



Neuartige Reaktorkonzepte: Nachhaltige Alleskönner?

Wolfgang Kröger

ETH Zürich - Scientific Advisor Chair of Entrepreneurial Risks

Jost Bürgi Symposium 1. Mai 2021, Lichtensteig TG

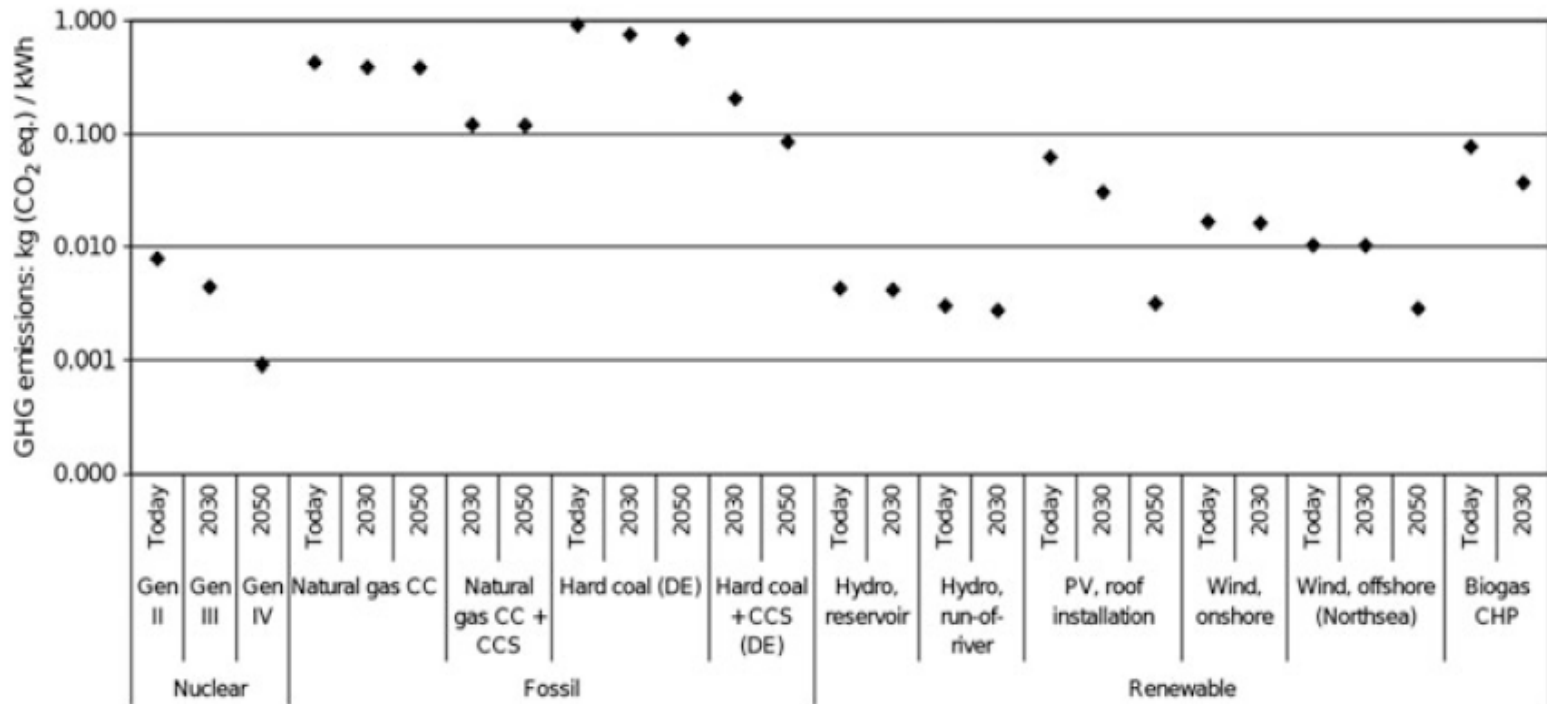
Faktenlage¹: Anhaltender Energiehunger – Gebot der Dekarbonisierung als Herkulesaufgabe

- Strombedarf global 27'005 TWh (33% höher als 1990, steigend um Faktor 2.5 bis 2050); zu **63%** gedeckt durch Kohle (36%), Gas und Öl (**fossil**), **26%** durch Sonne & Wind [^], Hydro (16%), Bio (**erneuerbar**), 11% Nuklear; mittlerer Verbrauch pro Kopf 3'070 kWh
- 15% der Weltbevölkerung beanspruchen 85% des Weltenergiebedarfs, 1.3 Mrd. Menschen ohne Stromzugang
- Energiesektor (Anteil 80%) emittiert etwa 45 Giga-Tonnen THG (CO₂ 80%), Stromanteil 40%; mittlerer THG Fussabdruck 6 Tonnen pro Person
- Die Schweiz (ohne Importe) trägt 0.09% zu globalen THG Emissionen bei, der Stromverbrauch pro Person liegt bei 7'500 kWh, der THG Fussabdruck bei 5.6 t (Stromanteil gering, Transportsektor als Sorgenkind)
- Erreichen Klimaziele, insbesondere das durch Netto-null Emissionen 2050 verschärfte Energiegesetz, als gewaltige Herausforderung

¹ Angaben pro Jahr, Stand Ende 2019, Hauptquelle BP Statistical Review

Nachhaltigkeit: Zusammenspiel der Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft

Beispiel: THG Emissionen heutiger und zukünftiger Technologien als ein Indikator der Ökologie (generell: Ressourcenverbrauch)



