

PAUL SCHERRER INSTITUT



Wir schaffen Wissen – heute für morgen

Paul Scherrer Institut

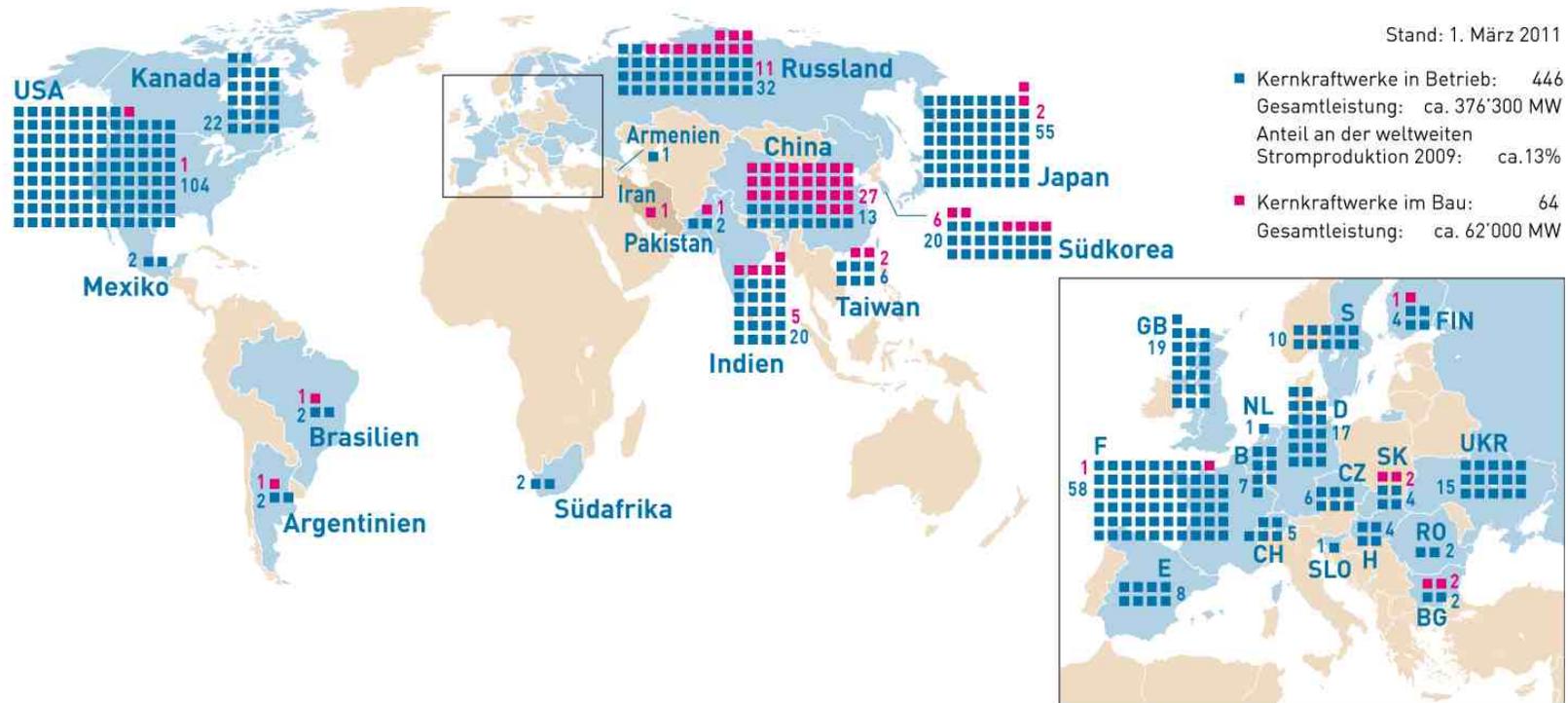
Marco Streit

Nukleartechnik und Reaktorsicherheit

- **Einzig Schweizer Anlage für Materialforschung an hochaktiven Komponenten und Proben**
- **Sicherheitsinfrastruktur (Lüftung, Abwasser, Radiometrie, ...)**
- **Grundinfrastruktur für die Annahme, Trennung und Bearbeitung von hochaktiven Materialien für Flüssig- und Feststoffanalysen**
- **Analytische Infrastruktur für die Untersuchungen von hoch radioaktiven Materialien**
- **Kompetentes Personal für qualifizierte Analysen und materialwissenschaftlich fundierte Interpretationen**

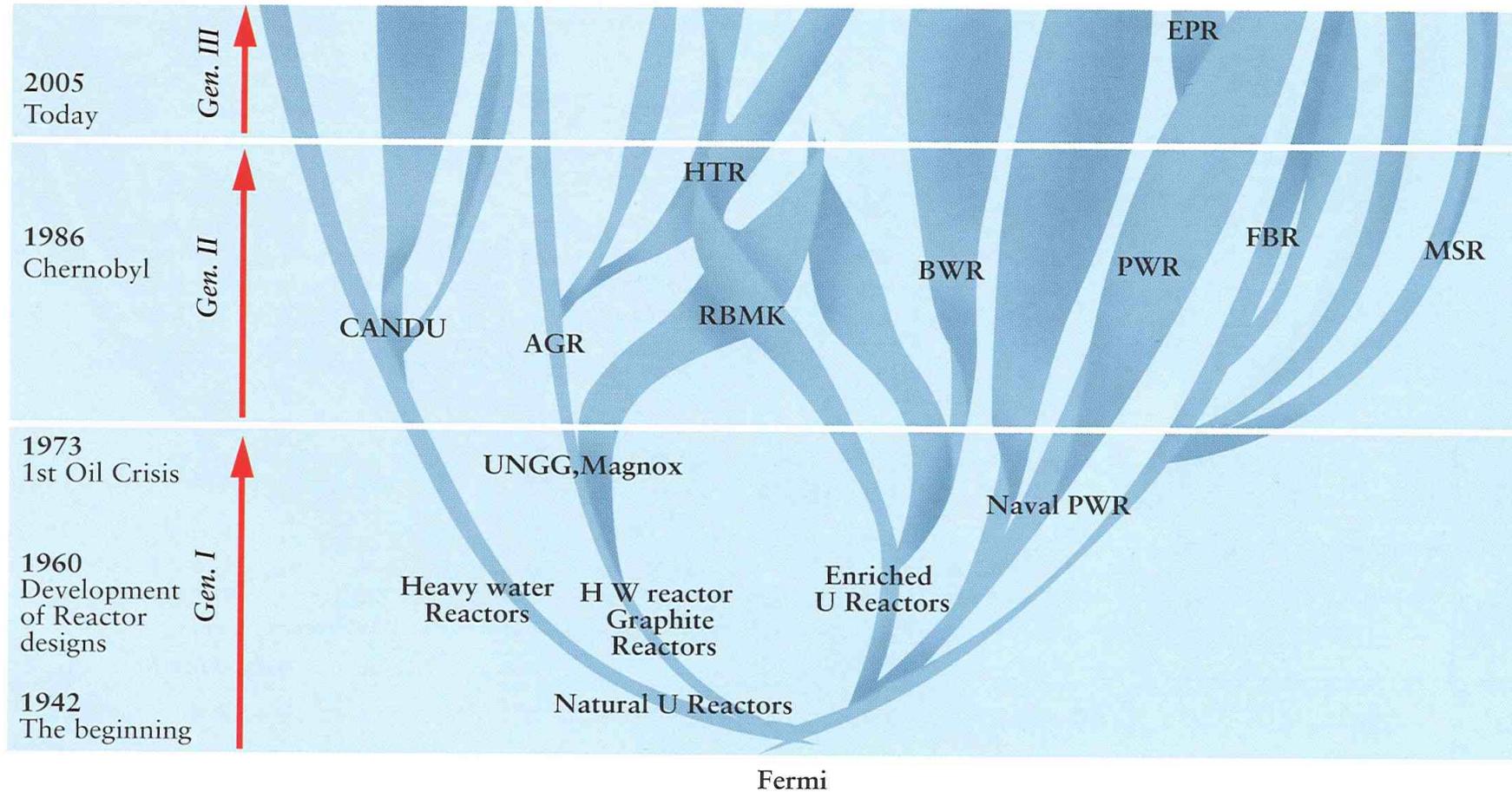


Kernkraftwerke der Welt

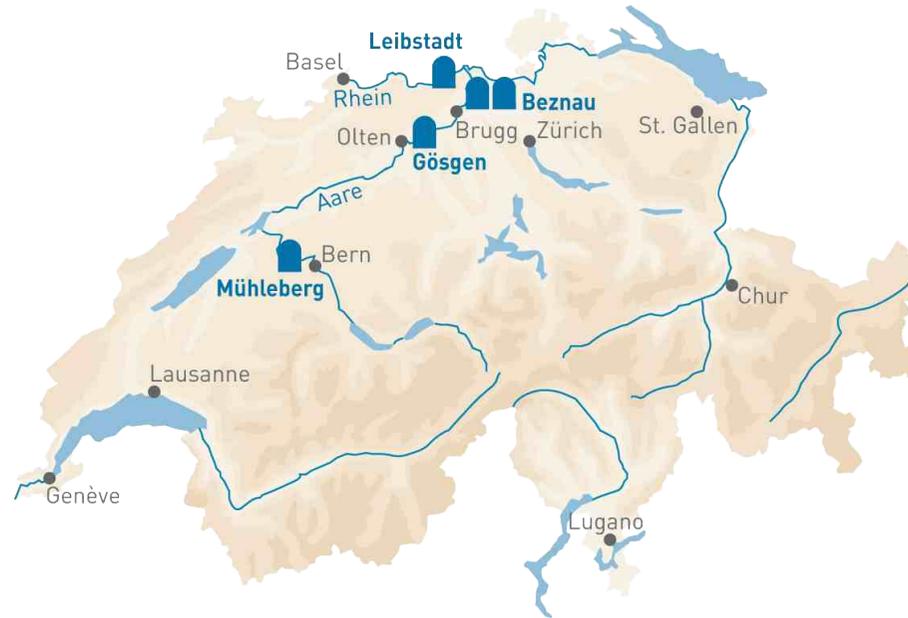


Anfang März 2011 standen weltweit 64 Kernkraftwerke in 15 Ländern im Bau. Projiziert waren über 100 Kernkraftwerke in zwei Dutzend Ländern.

