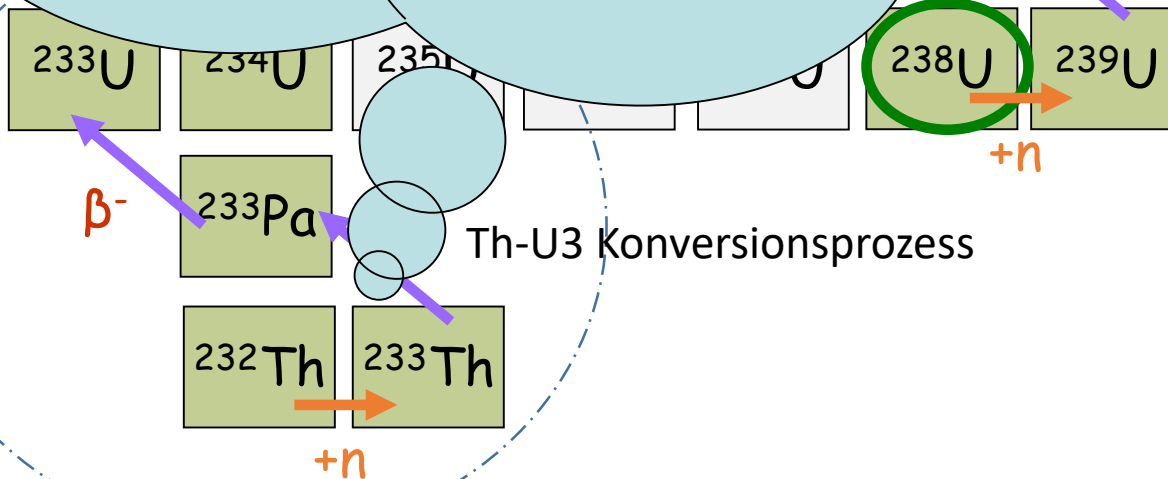
Attraktivität von Thorium (Th-232 → U-233) bei Entsorgung

- Abstand zu den langlebigen Transuranen sehr gross → Ausgedienter Brennstoff enthält sehr wenig langlebige Transurane (10'000 x weniger minore Aktinoide)
- Keine Änderung bei Spaltprodukten - qualitativ wie quantitative



Essenz:

- Der Brennstoffzyklus mit Thorium / Uran 233 hat Vor- und Nachteile (vorige Folie) - hier nun ein wichtiger **Vorteil**:
- Als Nebenprodukt entstehen nur kleine Mengen von langlebigen Transuranen, die als Alpha-Strahler nicht in die Nahrungsketten gelangen dürfen (10'000 x weniger, als bei Uran / Plutonium)
- Das verringert die notwendigen Einschlusszeiten für den hochaktiven Abfall auf unter 1000 Jahre, ohne das eine Abtrennung der Transuran-Isotope («minore Aktinoide») erfolgen muss (beim Uran / Plutonium-Zyklus geht es nicht ohne das)



Th-U3 Konversionsprozess

Neutronenanzahl

Uranmine Rössing / Namibia

Von Ikiwaner - Eigenes Werk, GFDL 1.2,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8132735>





Lithium Mine Mojave USA

Annual lithium demand will increase by factor 20 by 2050 due to electrification of individual mobility alone