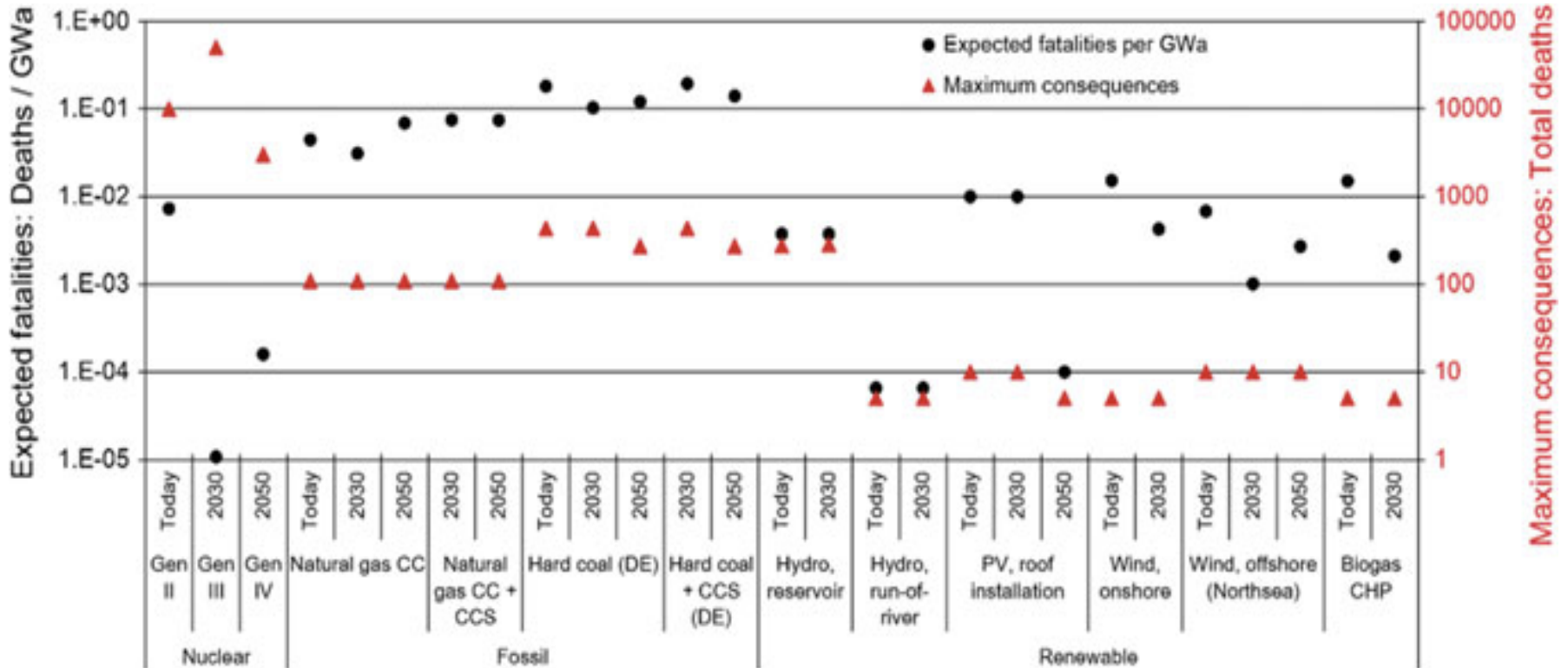
(Hirschberg & Burgherr 2015)

Eckdaten der Kernenergienutzung (Ende 2020)

- **441 Einheiten in Betrieb** in 33 Ländern, installierte Leistung 392.5 GWe; Anstieg von 84 (1970) auf 420 (1989); jährlich ca. 11'500 tHM (abgebrannte Brennelemente) entladen
- **54 Einheiten in Bau** (davon in PRC 14, RUS 3, IND 7), total 56.8 GWe; VAE, BY, TR als Neueinsteiger, einige Länder mit Ausstiegsbeschlüssen
- EPR in PRC (Taishan 1,2) mit Bauzeitverzug (3-4 a) und Kostensteigerung (?) in Betrieb genommen, FIN und F mit deren „Sprengung“
- Mehr als **18'000 Reaktor-Jahre** als kumulierte **Betriebserfahrung**
- Zwei Unfälle auf höchster INES-Stufe 7 (Tschernobyl, Fukushima 1), einer (TMI) auf Stufe 5, viele Ereignisse niedriger Klassierung
- **Schwere Unfälle** keine nukleare Singularität (Bhopal: 3'787 Tote, 3'900 Schwerverletzte), aber Furcht vor Strahlen-Spätschäden, verstärkt durch lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwellwert

Nachhaltigkeit: Zusammenspiel der Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft

Beispiel: Normierte Todesfallraten und maximale Konsequenzen schwerer Unfälle als Indikator



Was spricht für und gegen die Kernkraft?

- Hohe Energiedichte – geringe Materialflüsse, geringer Platzbedarf
Uran in Brutreaktoren (80'620'000 MJ/kg) 1.7 Millionen mal höher als Erdgas (47.1)/ Wasserstoff (Speicher, 120.2)
Wind < 150 bis > 350, Sonne 165 (Tagesmittel weltweit), je W/m²
(Windpark mit Peak-Leistung 1.2 GW benötigt etwa 400 Windräder, rd. 5 km² Fläche)
- Hoher Nutzungsgrad - Anteil Vollaststunden (für Deutschland)
Wind 13% (onshore) - 38% (offshore), Sonne 11.5%, Kernkraftwerke 83%
- Faktische Vorteile, aber Uran-Spaltungsprozess mit Herausforderungen:
 - mehr Neutronen produziert als verbraucht: Leistungsexkursionen vermeiden
 - hohes Spaltproduktinventar: Nachwärmeabfuhr und Einschluss notwendig
 - Bildung waffentauglicher (Pu), extrem langlebiger Transurane (Aktiniden) per Neutroneneinfang: Waste Management Programme erforderlich

Was spricht gegen die heutige Nutzungsform?

- Schlechte Nutzung begrenzter Brennstoffe (Uran, 1/3 Abfall), geringer thermischer Wirkungsgrad (2/3 Abwärme), extrem langlebige Spaltprodukte und Aktiniden (unvorstellbar lange „Hütezeiten“)
- Mangel an gesellschaftlicher Akzeptanz (Potential seltener, aber furchterregender Unfälle, ungelöste Entsorgung, Proliferationsrisiko)
- Angezweifelte wirtschaftliche Attraktivität (lange Bauzeiten, hohe Baukosten, Unsicherheiten), schwindendes Know-how in Europa
- Die Kernenergie muss weiterentwickelt werden, um (Akzeptanz)-Barrieren gegen ihre zukünftige Nutzung zu überwinden und bestehende Probleme lösen zu helfen¹

¹ Sornette, Kröger, Wheatley, New Ways and Needs for Exploiting Nuclear Energy, Springer 2019

Notwendigkeit neuartiger Reaktorkonzepte

- Energiestrategien sollten Gebot der Nachhaltigkeit/ Dekarbonisierung folgen und auf „Erneuerbare“ setzen, aber auch Versorgungssicherheit beachten - über Diversität der Energieträger und Importunabhängigkeit.
- Die Kernenergie gilt als einsetzbare Option in vielen Ländern, ist oft mit überrissenen Erwartungen konfrontiert (bspw. „Null-Risiko“).
- Ziele ihrer Weiterentwicklung zur „grünen Kernenergie“ enthalten
 - ✓ weiter verschärfte Sicherheitsanforderungen, die die Angst vor katastrophalen Unfällen nehmen;
 - ✓ Minderung der Empfindlichkeit gegenüber menschlichen Fehlern und gesellschaftlicher Instabilität;
 - ✓ Entspannung der Endlagerproblematik und schonenderen Umgang mit Ressourcen.