Kernkraftwerk ≠ Kernkraftwerk

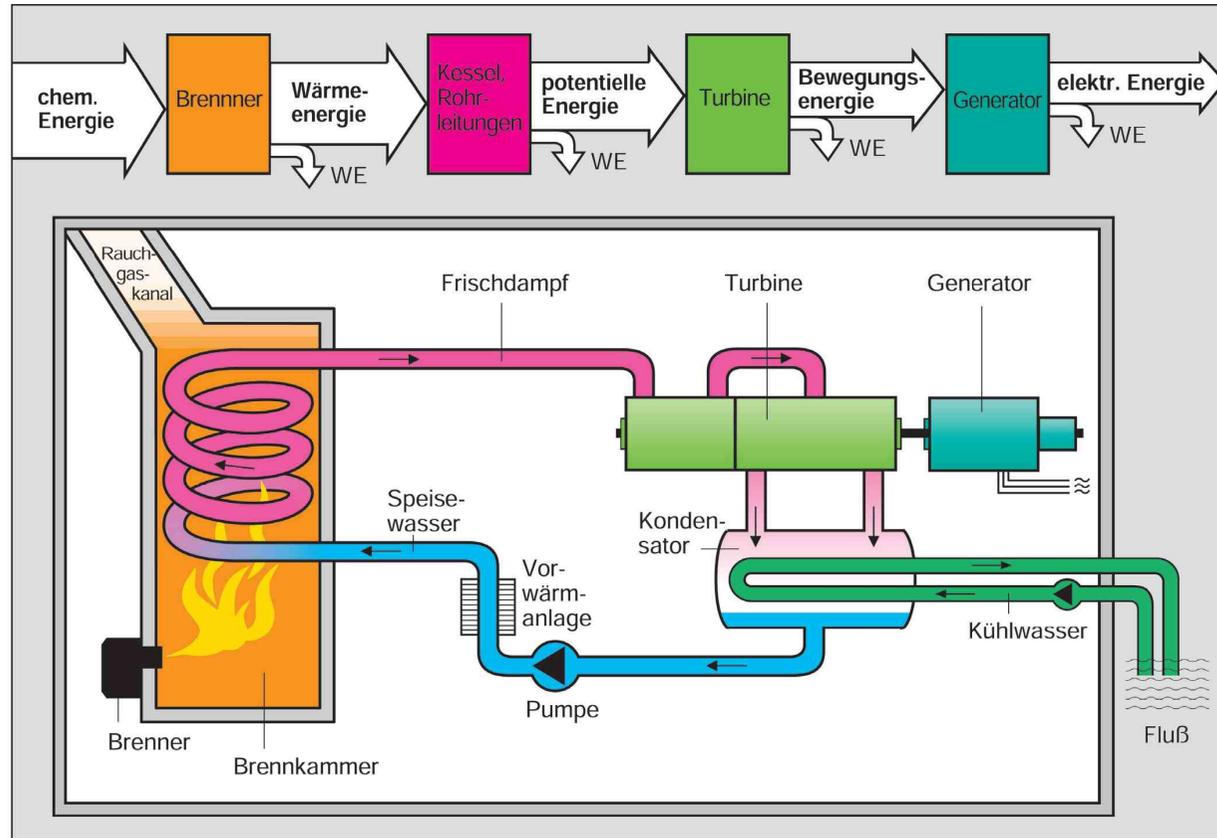


Kernkraftwerke in der Schweiz

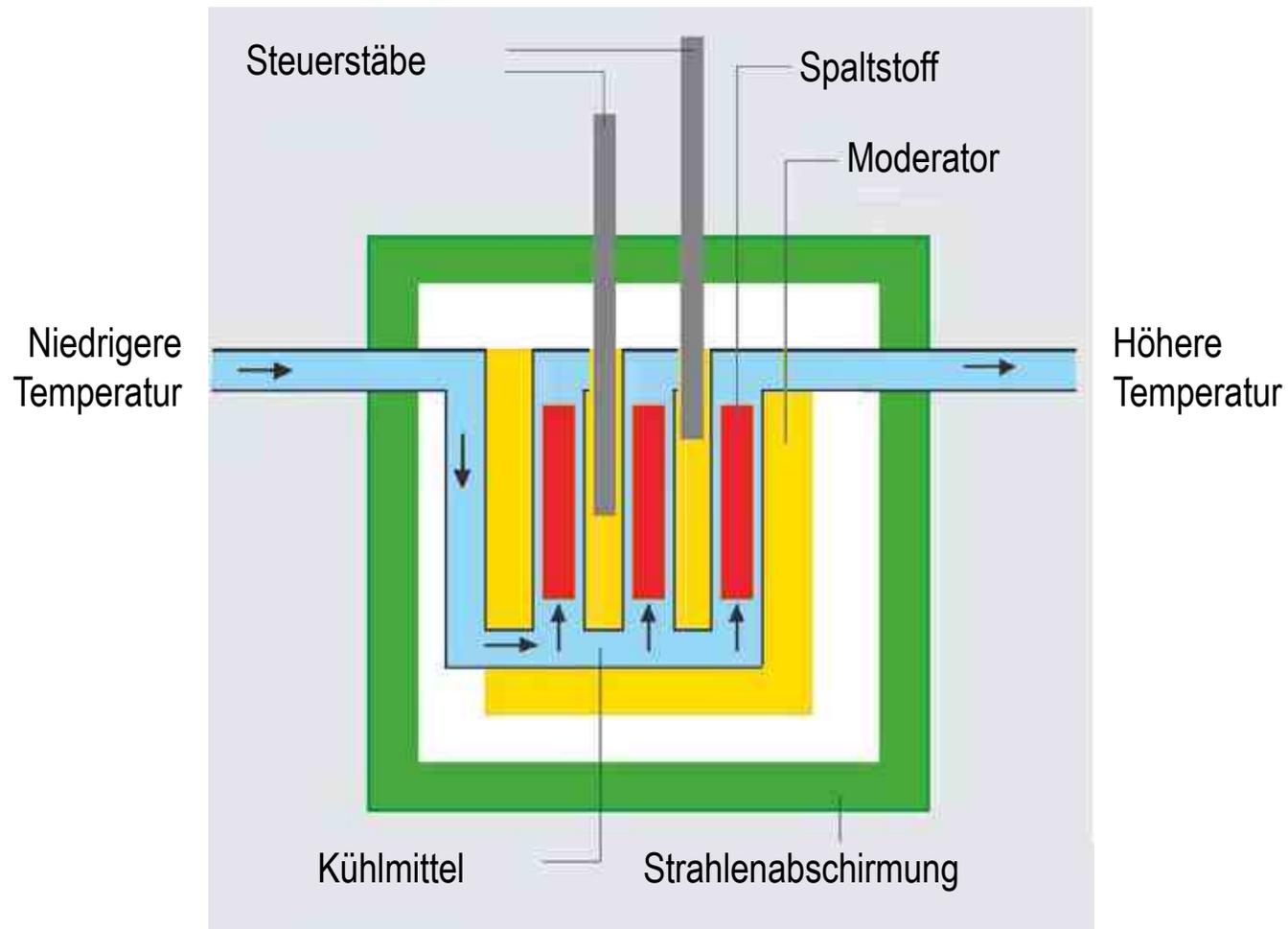


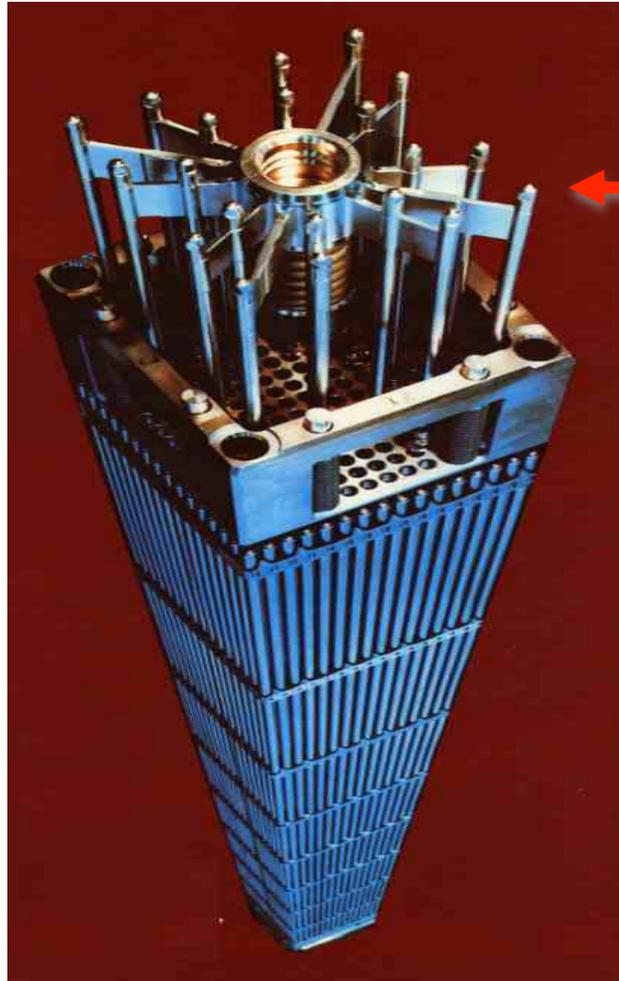
Anlage	Reaktortyp	Nettoleistung in MWe	Kommerzielle Inbetriebnahme
Beznau I	Druckwasser	365	1969
Beznau II	Druckwasser	365	1971
Mühleberg	Siedewasser	355	1972
Gösgen	Druckwasser	970	1979
Leibstadt	Siedewasser	1165	1984

Funktionsweise eines thermischen Kraftwerks



Grundlegende Elemente eines Leistungsreaktors





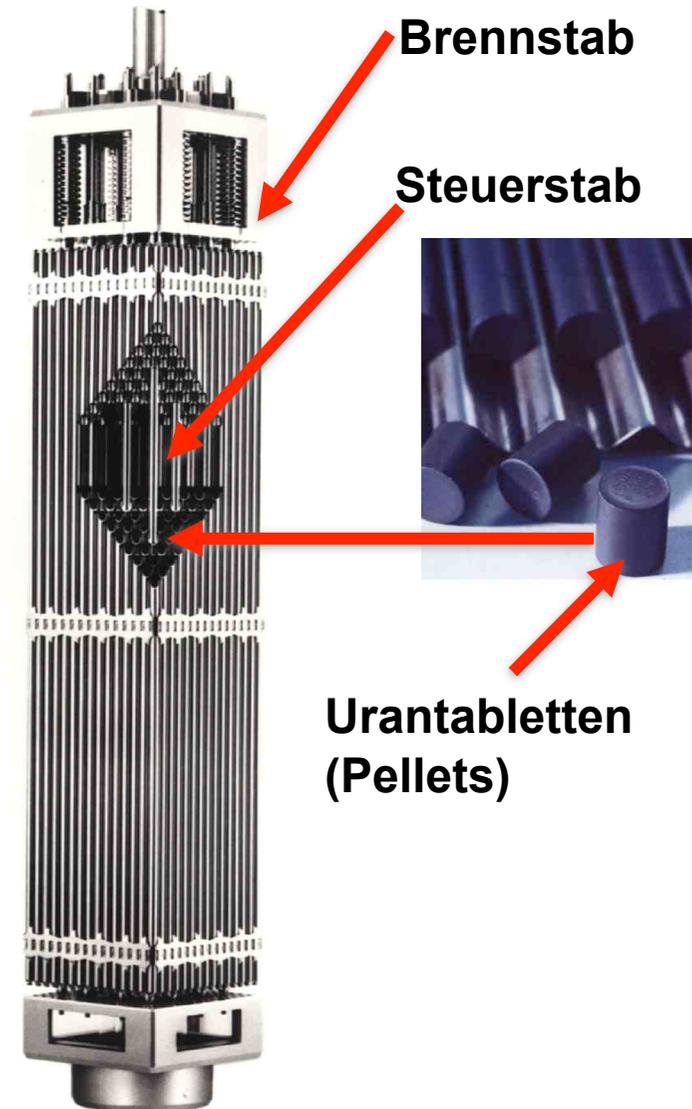
Brennelement

← Steuerstäbe

Dimensionen
am Beispiel
von KKG:
Länge:
4'182mm

Grundriss:
215x215mm

Jeder Reaktortyp hat sein eigenes Brennstoffdesign



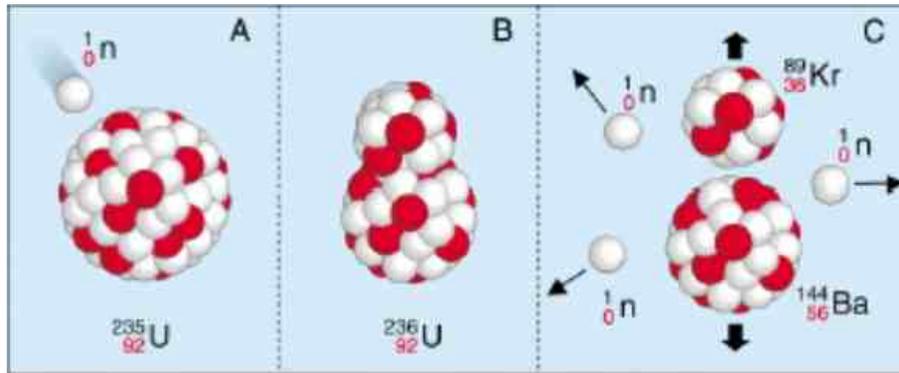
Brennstab

Steuerstab

Urantabletten
(Pellets)

Zwei wichtige Kernreaktionen mit Neutronen

Spaltung - angeregter Zwischenkern zerfällt in zwei mittelschwere Bruchstücke

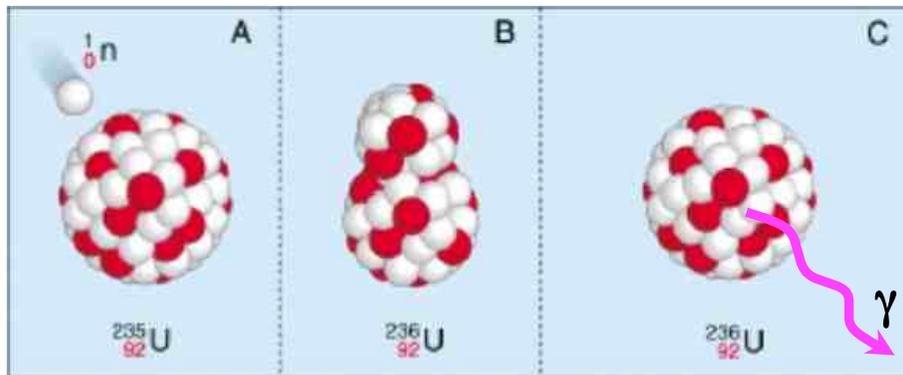


Benötigt Mindestanregung des Zwischenkerns

U-238: Neutron muss Energie zuführen - Spaltung ist Schwellenreaktion

U-235: Bei Absorption freigesetzte Bindungsenergie genügt zur Auslösung

Neutroneneinfang (n, γ) - angeregter Zwischenkern gibt Photon ab, $A_{\text{neu}} = A + 1$

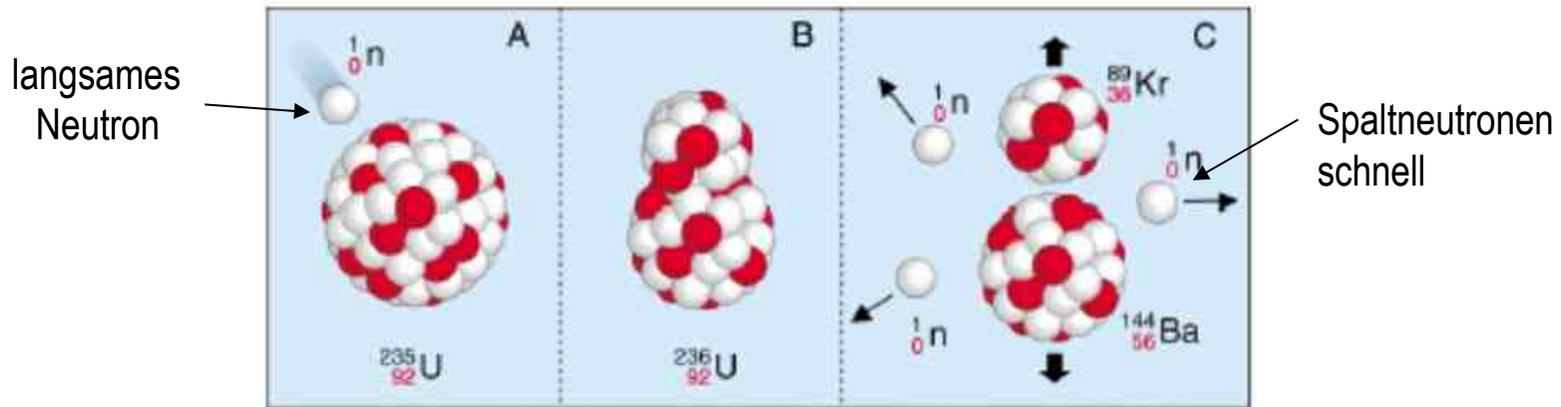


Funktioniert mit Neutronen beliebiger Energie

Produkt ist meist radioaktiv, oft β -Aktivität wegen Neutronenüberschuss

Konkurrierende Reaktionen im Kernreaktor bezüglich der Nutzung der Neutronen

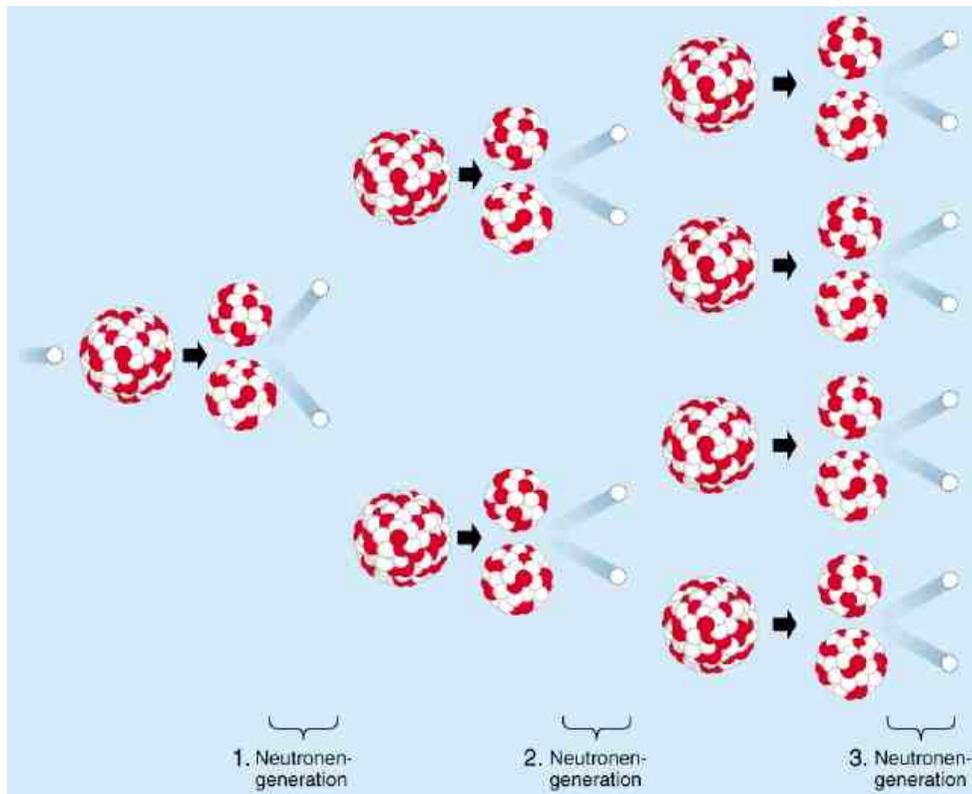
Spaltungsreaktion und ihre Produkte



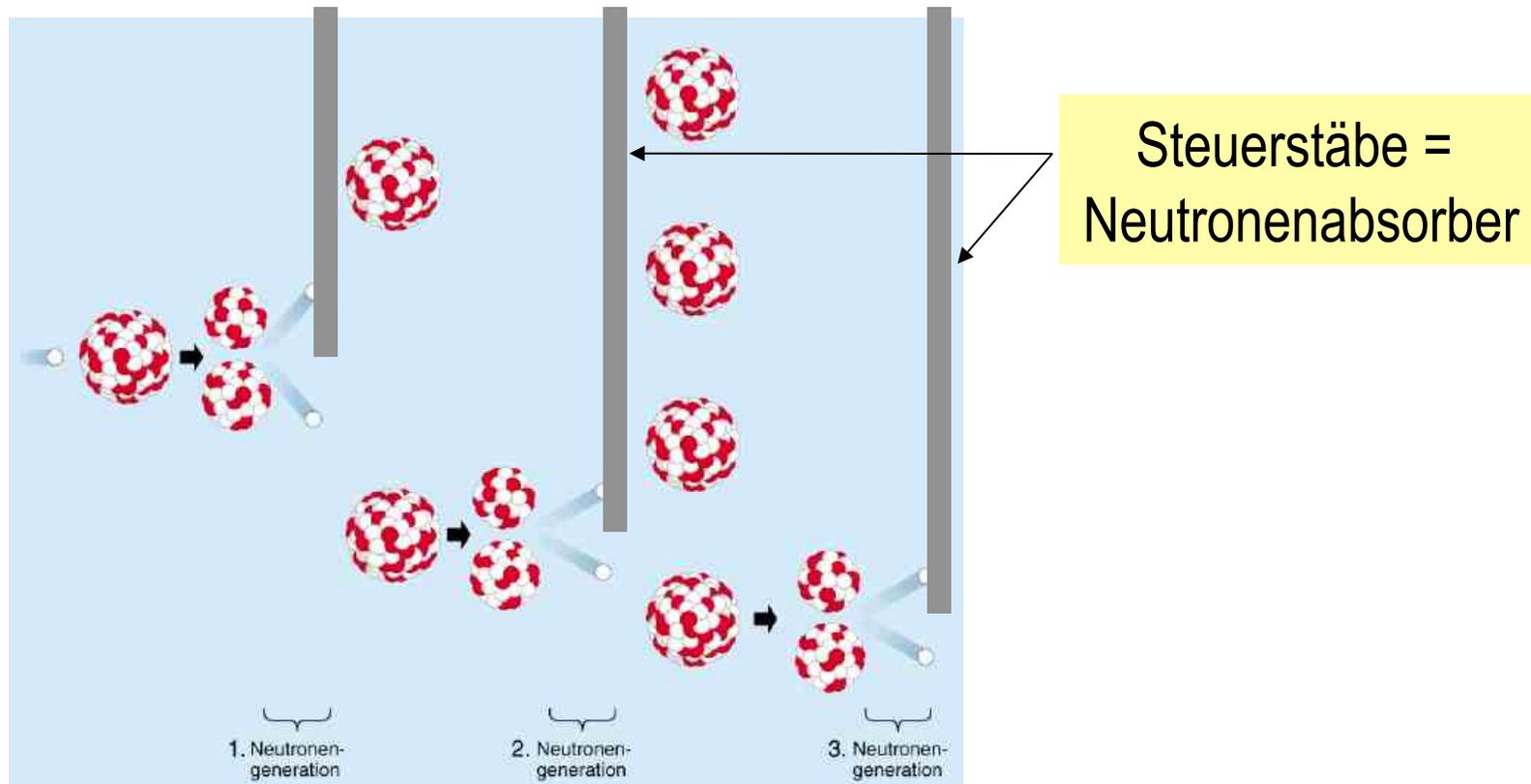
Typisches Beispiel für die möglichen Spaltprodukte –
Vielzahl von Varianten möglich