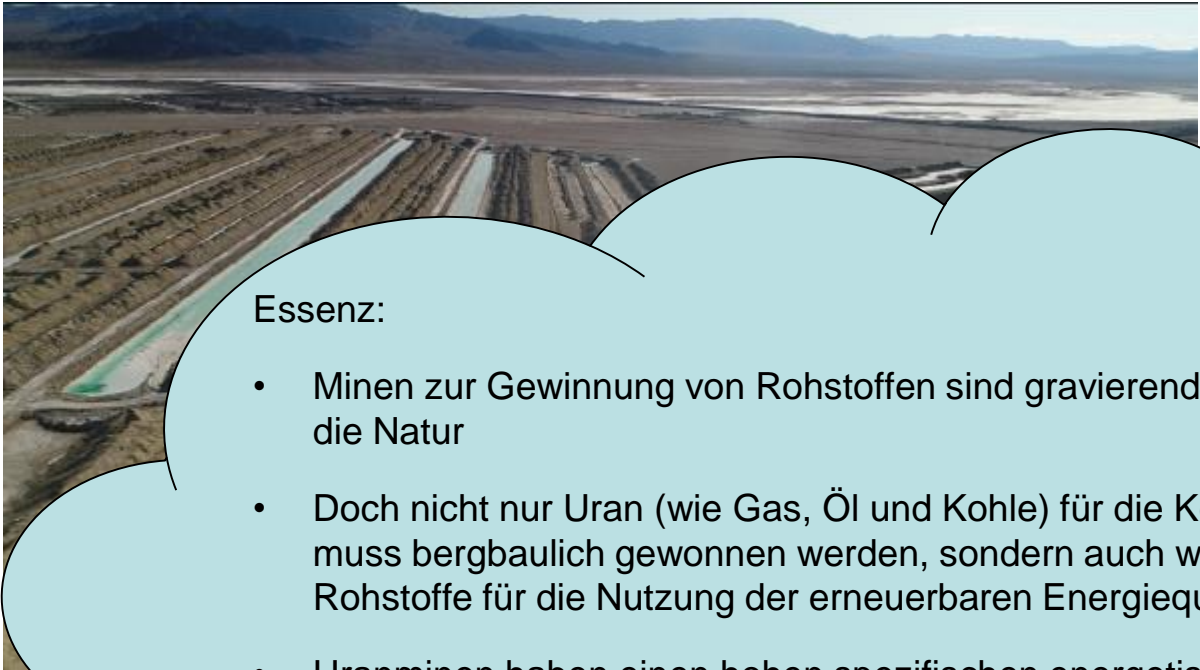
Lithium Report 2018, www.resource-capital.ch

Collahuasi Copper Mine in Chile

Photovoltaics require ~40 times more copper than nuclear power



<https://energyandmines.com/2015/11/these-10-mines-will-set-the-copper-price-for-the-next-decade/>



have USA

will
50
individual

Essenz:

- Minen zur Gewinnung von Rohstoffen sind gravierende Eingriffe in die Natur
- Doch nicht nur Uran (wie Gas, Öl und Kohle) für die Kernkraftwerke muss bergbaulich gewonnen werden, sondern auch wichtige Rohstoffe für die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen.
- Uranminen haben einen hohen spezifischen energetischen Output, sind also klein bezogen auf die gewinnbare Energiemenge.
- Mit Einführung von geschlossenen Brennstoffkreisläufen wird das Uran noch mehr als 100 mal besser ausgenutzt. Der Umwelteinfluss der Minen würde fast auf Null zurückgehen. Das ist eine veritable Zukunftsoption.