Weiter verschärfte Sicherheitsanforderungen

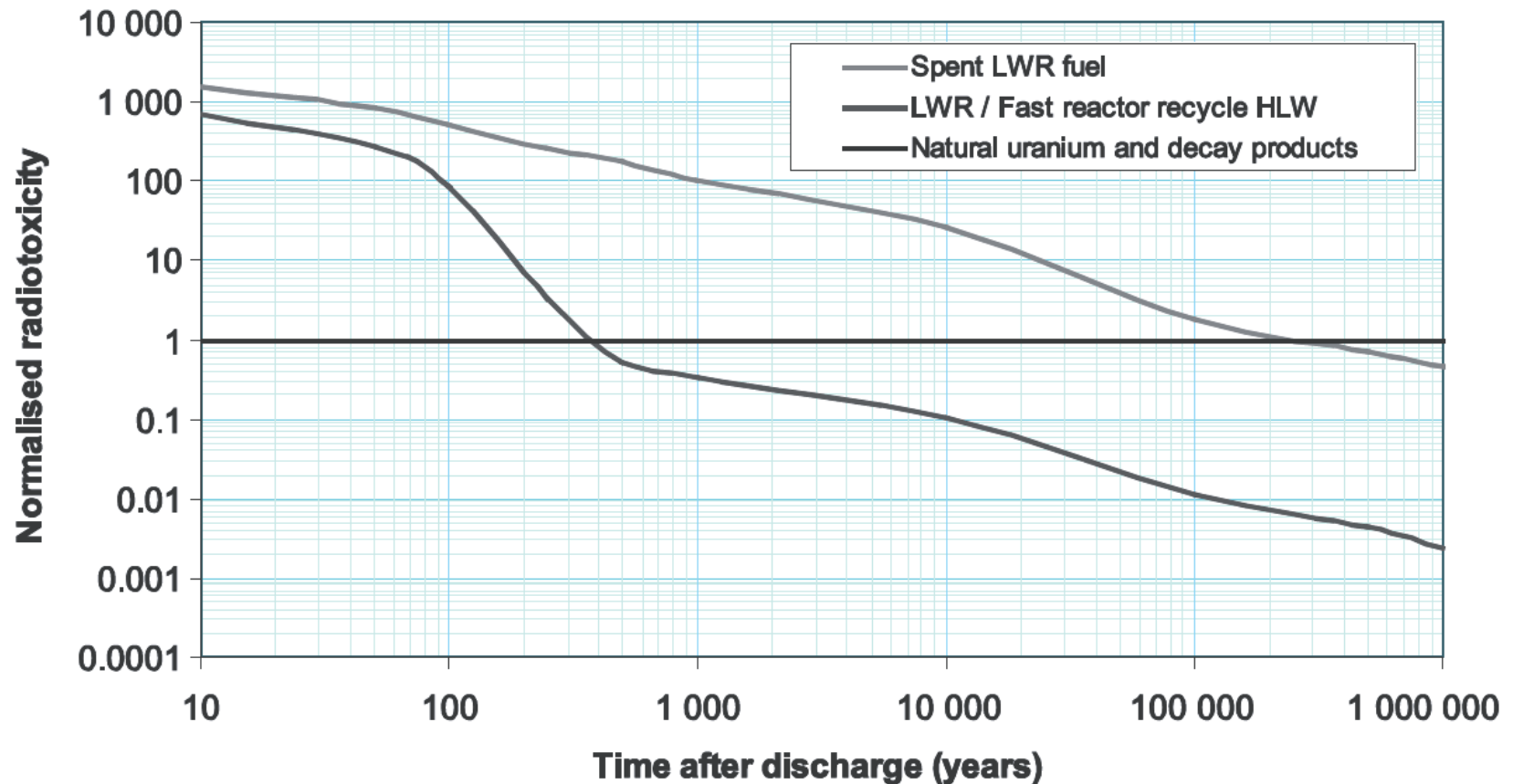
- Ausschluss gravierender Situationen/Anlagenzustände (geringe Wahrscheinlichkeiten nicht länger als „Deckmäntelchen“) durch:
 - ✓ Eliminierung von Reaktivitätsstörfällen (Leistungsexkursionen) mittels physikalischer Kernausslegung
 - ✓ Robustheit gegen Verlust der Kernkühlung (Kernschmelzen) per Ersatz aktiver Systeme (Pumpen, Ventile) und notwendiger Operateur-Eingriffe durch innewohnende Eigenschaften (z.B. hohe Wärmekapazität) und/oder passive Systeme (ohne Ansteuerung, äussere Energiezufuhr)
 - ✓ Vermeidung/Verbrennung extrem langlebiger Radioisotope (Aktiniden) durch entsprechende Brennstoffe, Brennstoffzyklen samt zugehöriger Reaktoren (Verkürzung Endlager-Hütezeiten)
 - ✓ Stärkung intrinsischer Proliferationsresistenz (z.B. niedrige Anreicherung)

Reaktorkonzepte der nächsten Generation: „Spielsteine“

- Kühlmittel – Flüssigmetalle wie Natrium und Blei-Wismut, Salzschnmelze oder Gas (He) anstatt Wasser¹
- Neutronenspektrum – von schnell (nicht abgebremst) bis thermisch
- Selbsterhaltend kritisch oder Beschleuniger-getrieben unterkritisch
- Ausgelegt als Spaltstoff-(Uran/Thorium) Verbrenner oder Brüter, Aktinidenverbrenner
- Leistungsdichte (3 über 80 bis 290 MW/m³) Leistungsgrösse (1 600) bis kl< 300 MWe)
- Brennstoffzyklus offen (direkte Endlagerung) – teil/voll geschlossen (mit Wiederaufarbeitung)
- Brennstoff (metallisch – oxydisch), Brennstoffhüllen und Strukturmaterial (metallisch – keramisch)

¹ Anwendung in heutigen Leichtwasserreaktoren (insbesondere EPR) unterstrichen

Radiotoxizität abgebrannter Brennelemente ohne und mit Recycling (P&T) - bezogen auf Natururan