Energiefreisetzung: 1 kg U-235 entspricht Verbrennung von 3'000'000 kg Steinkohle

Kinetische Energie Spaltprodukte	87%	nutzbar	prompte Wärme- produktion	} 100%
Kinetische Energie Spaltneutronen	3%			
Prompte γ -Strahlung	4%			
$\gamma + \beta^+$ -Strahlung der Spaltprodukte	6%		Nachzer- fallswärme	
Neutrinos	5%	nicht nutzbar		

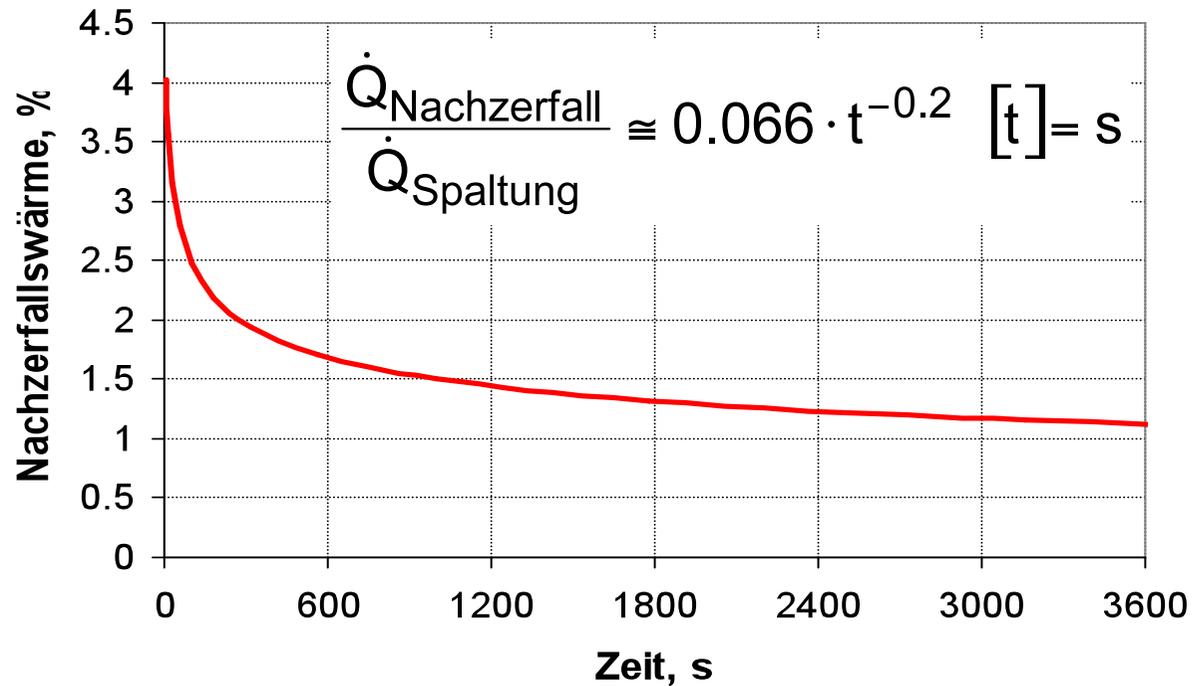


- Allein durch die Nutzung der Spaltneutronen zur Auslösung weiterer Spaltungen gelingt es, makroskopische Mengen zu spalten
- Kettenreaktion ist notwendige Voraussetzung für energetische Nutzung

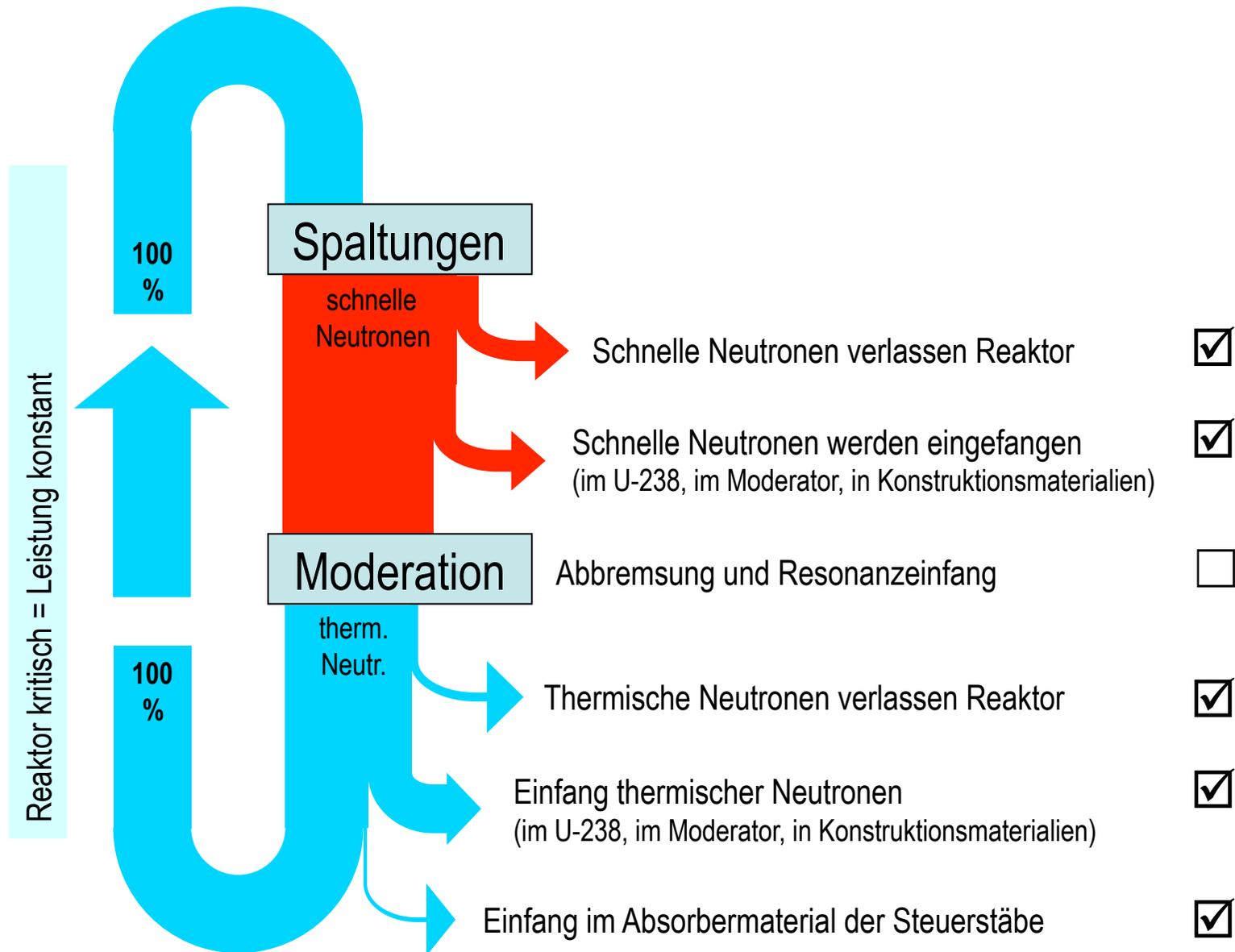


- Durch gezielten Einfang von Neutronen wird die Anzahl der Spaltungen pro Zeiteinheit konstant gehalten
- Thermische Reaktorleistung bleibt konstant = Reaktor ist kritisch

Nachzerfallswärme – permanente Kühlung nötig!

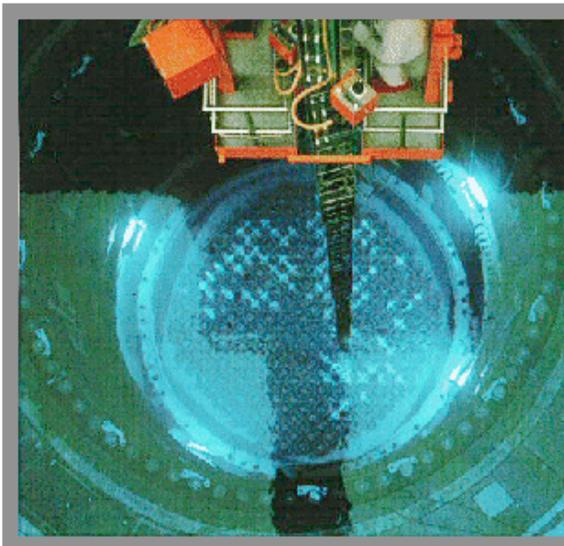


bei 1000 MW _{el}	→ 3000 MW _{th}
nach Abschaltung	→ 6.5% sind 200 MW _{th}
nach 1 Stunde	→ 1.1% sind 33 MW _{th}
nach 10 Jahren	→ 0.008% sind 0.24 MW _{th} = 240 kW _{th}
nach 100 Jahren	→ 0.0006% sind 0.018 MW _{th} = 18 kW _{th}