Lithium

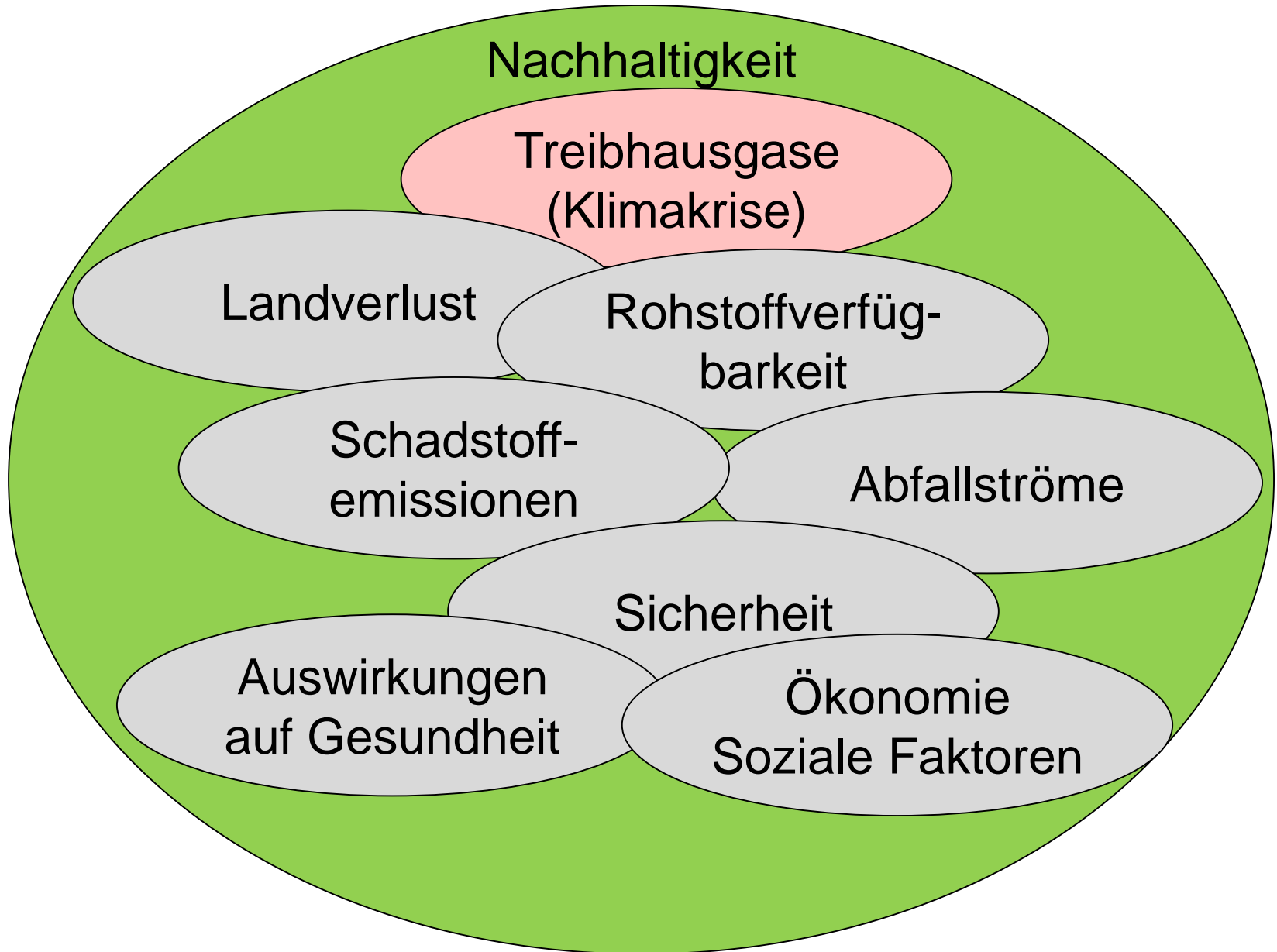
Colla

Photov
er than nuclear pow

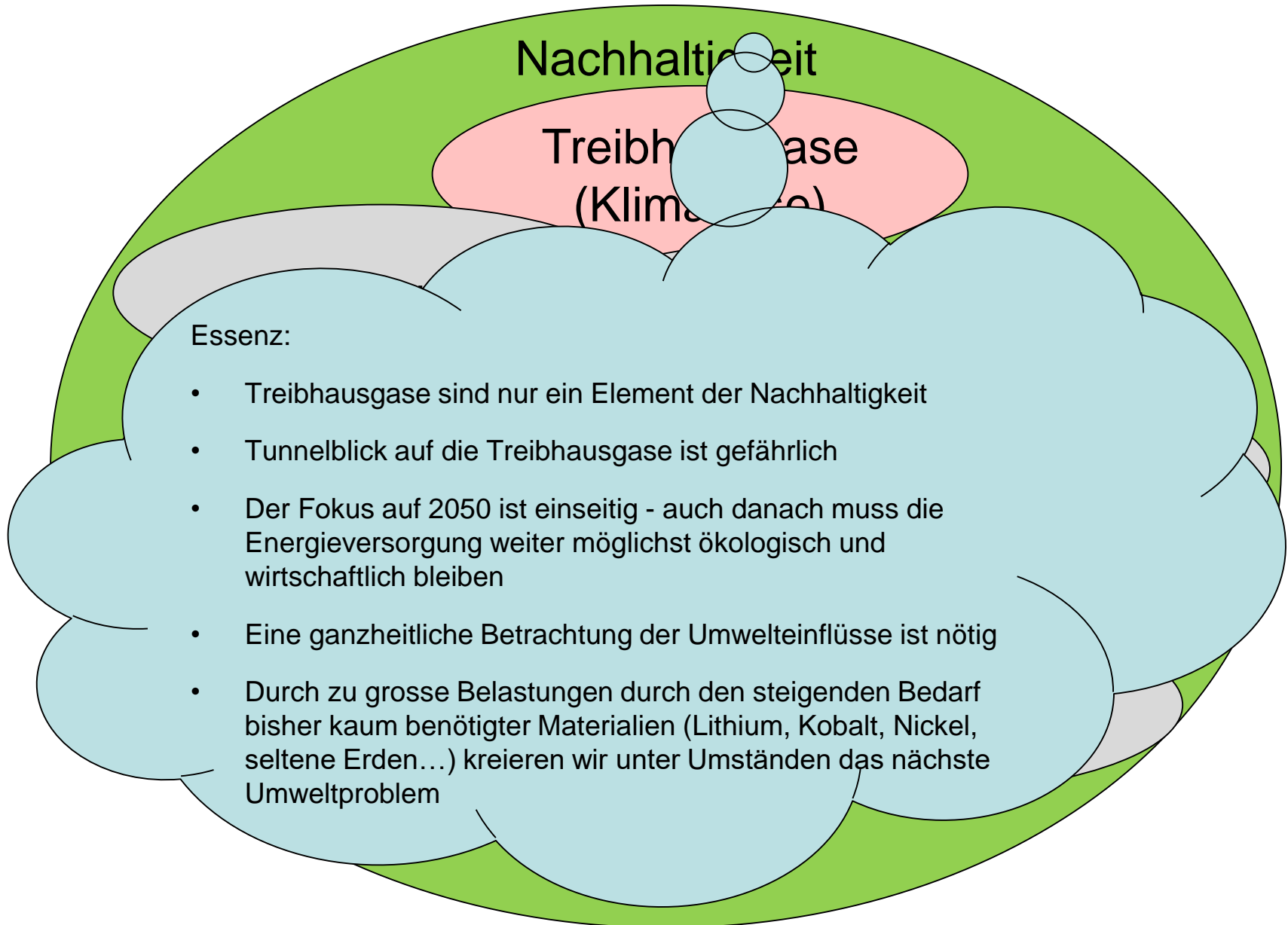


<https://energyandmines.com/2015/11/these-10-mines-will-set-the-copper-price-for-the-next-decade/>

Bitte kein Tunnelblick auf die CO₂-Reduktion (und auf die Ziellinie 2050)



Bitte kein Tunnelblick auf die CO₂-Reduktion (und auf die Ziellinie 2050)



Lebenszyklus

$$\text{Life Cycle Inventory} = \frac{\text{Reference Flow}}{\text{Functional Unit}}$$

$$\text{Life Cycle Impact} = \frac{\text{Environmental Impact Scores}}{\text{Functional Unit}}$$

bedarfsgerecht verfügbare kWh



Lebenszyklus

$$\text{Brennstoffbedarf, Abfälle, Umwelteinflüsse} = \frac{\text{Stoffströme}}{\text{Stromproduktion}}$$

$$\text{Umweltbelastungen im Lebenszyklus} = \frac{\text{Umwelteinfluss}}{\text{Stromproduktion}}$$