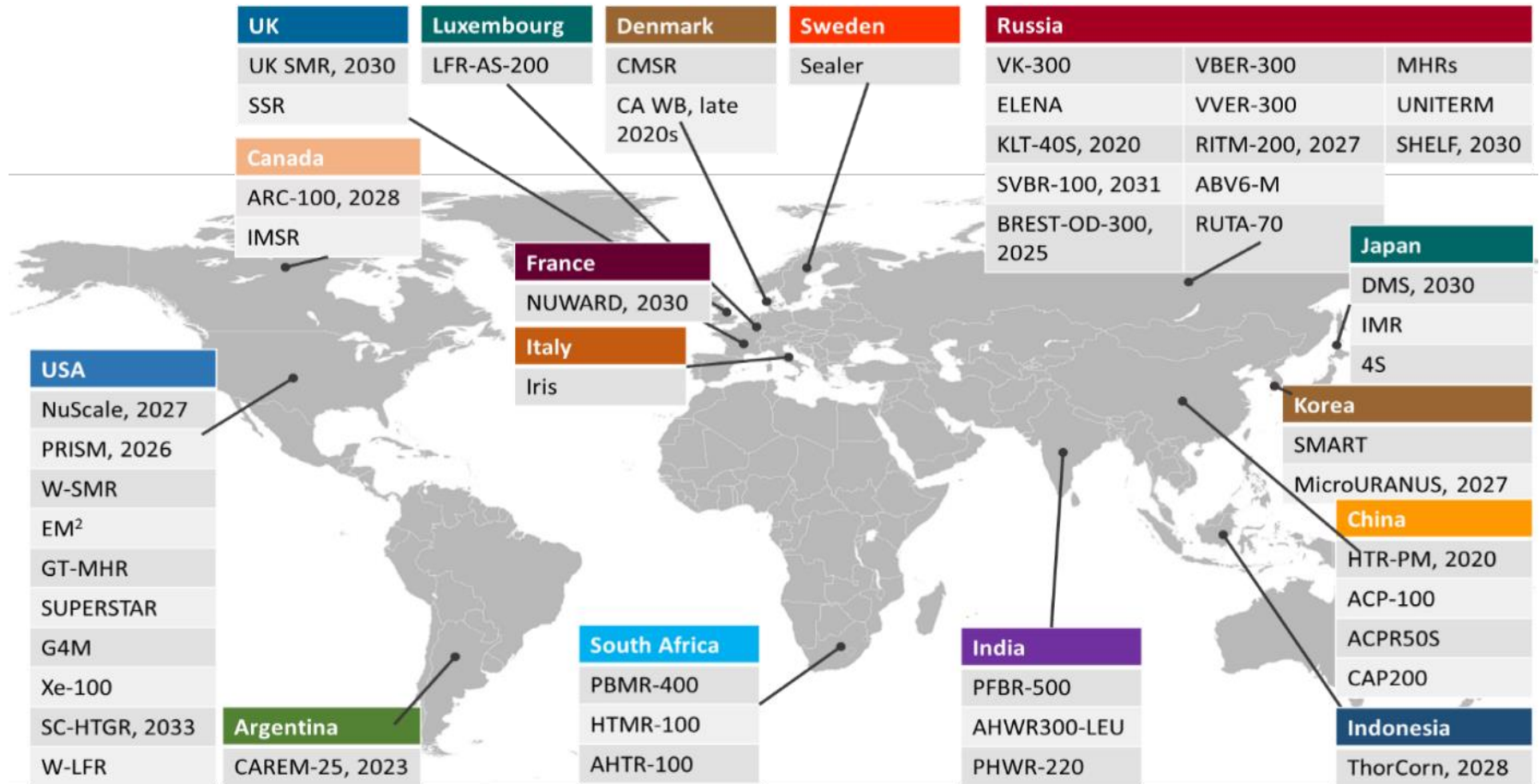
Thorium als Brennstoffalternative – im Vergleich zu Uran

- Th-232 kommt 3 bis 5 mal so häufig in Erdkruste vor, hat ähnlich hohe Energiedichte und streckt Brennstoffvorrat erheblich
- Ist selbst nicht spaltbar, generiert über Neutroneneinfang und Beta-Zerfälle spaltbares U-233, die gesamte längere Reaktionskette produziert weit weniger Aktiniden/langlebigen radioaktiven Abfall
- Alle Uran-Brennstoffzyklen sind möglich, braucht zu Anfang Spaltstoffe als „Samen“; die Technik ist noch nicht ausgereift
- Hat vorteilhafte physikalische Eigenschaften (höherer Schmelzpunkt, bessere Wärmeleitfähigkeit, kleinere Ausdehnungskoeffizienten)
- U-233 ist waffentauglich, kann über seinen Vorläufer Pa-233 leicht abgetrennt werden, was die Proliferationsresistenz schmälert

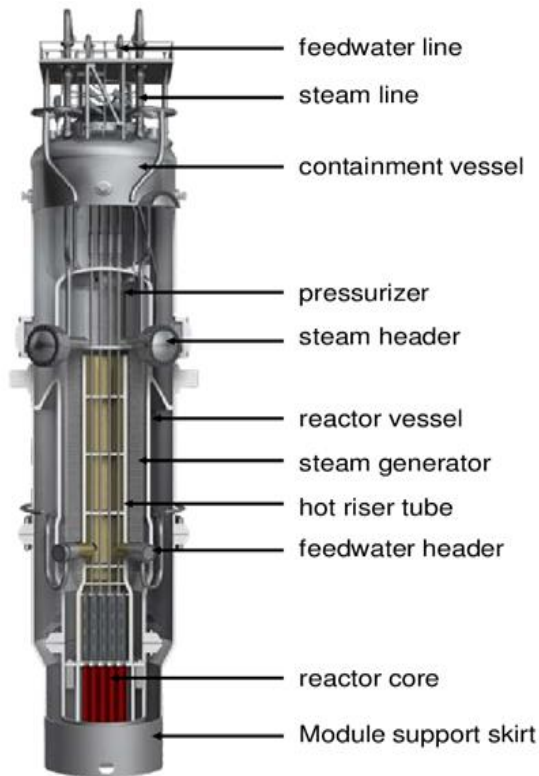
Eingehende Prüfung geeigneter Technologie- Kandidaten

- Neben der Weiterentwicklung von Reaktoren grosser Leistung (1600 MWe, „economy of scale“ folgend) erleben modulare Reaktoren kleiner bis mittlerer Leistung (bis zu 300 MWe, sog. SMR) eine Wiederbelebung:
 - Sind einfacher und anpassungsfähiger, eignen sich als Ersatz alter Kohlekraftwerke etwa gleicher Grösse und für neue Marktsektoren (H₂-Produktion),
 - zeichnen sich aus durch erhöhte Sicherheit aus aufgrund inhärenter Eigenschaften/passiver Systeme/grosser Sicherheitsmargen, brauchen keine äussere Energiezufuhr/schnelle Intervention,
 - Komponenten können in Fabriken seriell hergestellt, am Standort zusammengebaut oder dorthin komplett transportiert werden; sind leichter finanzierbar (earlier return of investment), wenngleich ihre Wirtschaftlichkeit bezweifelt wird.
- „Katastrophenfreie“ SMR sind weltweit in der Entwicklung und Projektierung, Wasser-gekühlte Konzepte dienen als Brückentechnologie, HTR-PM (2 x 211 MWe) steht kurz vor Inbetriebnahme in PRC.