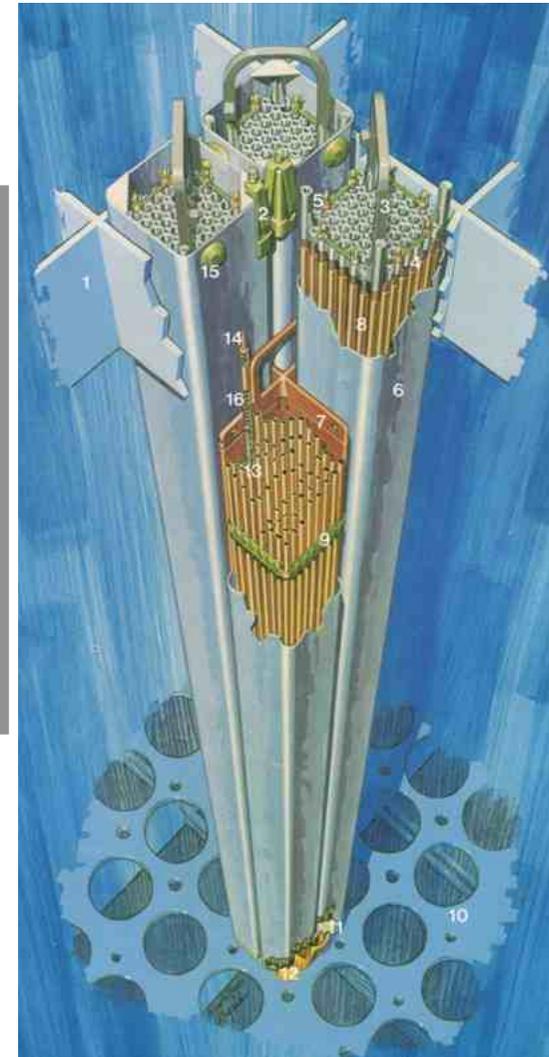


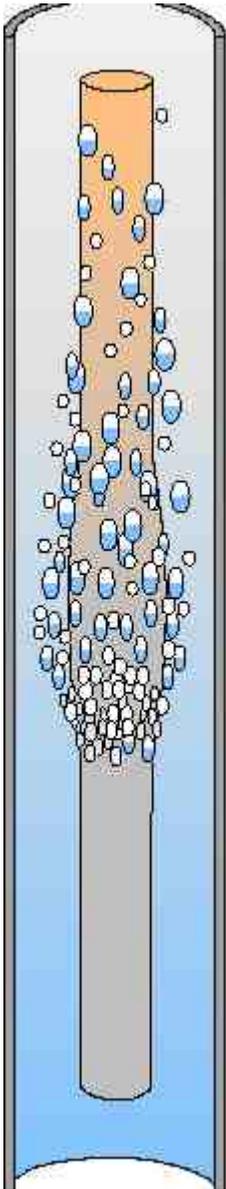
Reaktorhalle



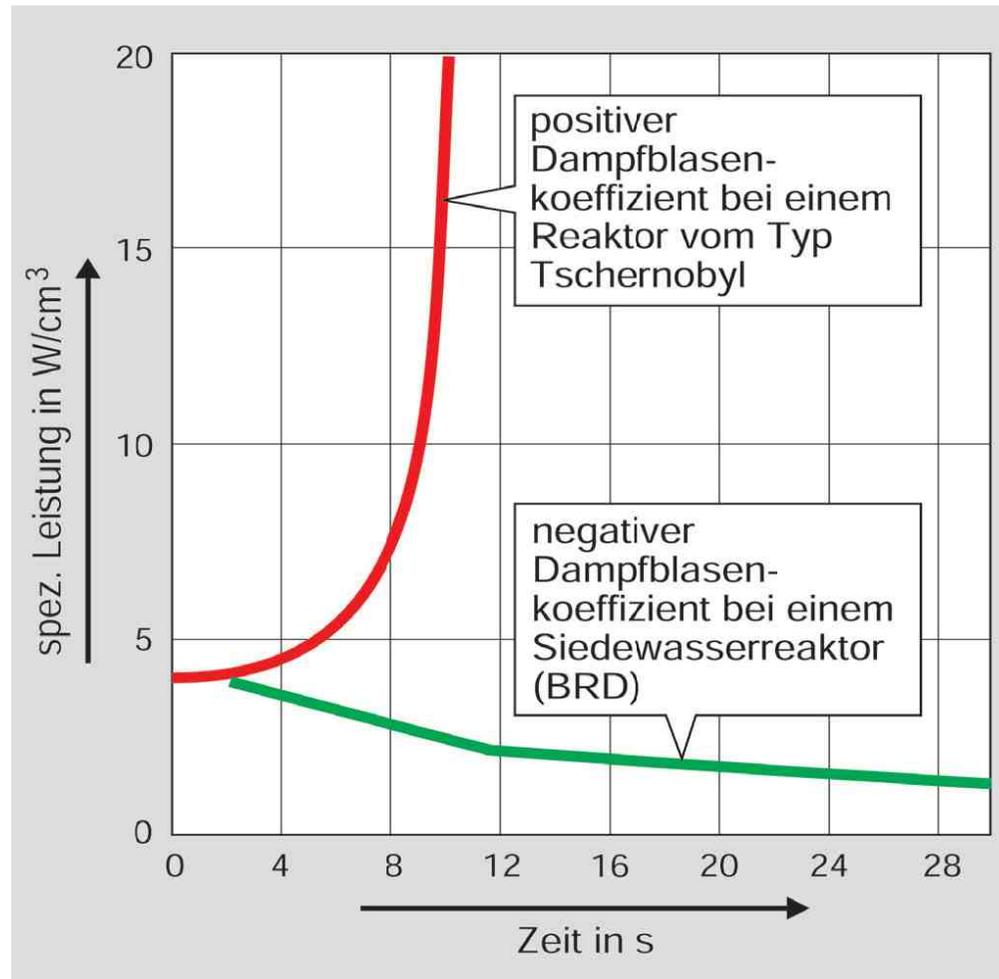
Reaktorkern

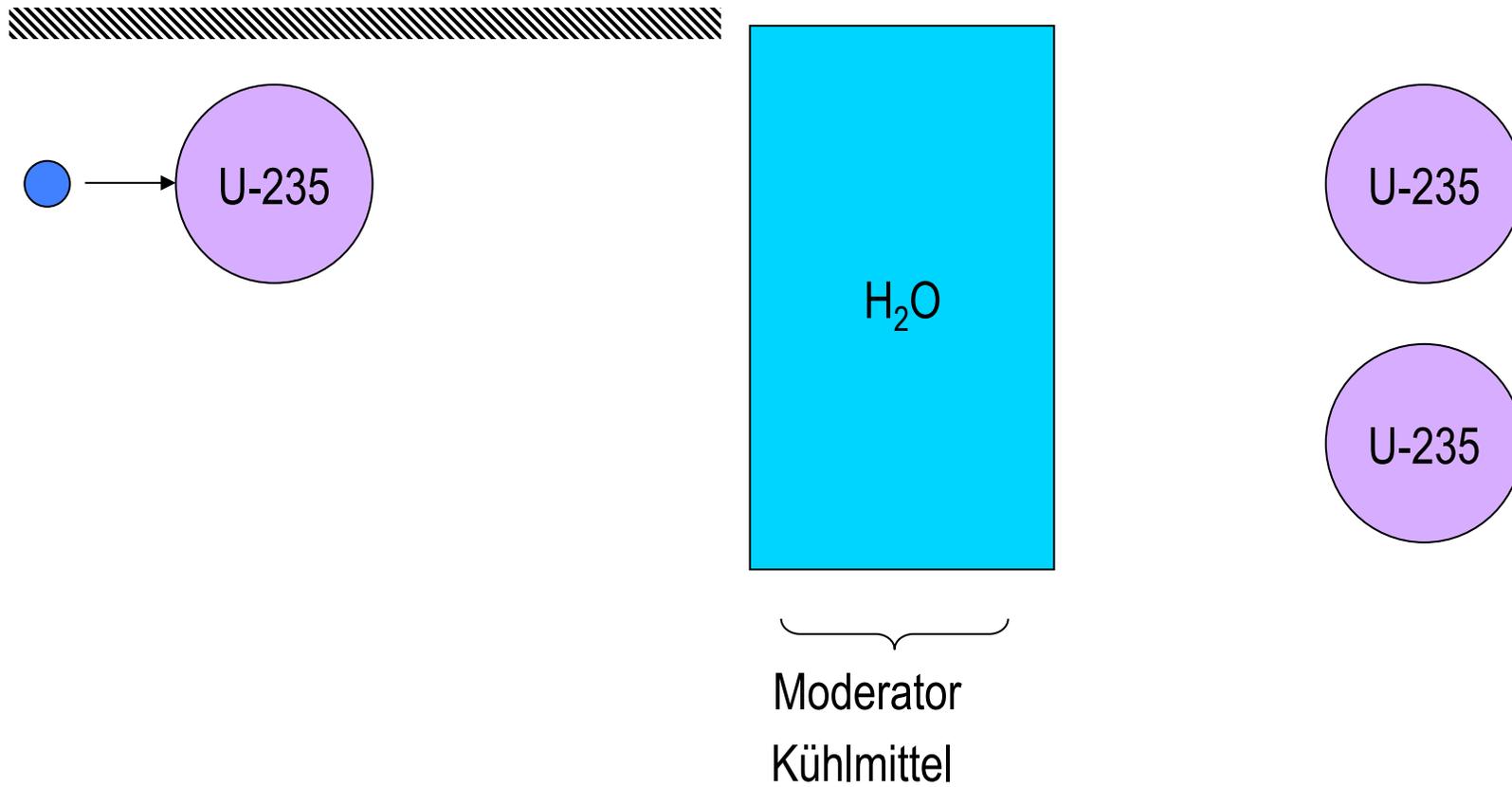
Brennelement

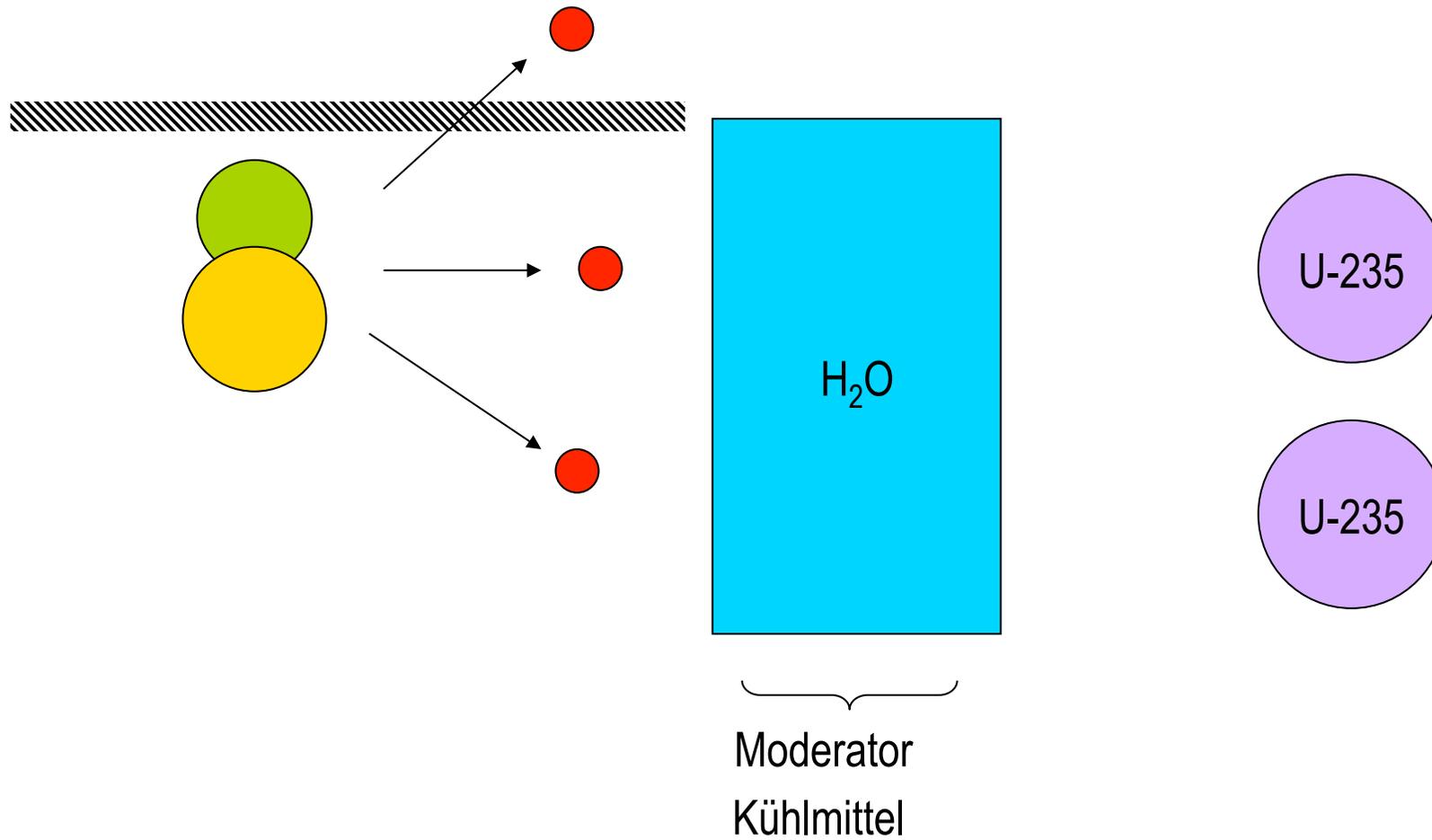


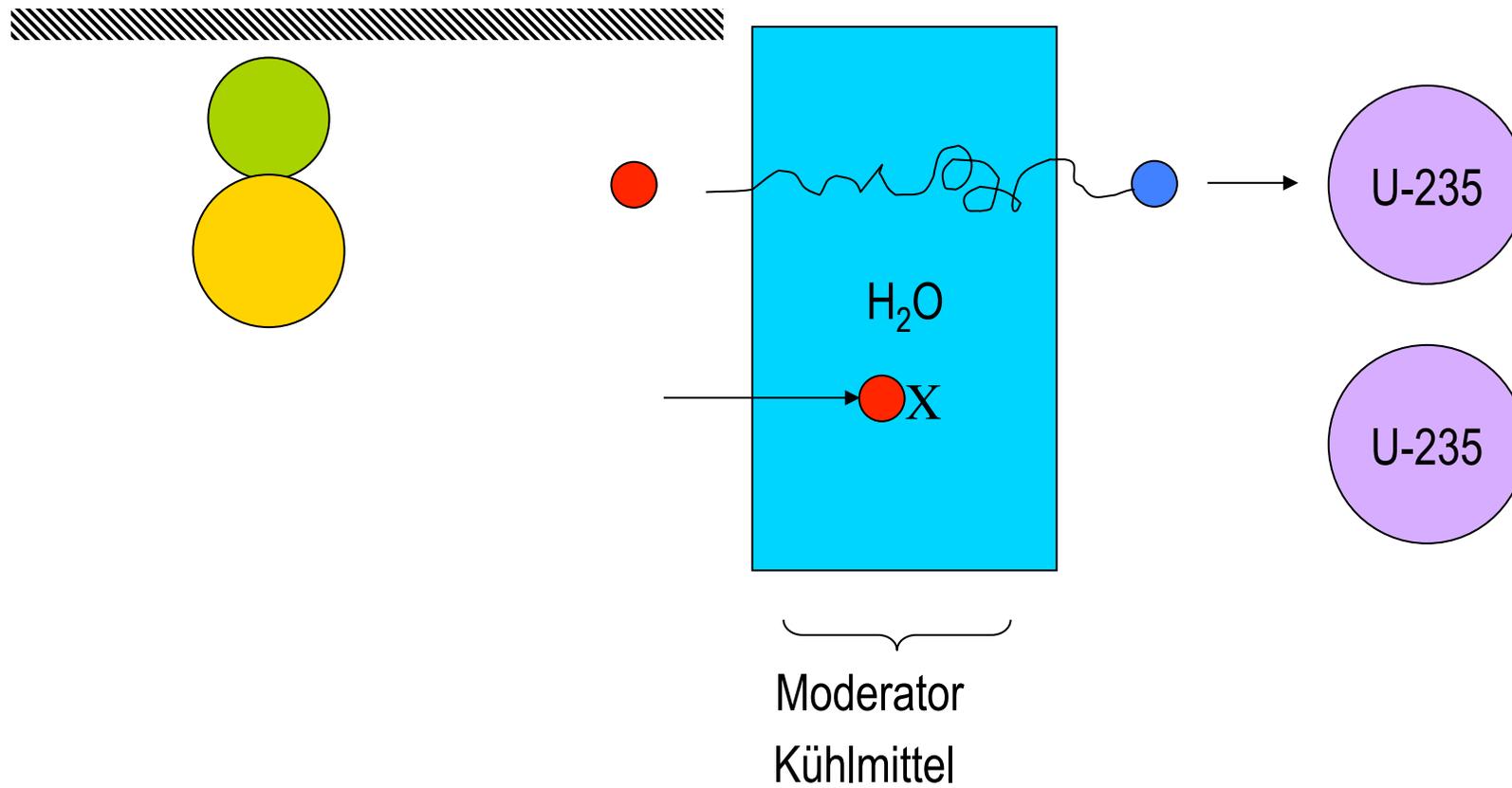


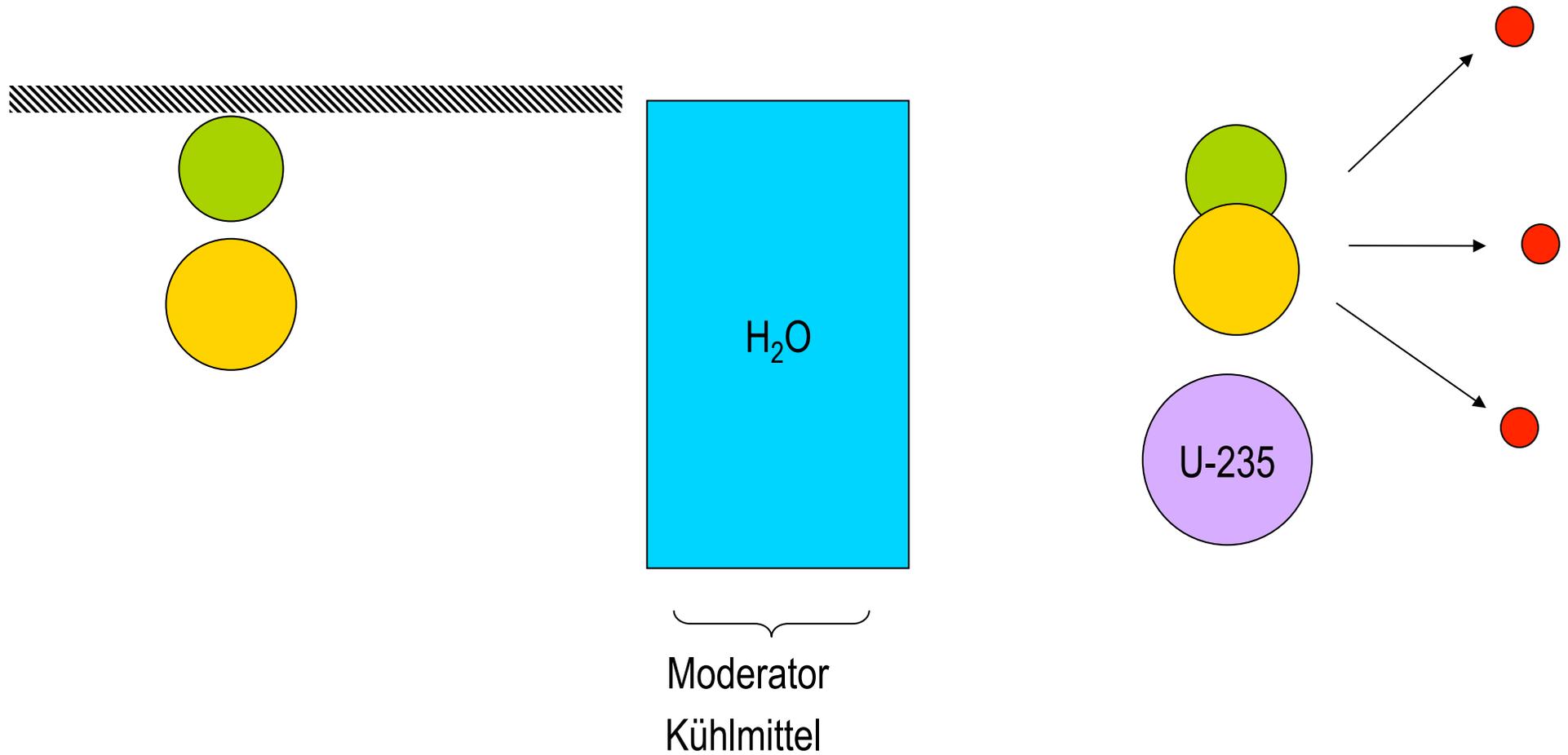
Der Dampfblasenkoeffizient und die Kettenreaktion