Lebenszyklus

Brennstoffbedarf, Abfälle, Umwelteinflüsse

$$= \frac{\text{Stoffströme}}{\text{Stromproduktion}}$$

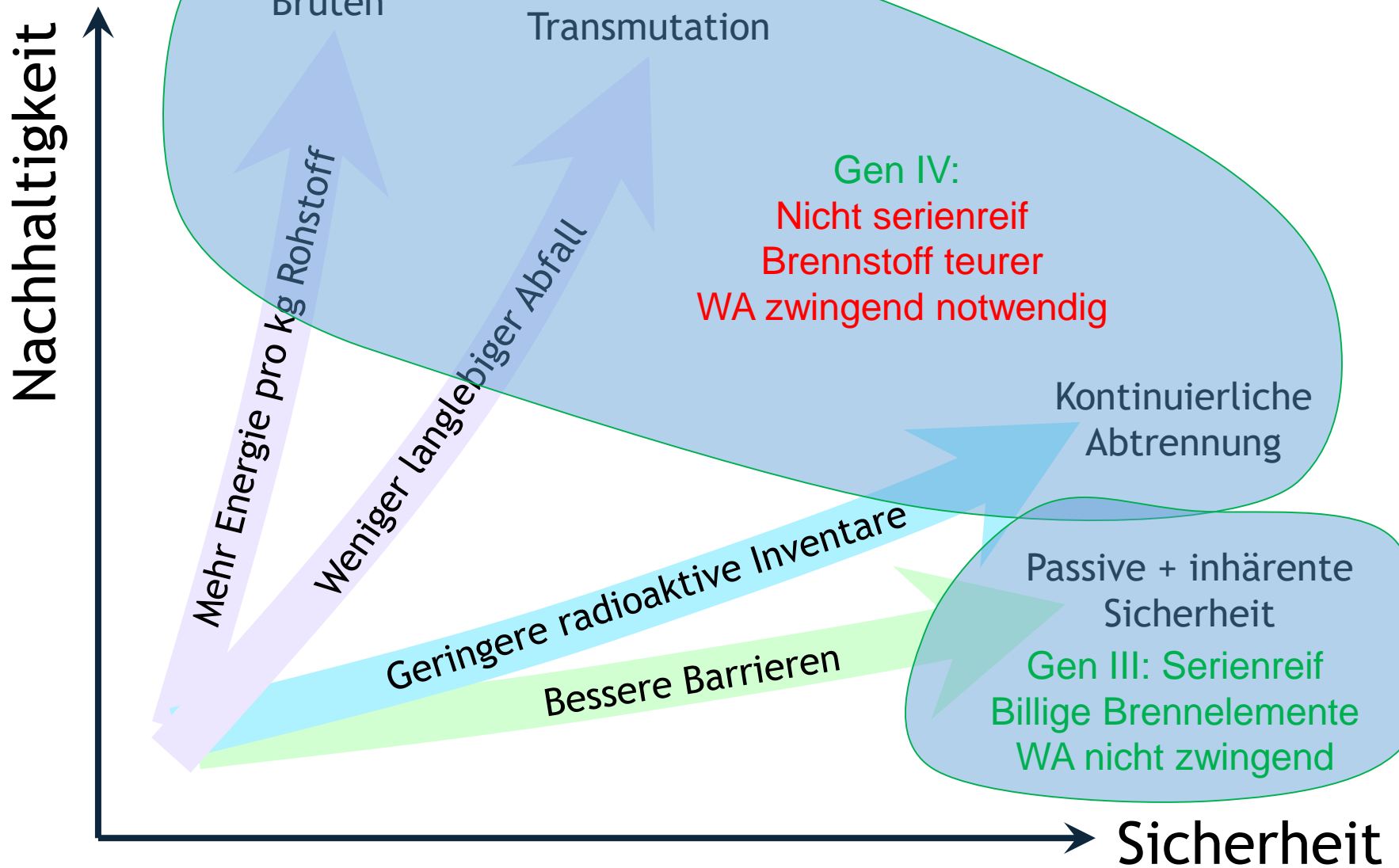
Umweltbelastungen im Lebenszyklus

$$= \frac{\text{Umwelteinfluss}}{\text{Stromproduktion}}$$

Kernenergie: Hohe Energiedichte → geringer Umwelteinfluss

Kernenergie ist nicht deshalb umweltfreundlich, weil sie ungefährliche Stoffströme nutzt, sondern mit minimen Stoffströmen viel Energie macht

Entwicklungspotentiale



WA = Wiederaufbereitung → politisches Verbot

Thank you for your attention!