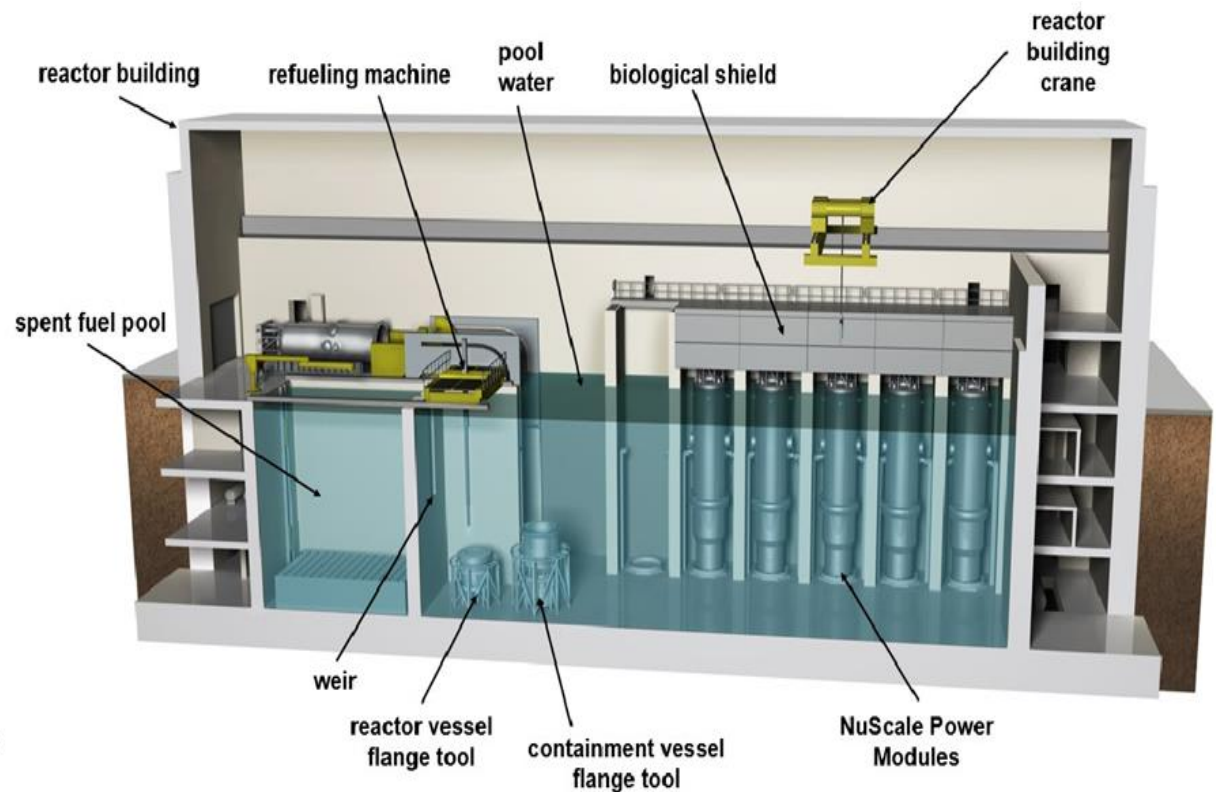
Entwicklung modular aufgebauter Reaktoren kleiner bis mittlerer Leistung (SMR)



NuScale Reaktorkonzept – a) Reaktormodul (77 Mwe), b) Anlagenschnitt mit 12 Modulen in einem Wasser-Kühlbecken



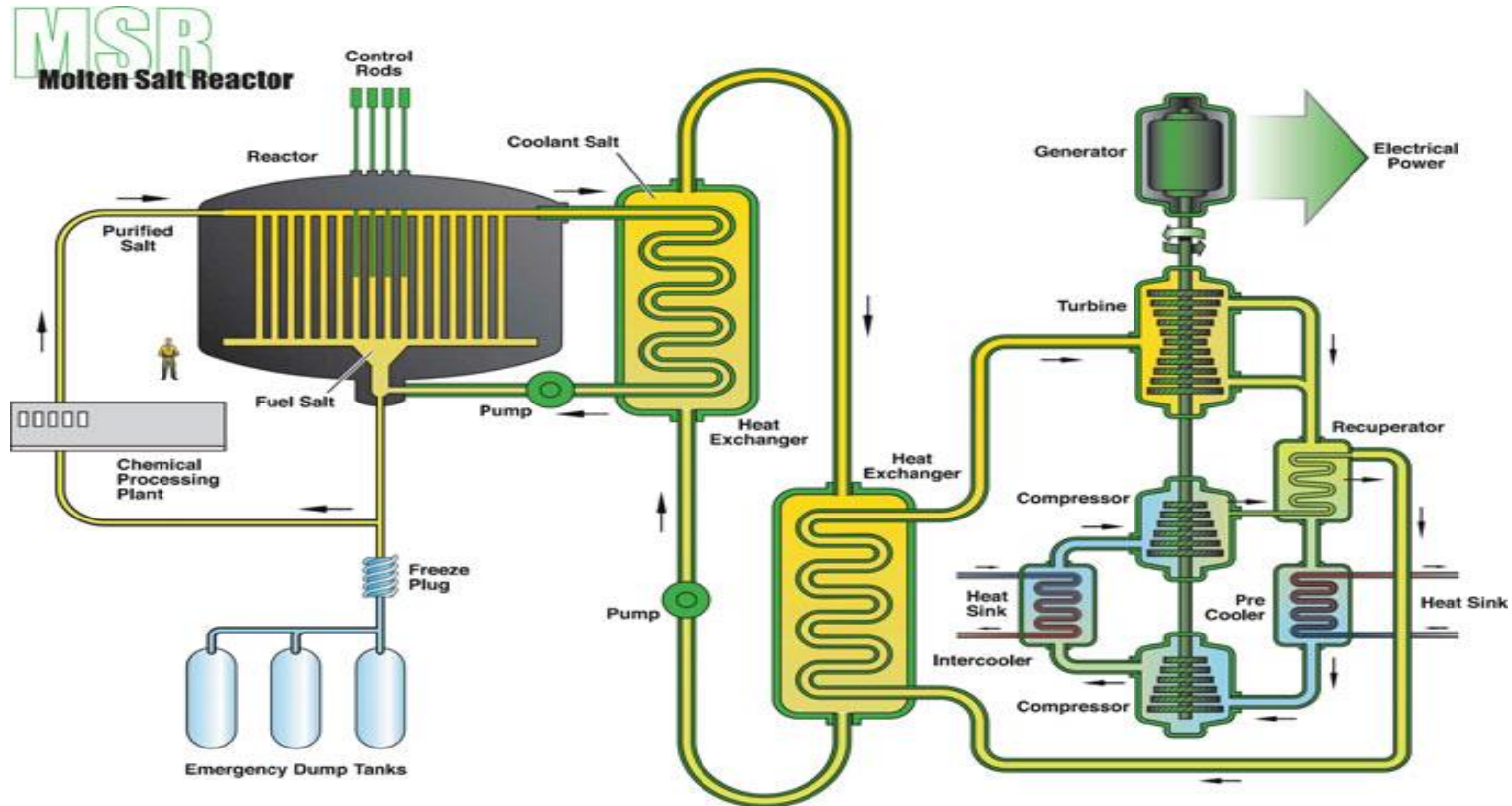
a)