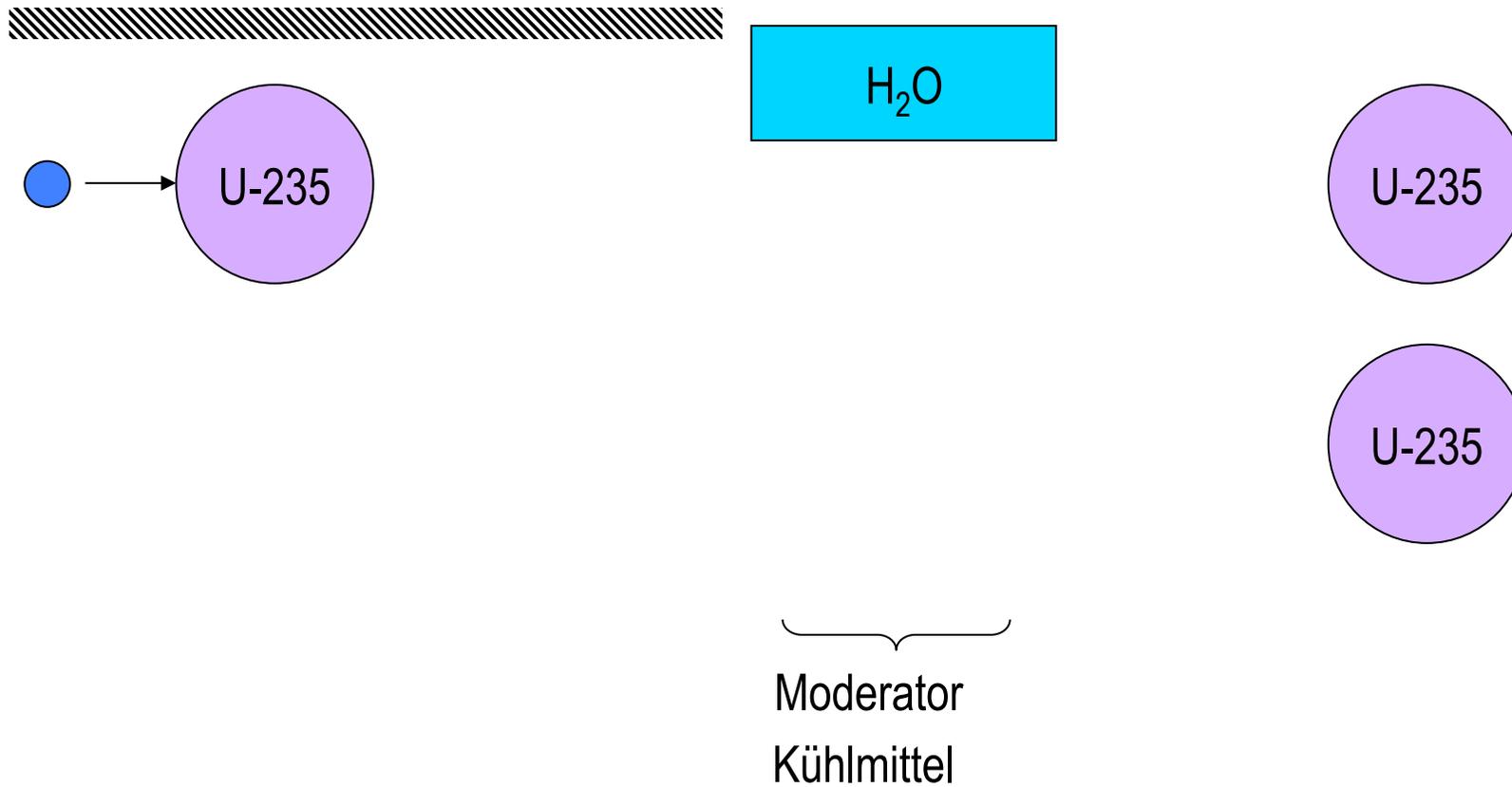




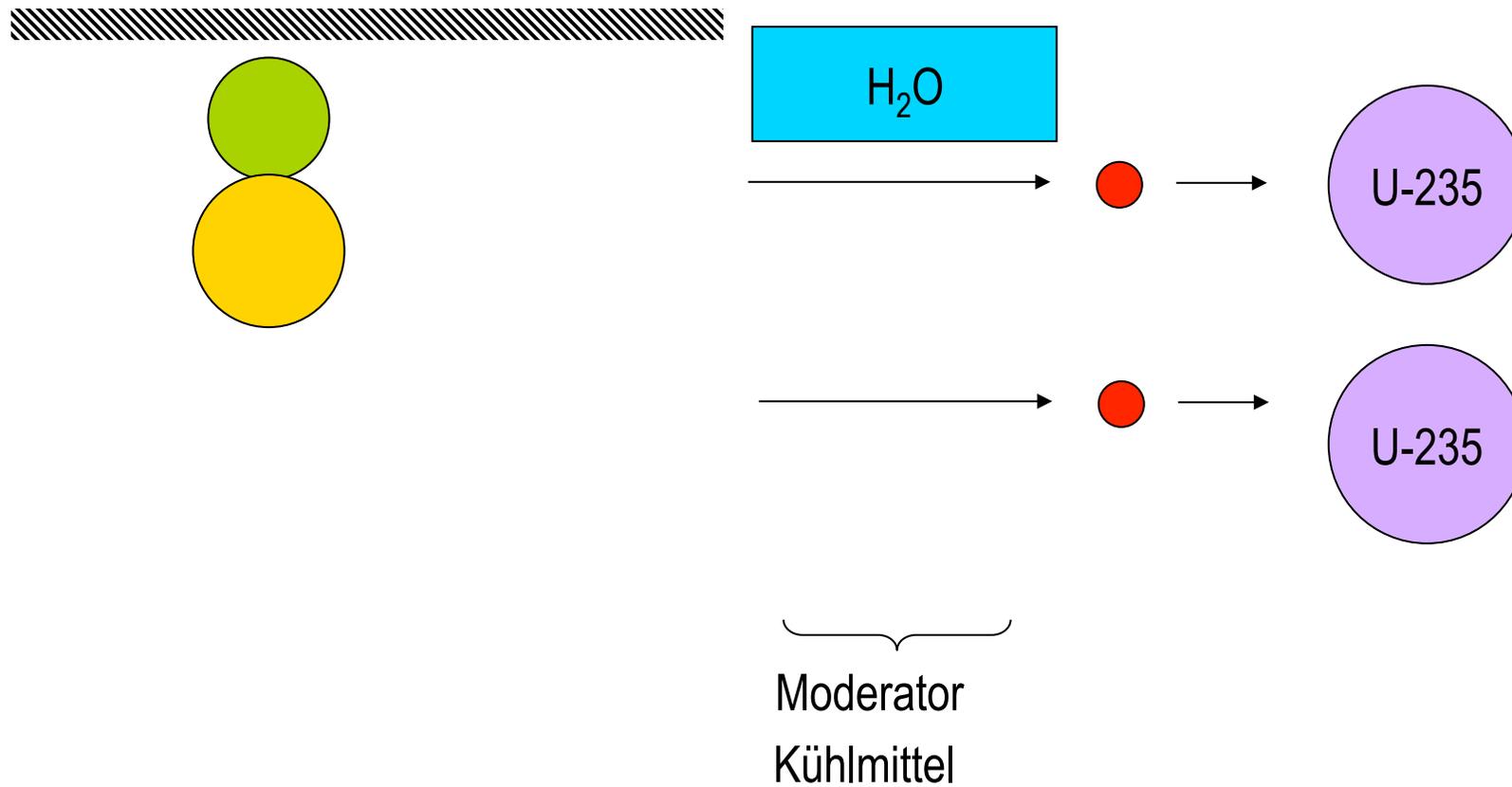




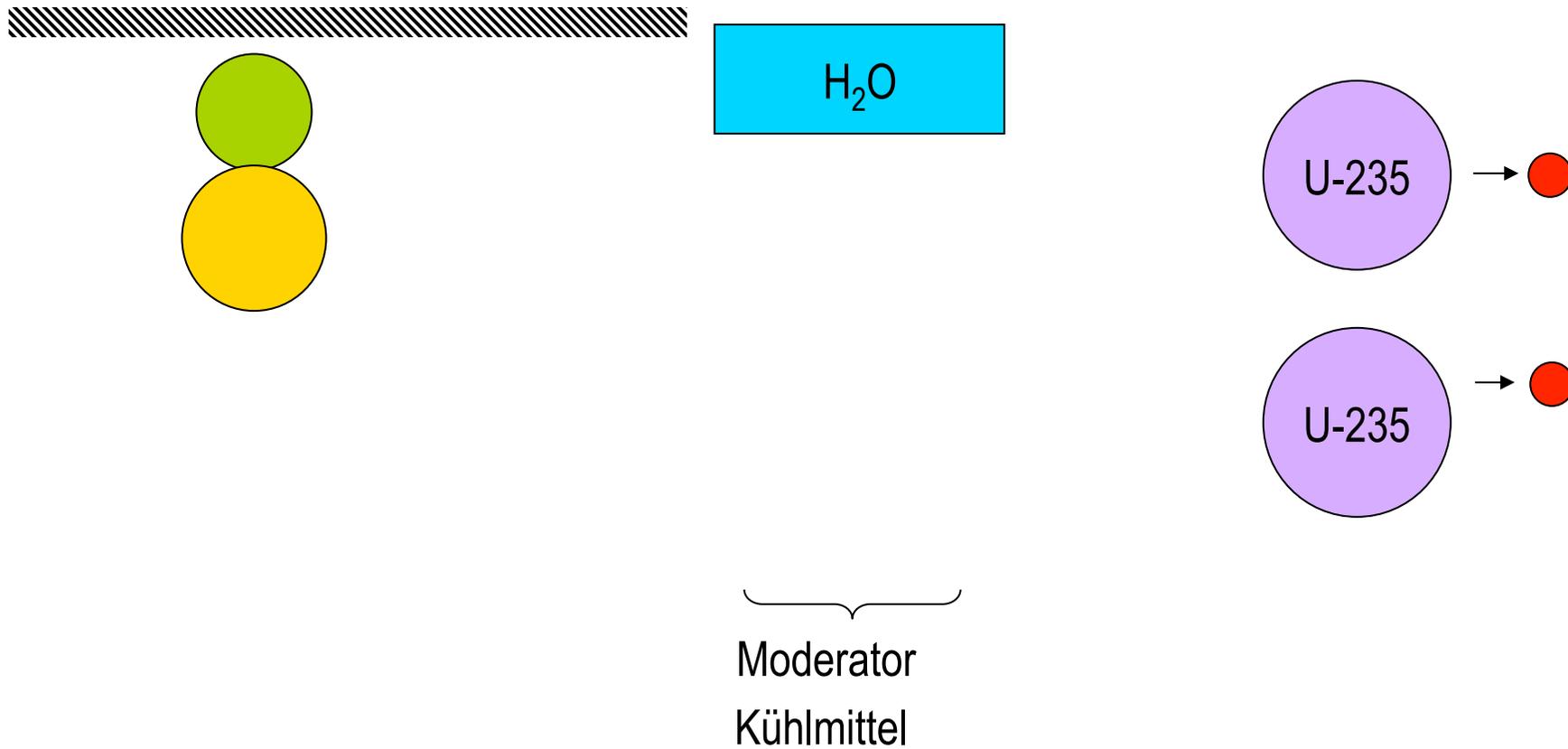
Temperatur steigt / Dichte sinkt



LWR – Störung (Wasser verdampft)

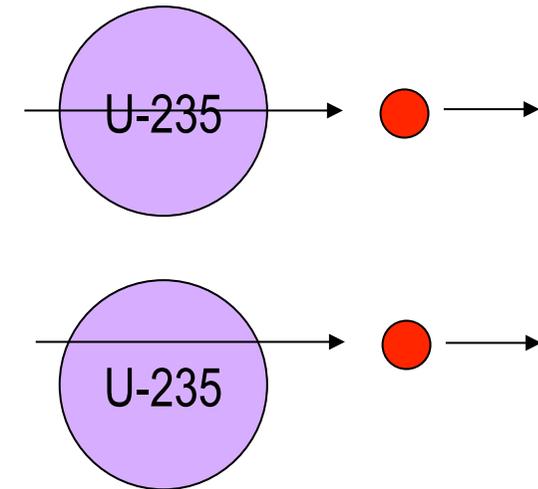
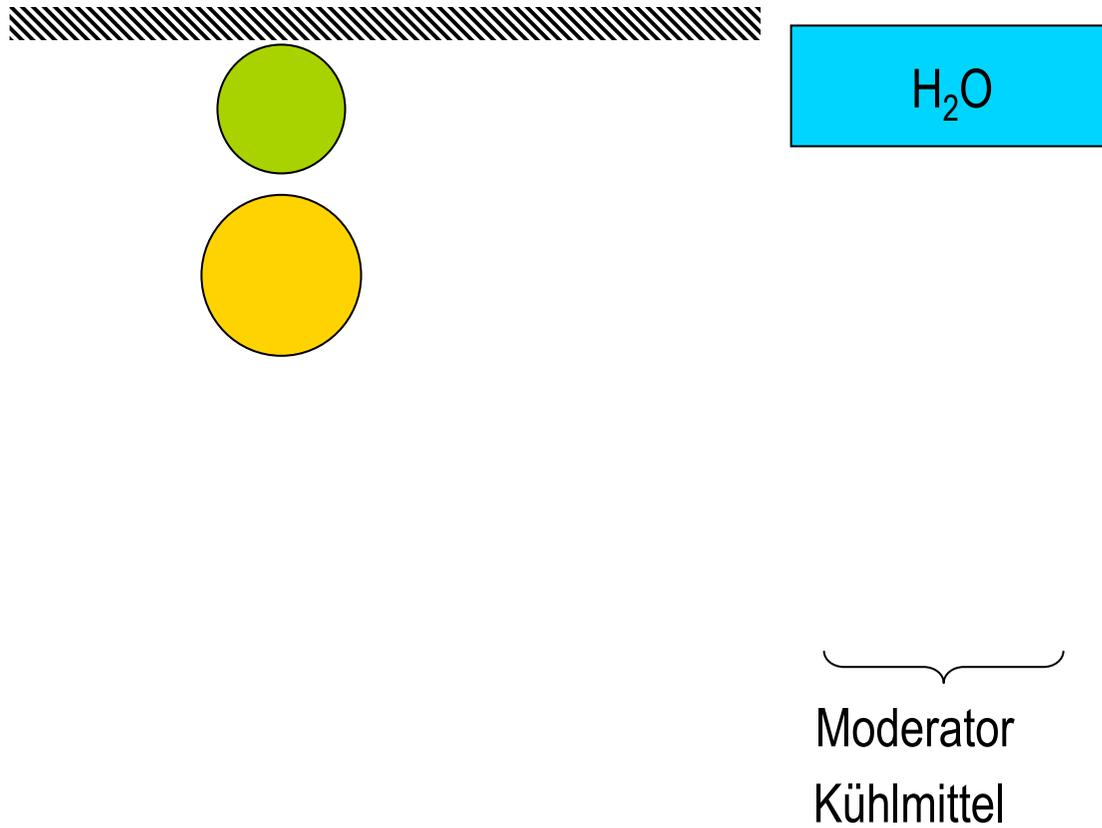


LWR – Störung (Wasser verdampft)



LWR – Störung (Wasser verdampft)

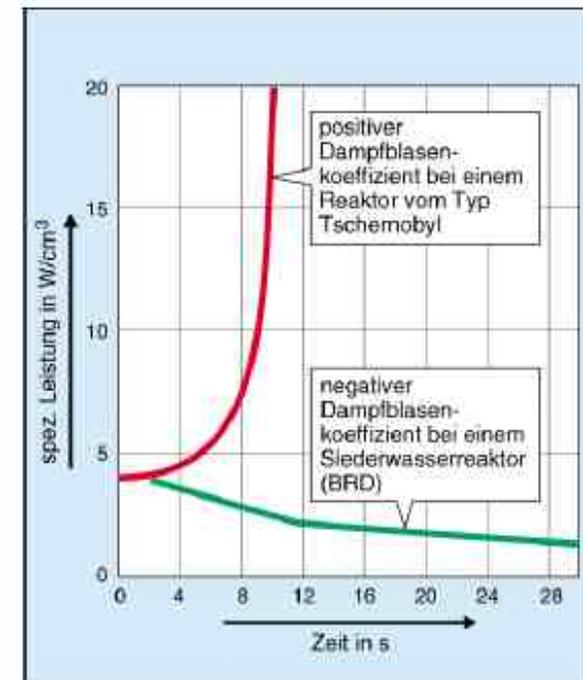
- Leistung sinkt
- Reaktor stabilisiert sich





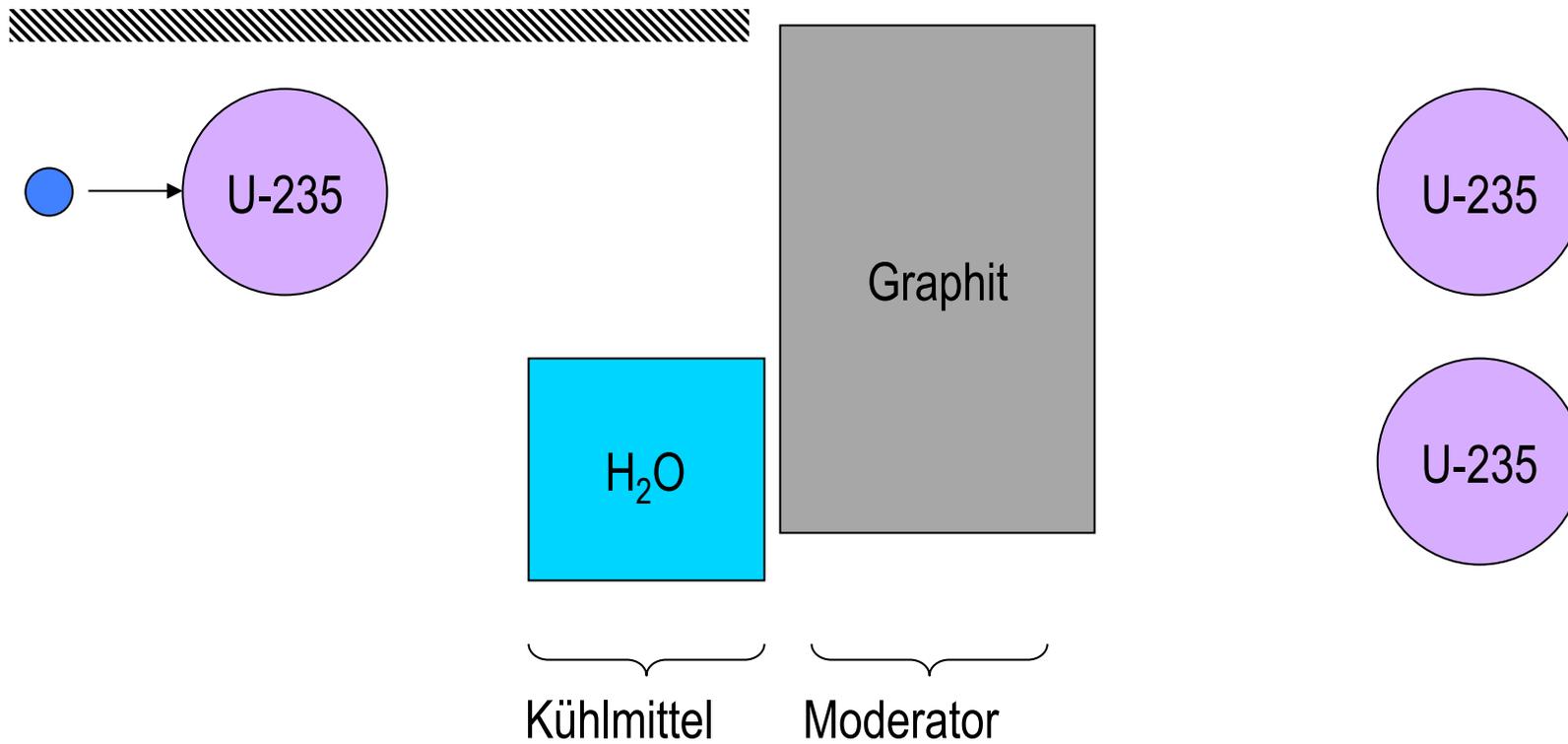
Moderator
Kühlmittel

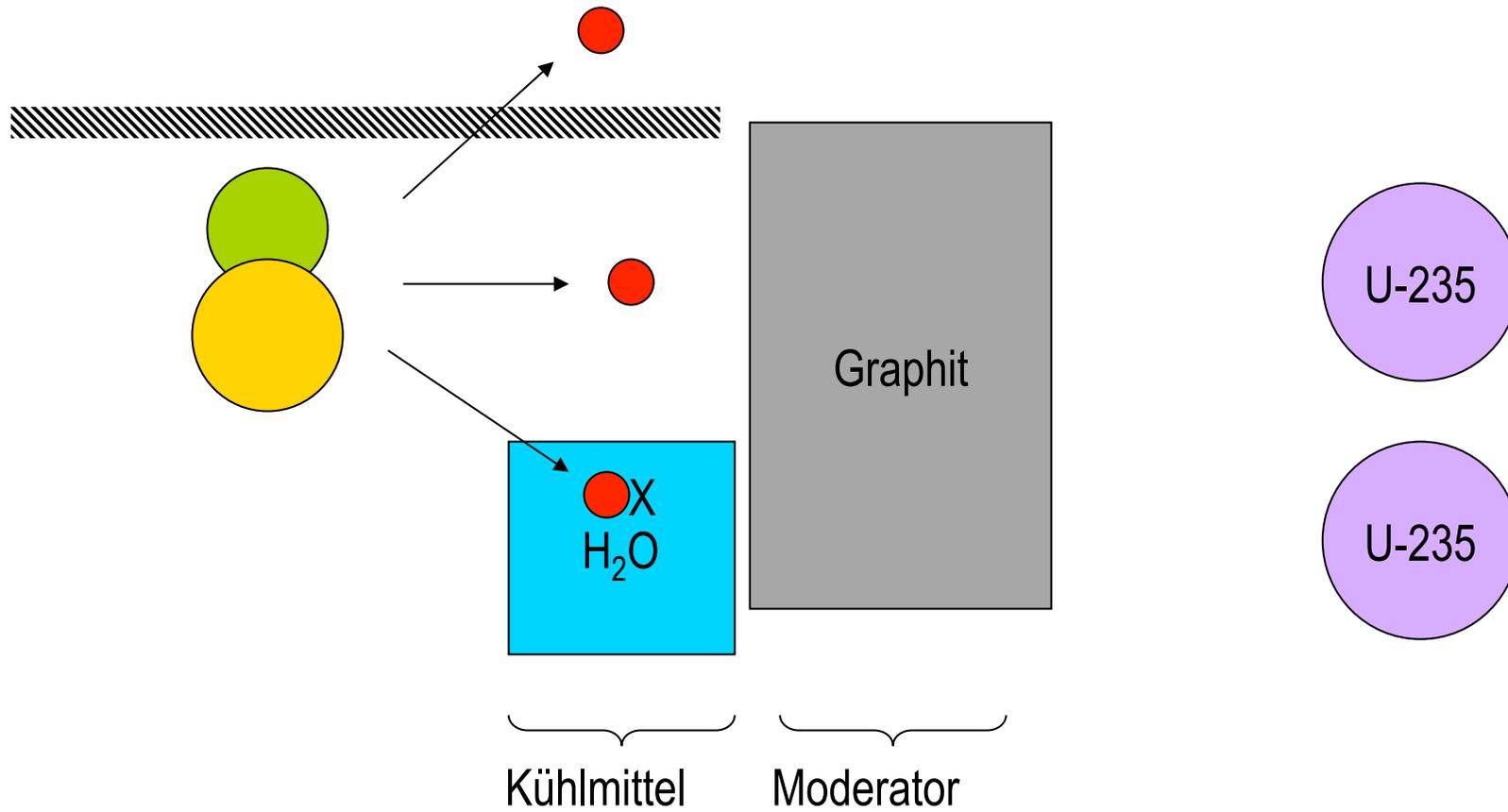
- Leistung sinkt
- Reaktor stabilisiert sich

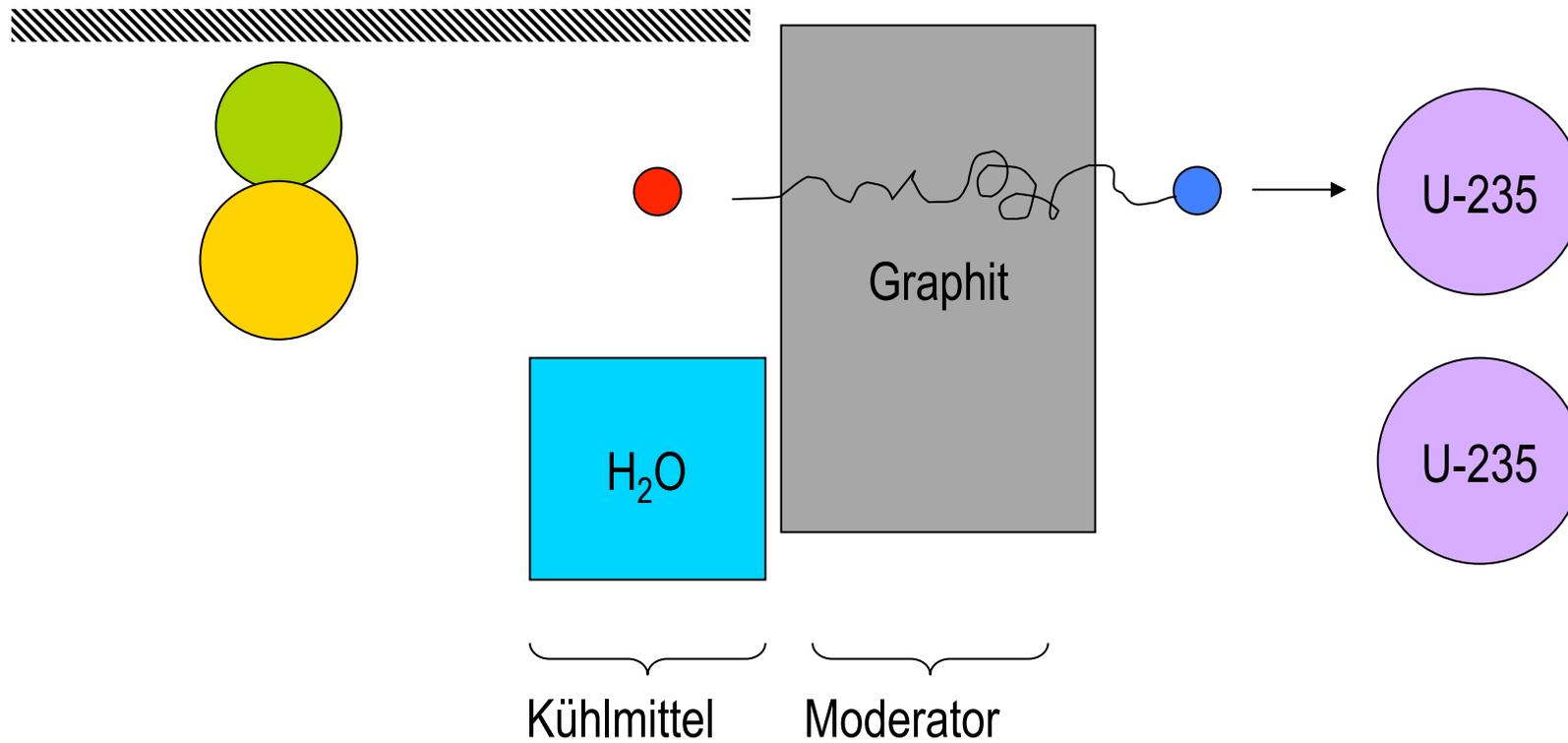


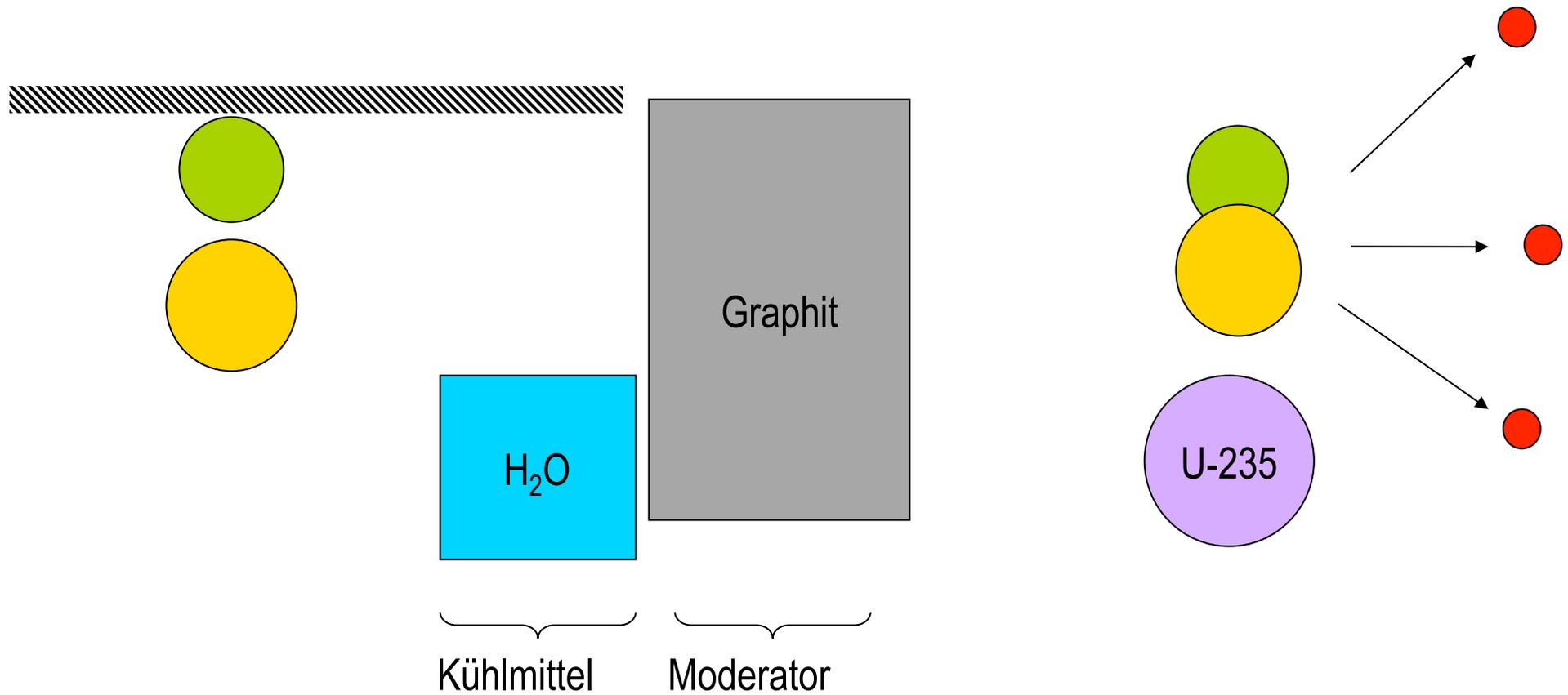
Verlauf der Reaktorleistung unter bestimmten Umständen bei positivem und negativem Dampfblasenkoeffizienten

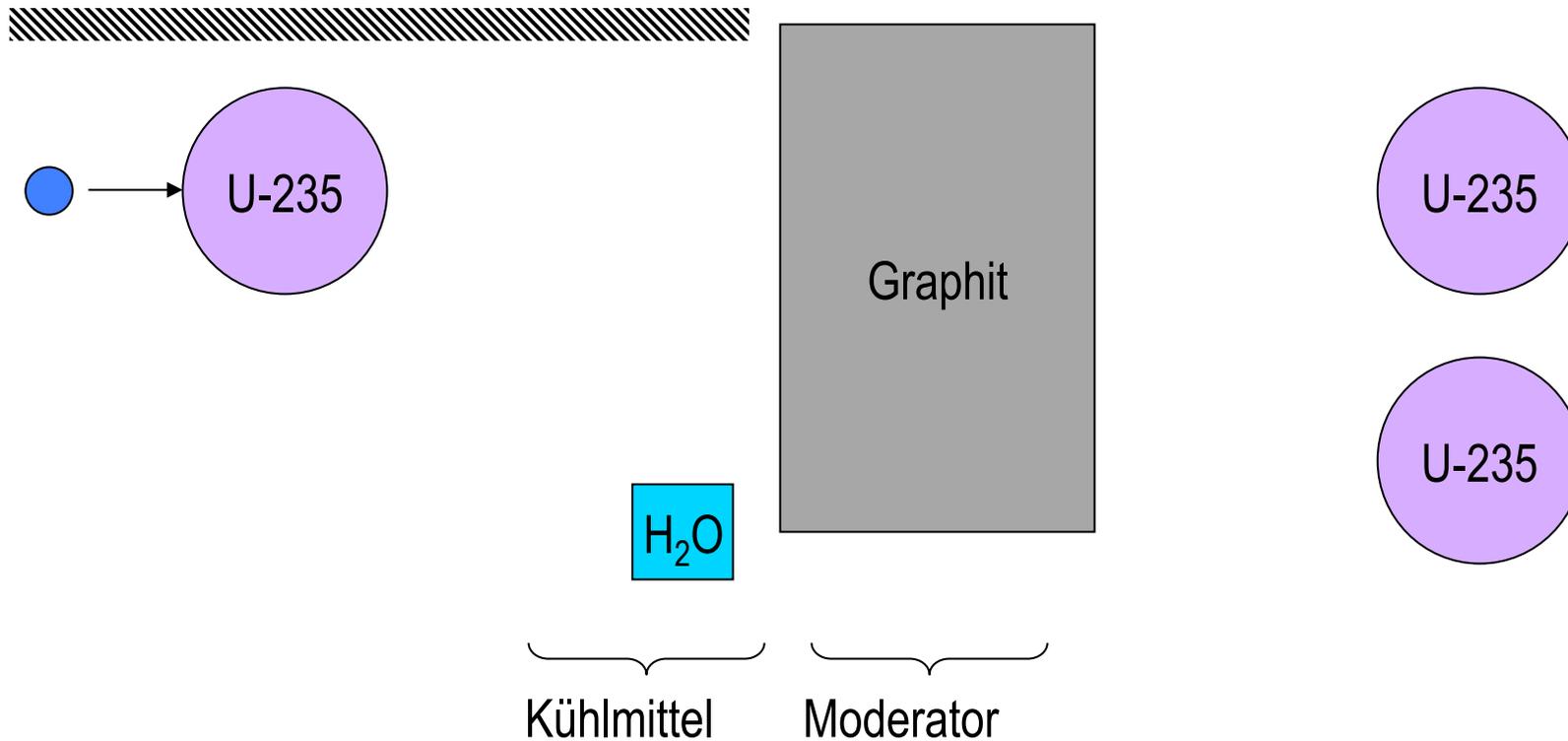
Negativer Dampfblasenkoeffizient
Kettenreaktion unter Kontrolle