b)

Exotische Konzepte: Reaktor mit in Salzschnmelze gelöstem Brennstoff und chemischer Online-Wiederaufarbeitung

Hoch flexibel hinsichtlich Brennstoffzusammensetzung und Zweck ("waste burner"); Leistungskontrolle über Brennstoffanteile, laufende Abtrennung flüchtiger Spaltprodukte; „overflow/dump system“ als Schlüssel-Sicherheitseinrichtung



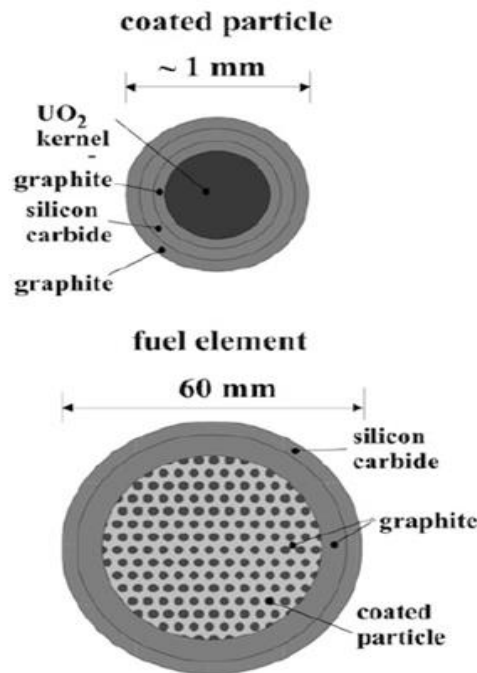
Bewertung der Kandidat-Technologien hinsichtlich Erfüllung der verschärften Sicherheitsanforderungen

EPR als Vergleich, Spektrum thermischer/schneller Neutronen, exzellent (5) bis schlecht (1)

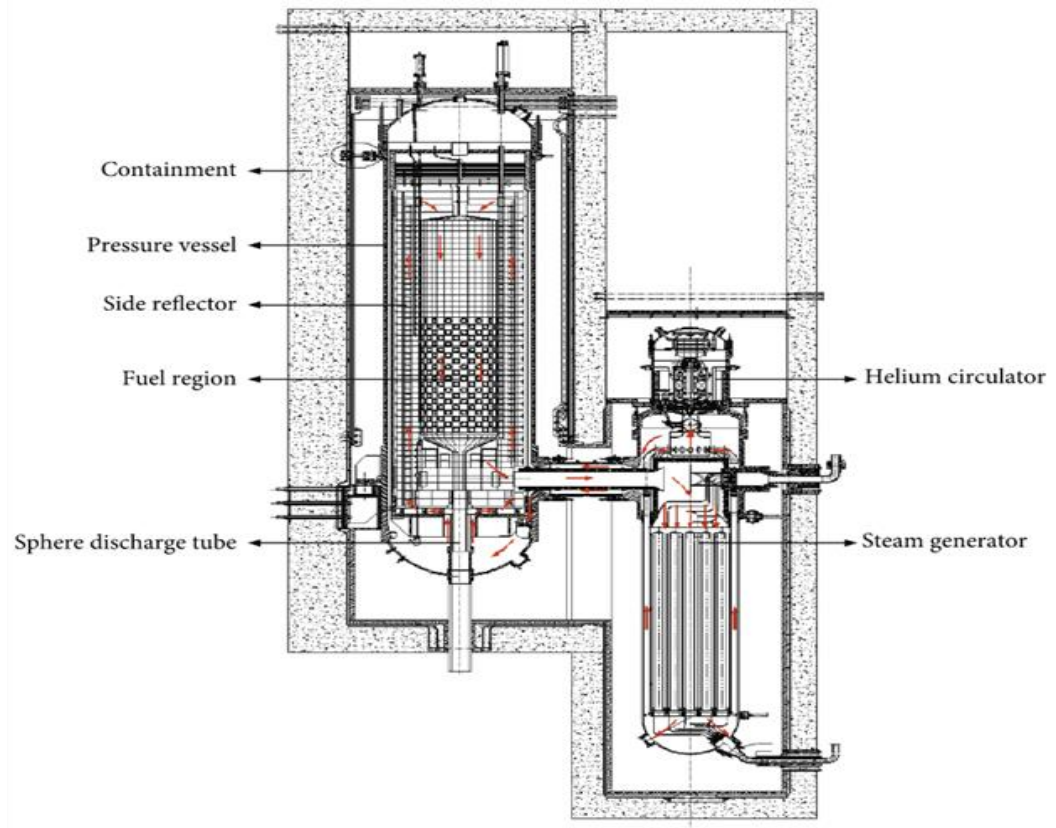
	Candidate reactor concepts – varying coolant, selected designs in brackets						
Key requirements	Water-thermal (large EPR)	Water-thermal (NuScale)	Sodium – fast (PRISM)	Molten Salt - fast/thermal (Seaborg)	Helium - thermal (HTR-PM)	Lead – fast (BREST-OD-300)	ADS (MYRRHA)
Elimination of Reactivity Induced Accidents (RIA)	4	4	2	1-2	5	2-3	5
Invulnerability against Loss of Active Core Cooling - avoid exceeding critical temperatures - avoid high fission product inventory - provide sufficient heat storage & transfer capacity	1 1 1 3	4 3 4 ¹ 5	3 ¹ n.a. 4 ¹ 5	4 n.a. 5 ² 4	5 5 4 ¹ 4	2-3 n.a. 4 ¹ 5	3 n.a. 4 ¹ 5
Structural Integrity - avoid high operating pressure [suitability of underground siting]	2 1 [2]	3 3 [4] ⁴	4 4 ³ [?]	4 5 [5] ⁴	5 4 [5] ⁴	4 4 ³ [4]	[4]
Use Non-chemically Reactive/ Non-Toxic Materials	4	4	1 ⁵	2 ⁵ (non-stable)	5	4	4
Avoid Long-lived Radioisotopes	1	1	4	5	4	5	5
Enhance Proliferation Resistance - avoid high enriched uranium	4 5	4 4	2 2 ⁶	2 2 ⁶	3 2-3	2 2 ⁶	2 2 ⁶