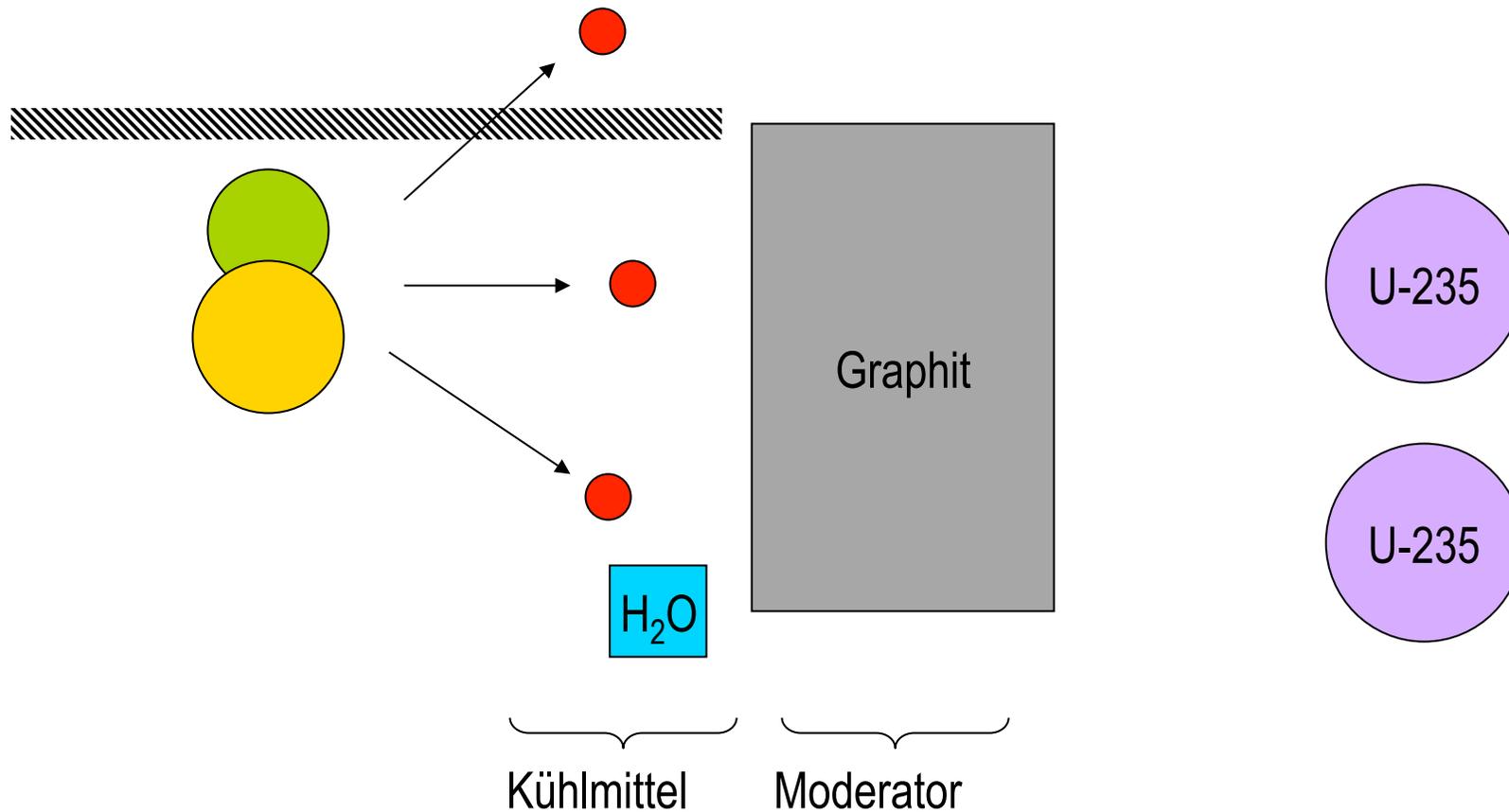




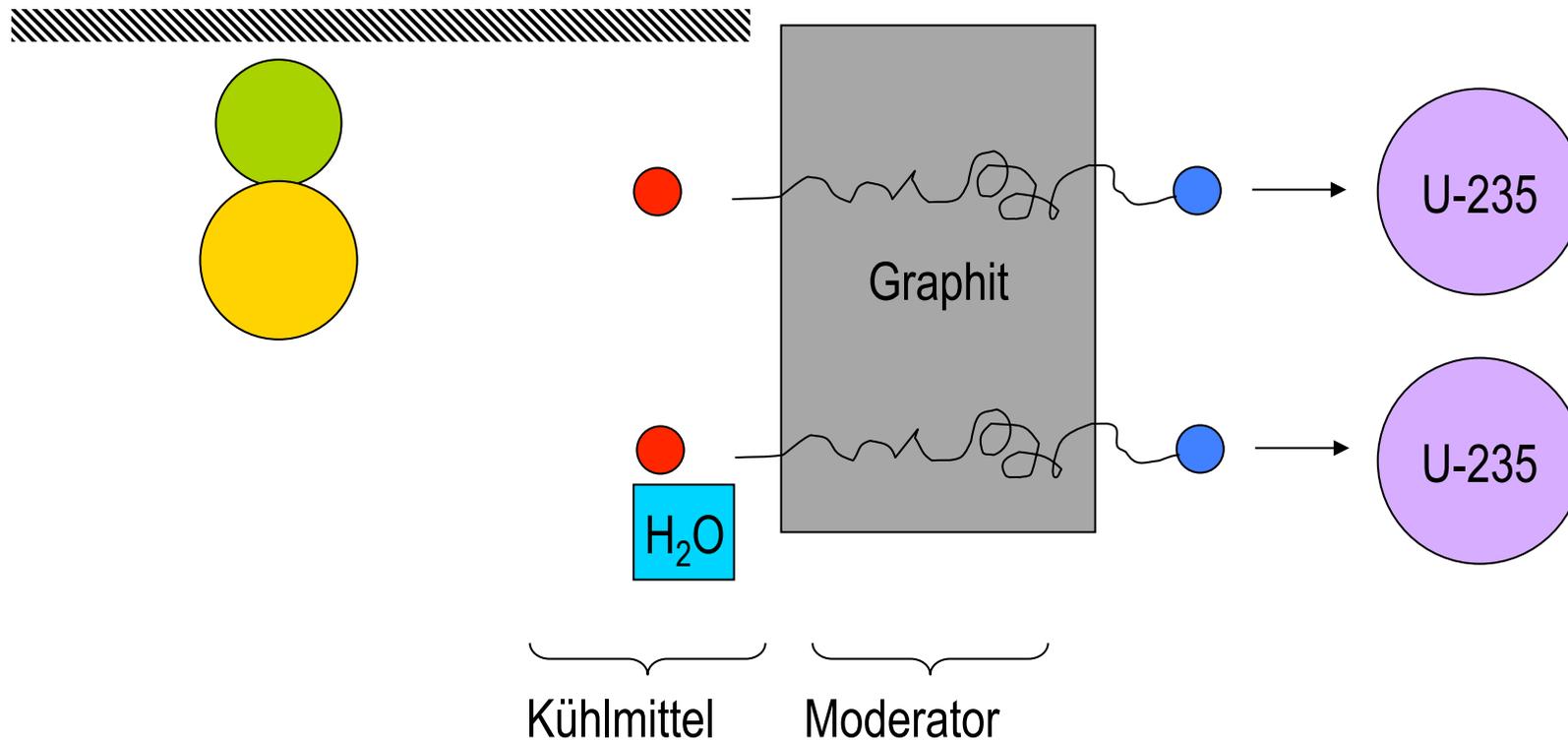




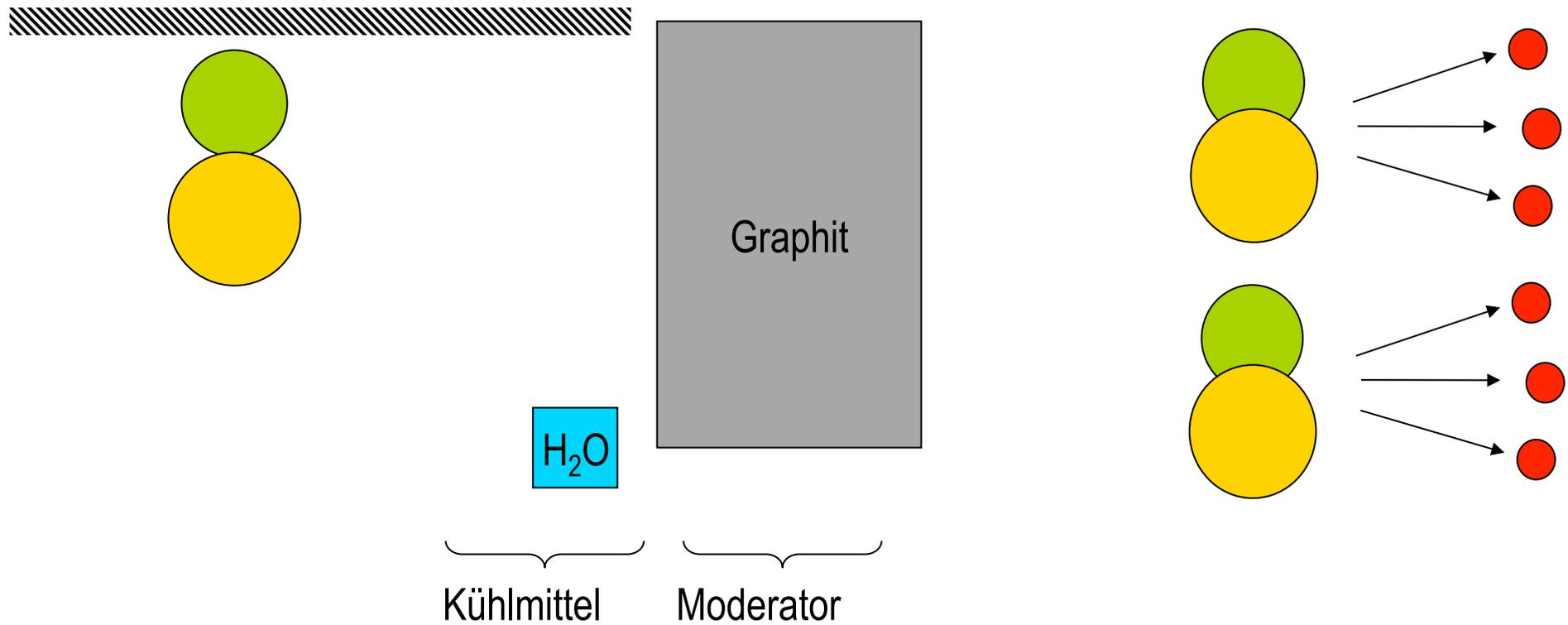
RBMK – Störung (zuviel Wasser verdampft)



RBMK – Störung (zuviel Wasser verdampft)

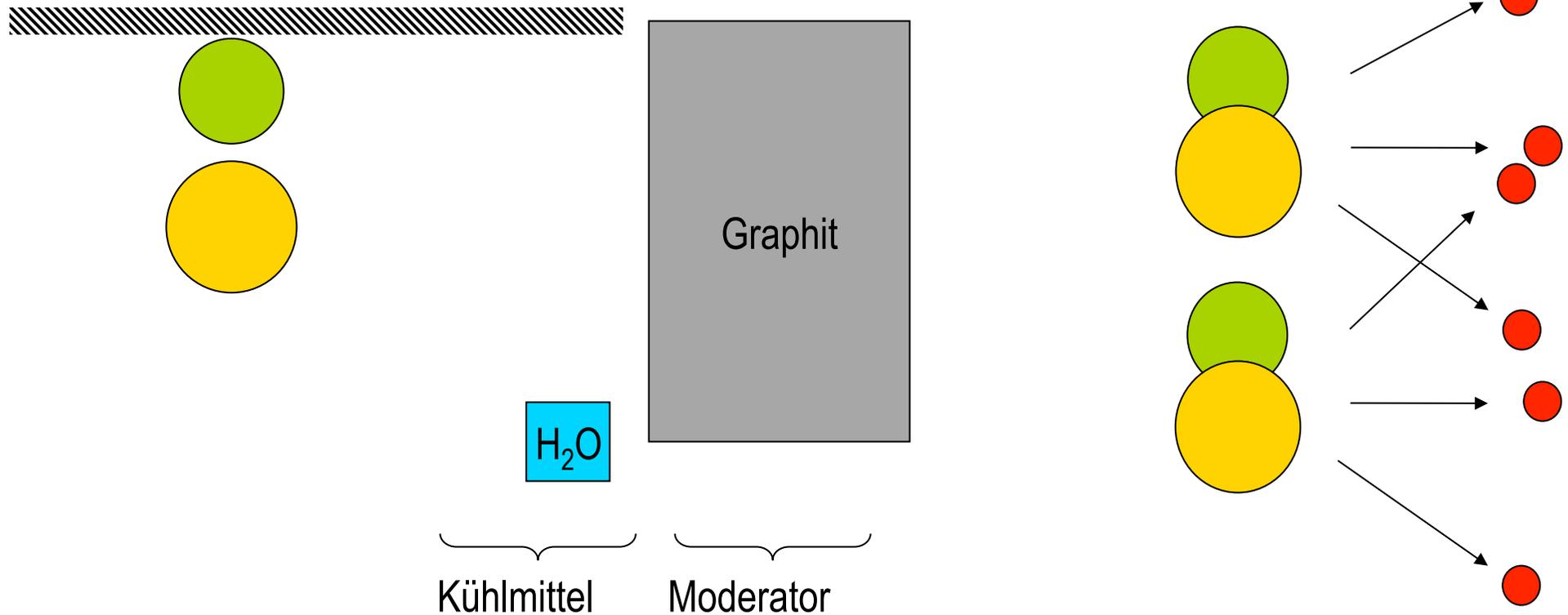


RBMK – Störung (zuviel Wasser verdampft)

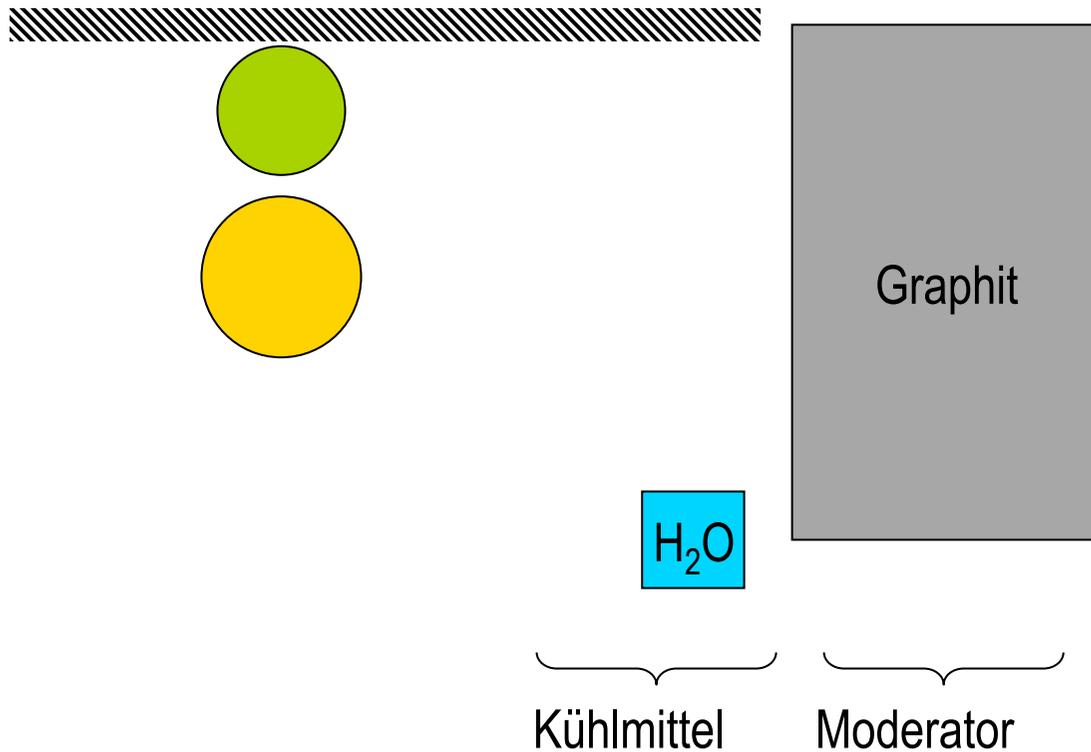


RBMK – Störung (zuviel Wasser verdampft)