Gas-gekühlte Hochtemperaturreaktoren mit keramischen, beschichteten Brennstoffpartikeln (HTR Modul, 300 MWt)

Einzigartige inhärente Sicherheitseigenschaften, hohes Potential zur Erfüllung der verschärften Sicherheitsanforderungen; Neuland, angezweifelte Wirtschaftlichkeit



a)



b)

Schlussfolgerungen: Beinahe nachhaltige Alleskönner!

- Steigender Strombedarf auch in Industrieländern infolge neuer Einsatzfelder (e-Mobilität, Hauswärme, Digitalisierung)
- Verschärfter Kampf um Klimaziele; Ersatz fossiler Energie als Herkulesaufgabe
- Ausgebaute Nutzung von Wind- und Sonnenenergie richtungweisend, aber allein nicht ausreichend; Gefahr für Netzstabilität und Versorgungssicherheit
- CO₂-arme Kernenergie, oft konfrontiert mit überrissenen Erwartungen, weist hohes Potential für weitreichende Verbesserungen und Technologiesprünge auf
- Keines der analysierten neuen Reaktorkonzepte erfüllt die verschärften (Sicherheits-) Anforderungen schon vollständig; super-sichere SMR, insbesondere HTR-Modul, kommen dem am nächsten
- „Thermische“ Reaktoren eignen sich nicht als „waste burner“; Erhöhung der Proliferationsresistenz als eine der verbleibenden Aufgaben
- Stand der Entwicklung und Reifegrad der Konzepte unterschiedlich; Genehmigungsfähigkeit und baldige Baubarkeit einiger (NuScale, HTR-PM) gegeben

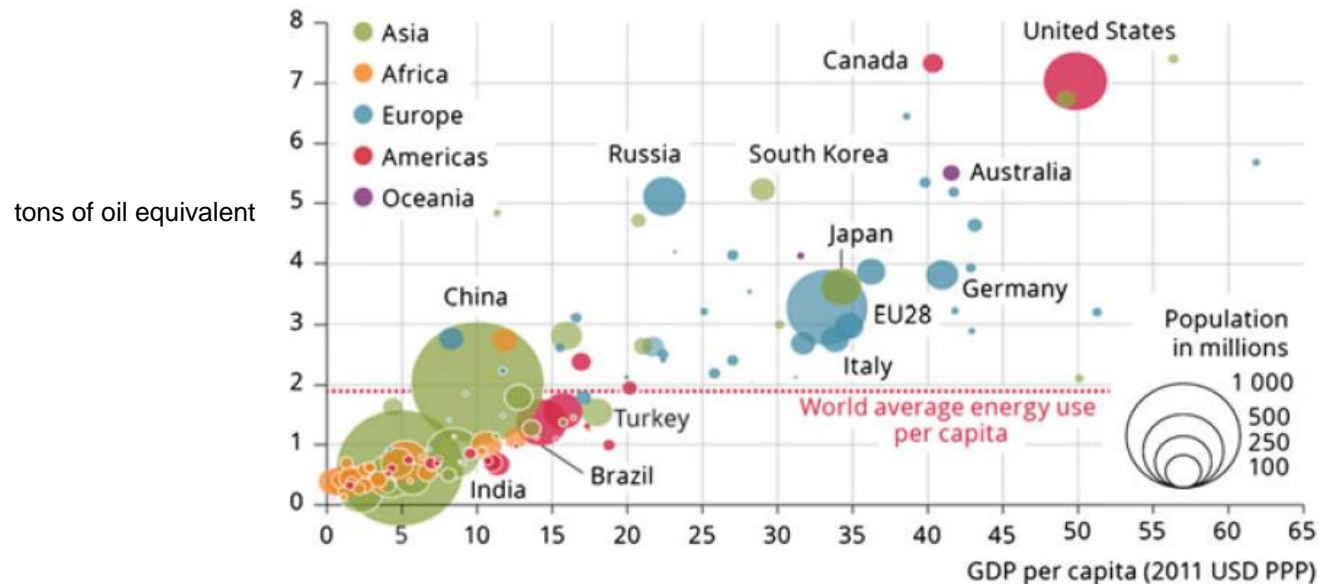


Dank für Ihre Aufmerksamkeit und allfällige Fragen

kroeger@ethz.ch

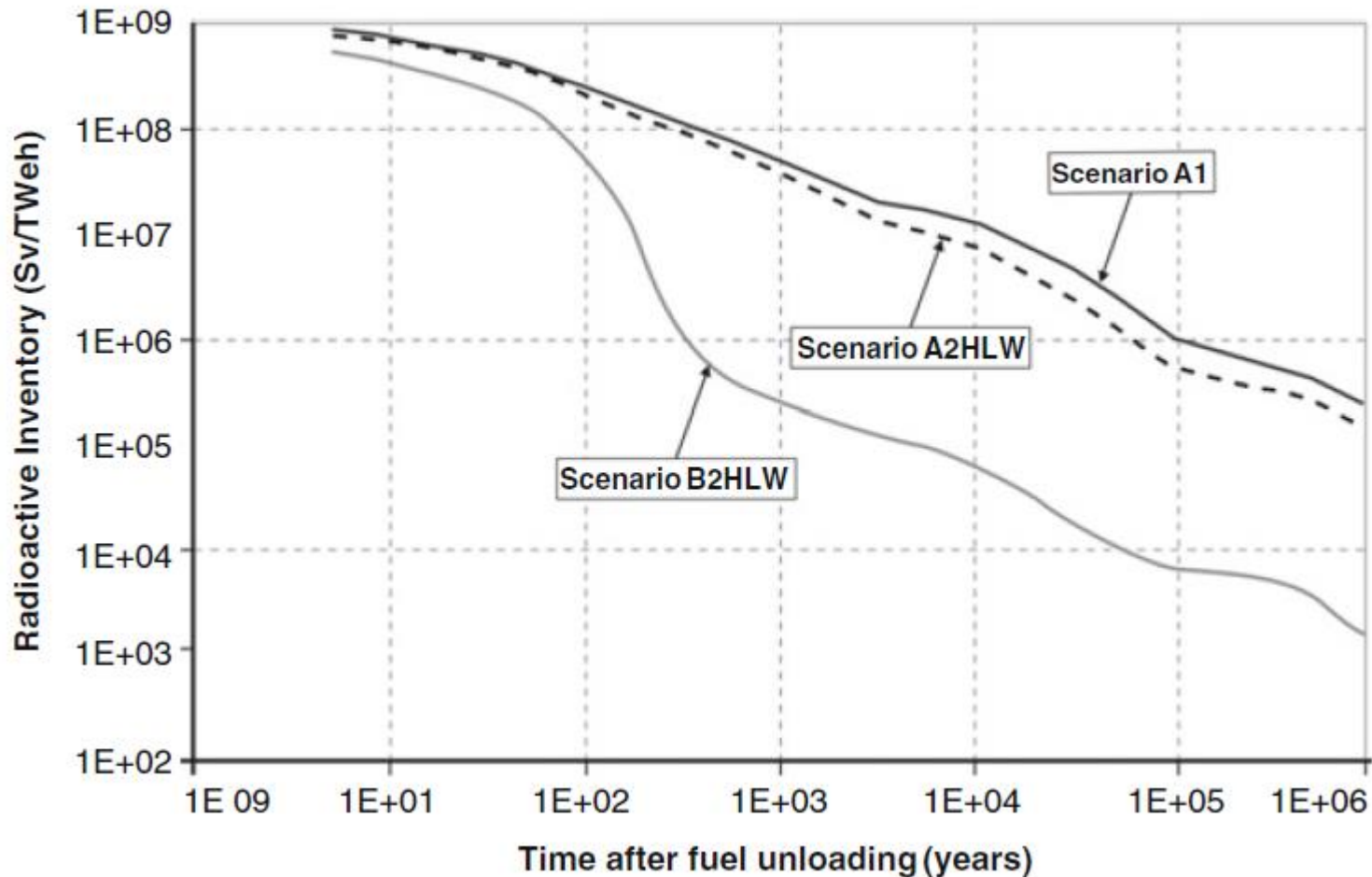
Kurze Bestandsaufnahme mit Fakten (I)

- **Primärenergiebedarf** (150 Billionen kWh) zu 85% beansprucht von 15% der Weltbevölkerung, zu 80% abgedeckt durch fossile Brennstoffe



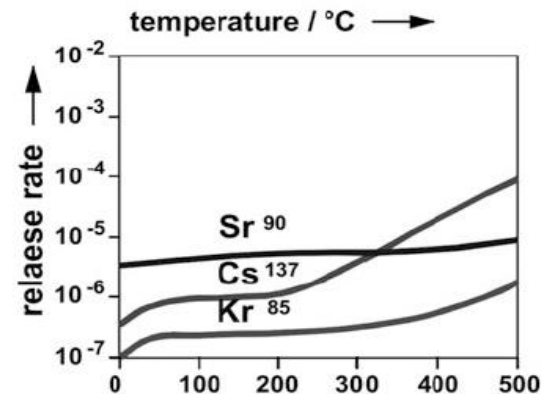
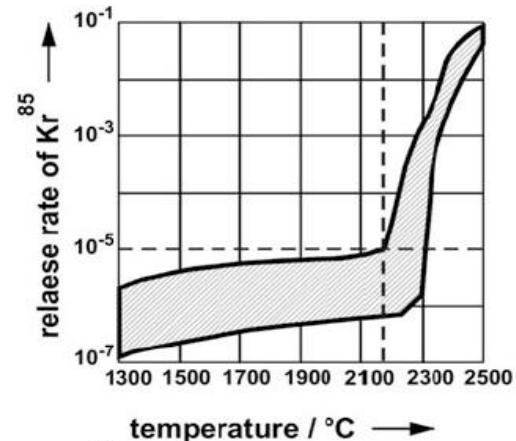
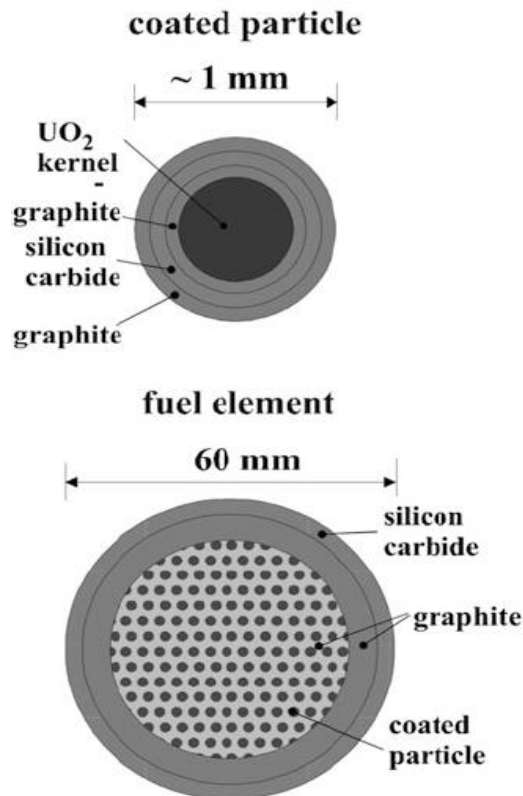
- 17% der Primärenergie umgewandelt in Strom, hauptsächlich erzeugt aus Kohle (40%) und Erdgas (23%), Anteile Kernenergie fast 11%, Wasser 16.5%, Wind und Sonne mit knapp 8%

Development of radioactive inventory with time for various fuel cycle schemes (A1: open, A2: Pu burning, B2: Pu plus MA burning)



Gas-gekühlte Hochtemperaturreaktoren mit keramischen, beschichteten Brennstoffpartikeln (HTR Modul, 300 MWt)

HTR zeigt einzigartige inhärente Sicherheitseigenschaften, wenn Leistung so begrenzt ist, dass im schlimmsten Fall Brennstofftemperaturen unter 1600 °C bleiben



Schematic view of MYRRHA, an actinide burner developed by the Belgian Centre for Nuclear Research