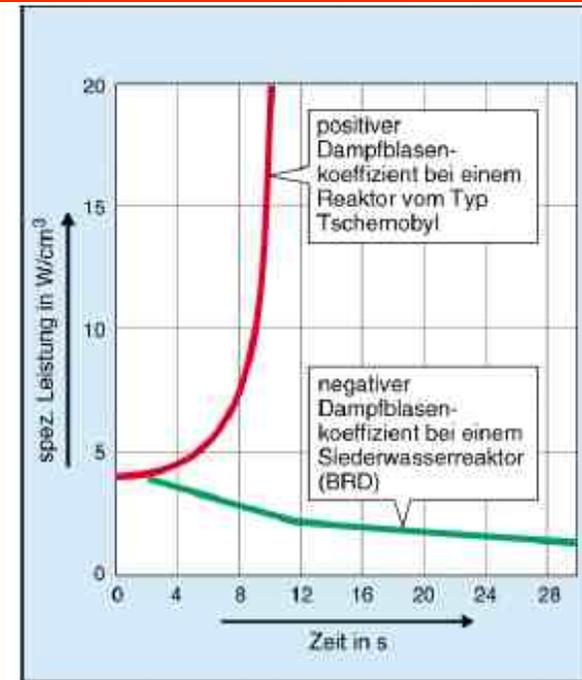
- Leistung steigt an
- Noch mehr Wasser verdampft



RBMK – Störung (zuviel Wasser verdampft)



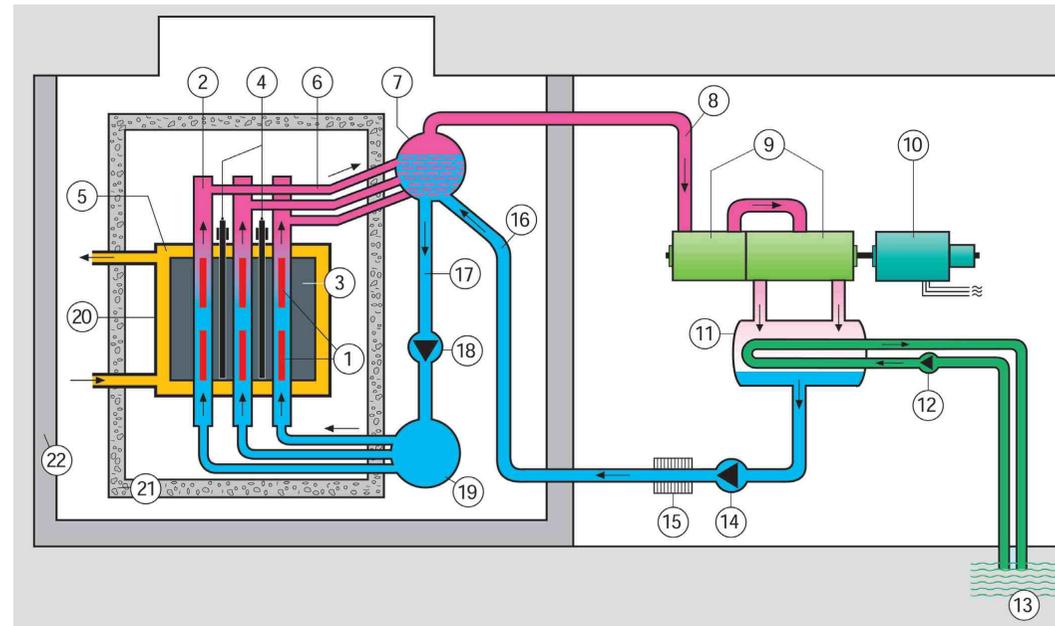
- Leistung steigt an
- Noch mehr Wasser verdampft



Verlauf der Reaktorleistung unter bestimmten Umständen bei positivem und negativem Dampfblasenkoeffizienten:

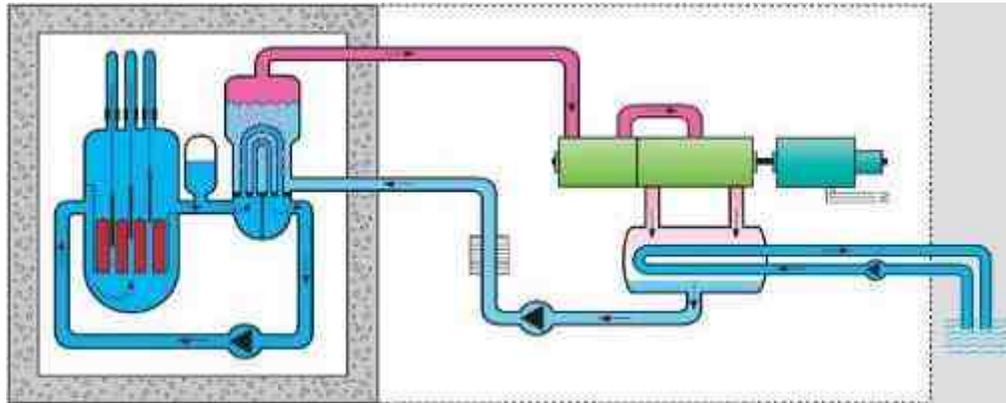
**Positiver Dampfblasenkoeffizient
Kettenreaktion ausser Kontrolle**

Der Tschernobyl-Reaktor (RBMK)



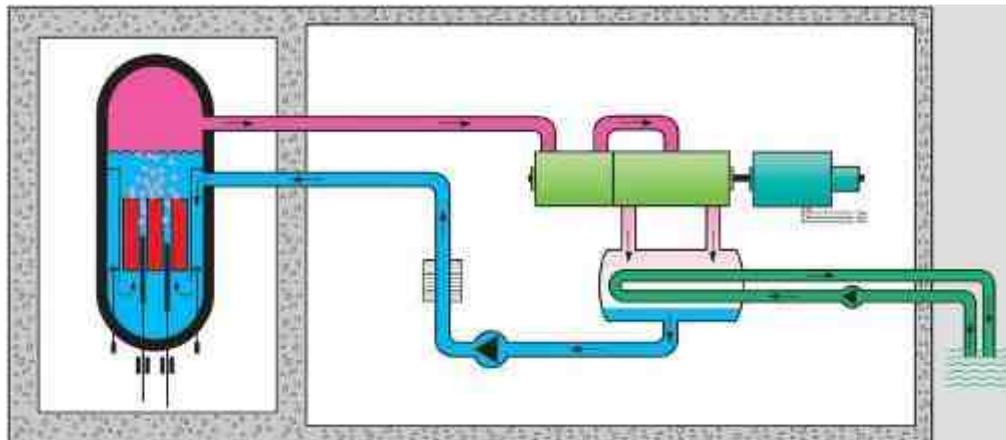
RBMK = Reaktor Bolshoi Moshnosty Kanalny = Hochleistungs-Reaktor mit Kanälen
(graphitmoderierter, wassergekühlter Siedewasser-Druckröhrenreaktor)

- Stammt ab vom sowjetischen Nuklearwaffenprogramm, diente zur Pu-Produktion (Schwerpunkt lag nicht auf Sicherheit) - Standardisierte Doppelblockanlagen mit 2 x 1000 Mwe
- **Kein Containment**
- **Kein Reaktordruckbehälter**
- **Positiver Dampfblasenkoeffizient**
- **Absorberstäbe hatten Endstücke aus Graphit**
- **Operateure hatten die Möglichkeit wichtige Sicherheitskreise zu deaktivieren, ohne dadurch eine Schnellabschaltung auszulösen**



Druckwasserreaktor (DWR)

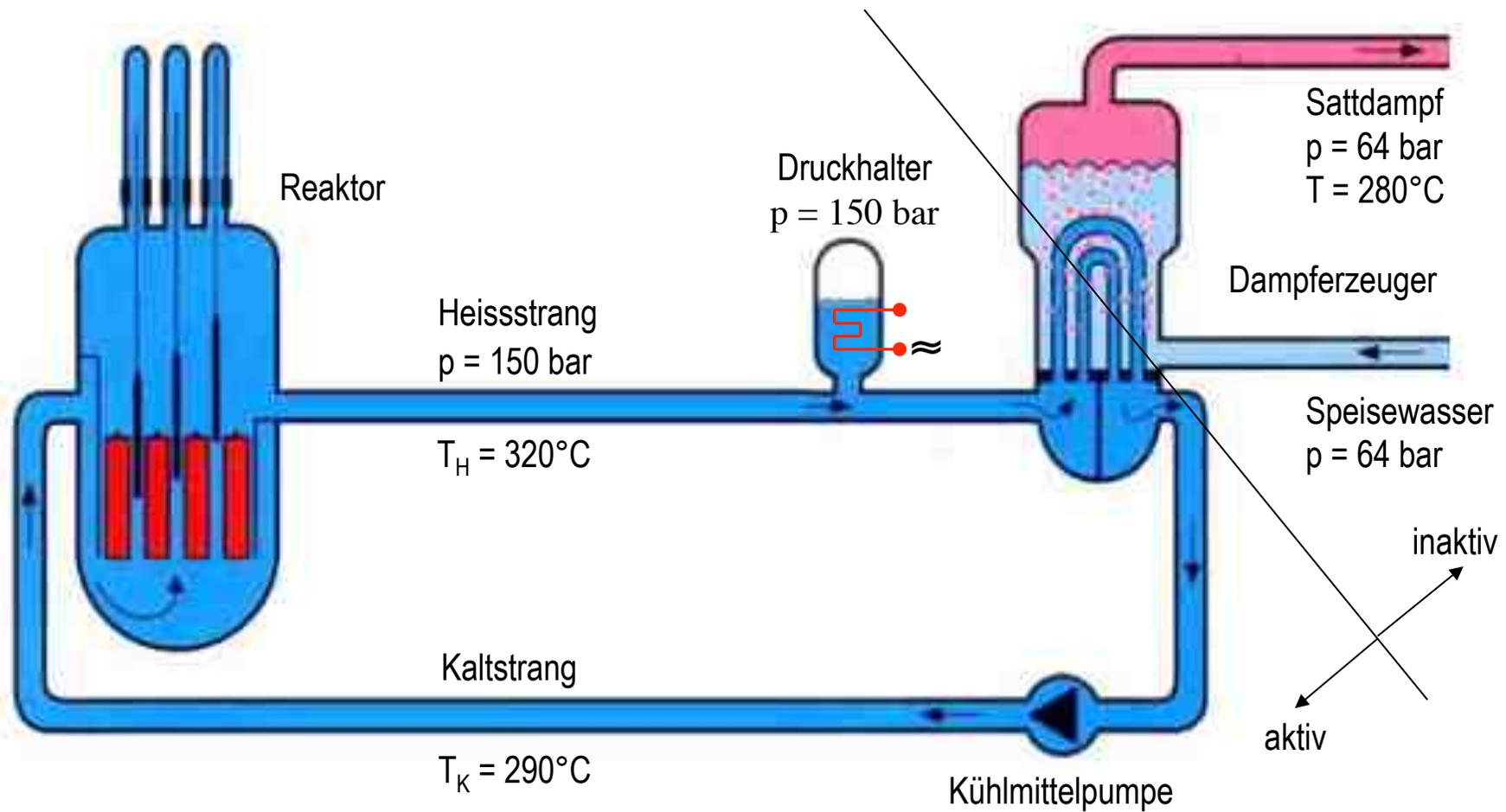
Gösgen
Beznau I+II



Siedewasserreaktor (SWR)

Leibstadt
Mühleberg

Energieumwandlung im Druckwasserreaktor



Spaltprodukte stark radioaktiv



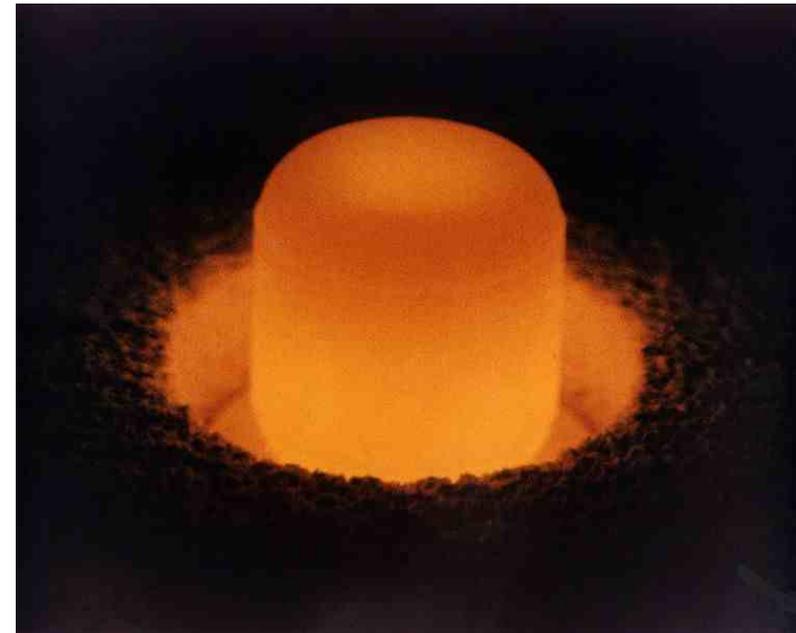
Hohe Radiotoxizität
und Wärmeentwicklung



Barrieren gegen Freisetzung von
radiotoxischen Stoffen notwendig



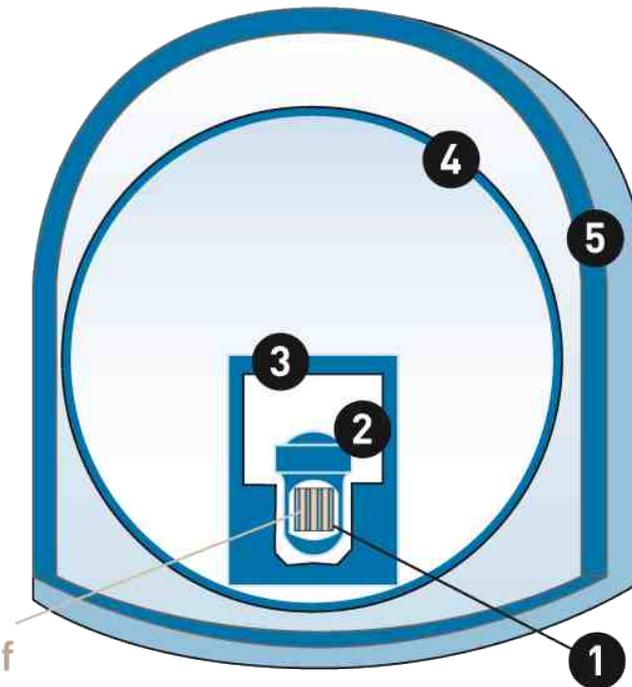
Herausforderung:
Gefährdung der Barrieren durch
Wärmeentwicklung



Stark radioaktives Material glüht auf, wenn
nicht ausreichend gekühlt

- 1. Barriere:** dicht verschweisste Hüllrohre
- 2. Barriere:** Reaktordruckbehälter aus extrem dickwandigem Spezialstahl
- 3. Barriere:** Betonkammer, «biologischer Schild»
- 4. Barriere:** druckfeste Sicherheitshülle aus Stahl
- 5. Barriere:** Reaktorgebäude aus meterdickem Beton

Kernbrennstoff



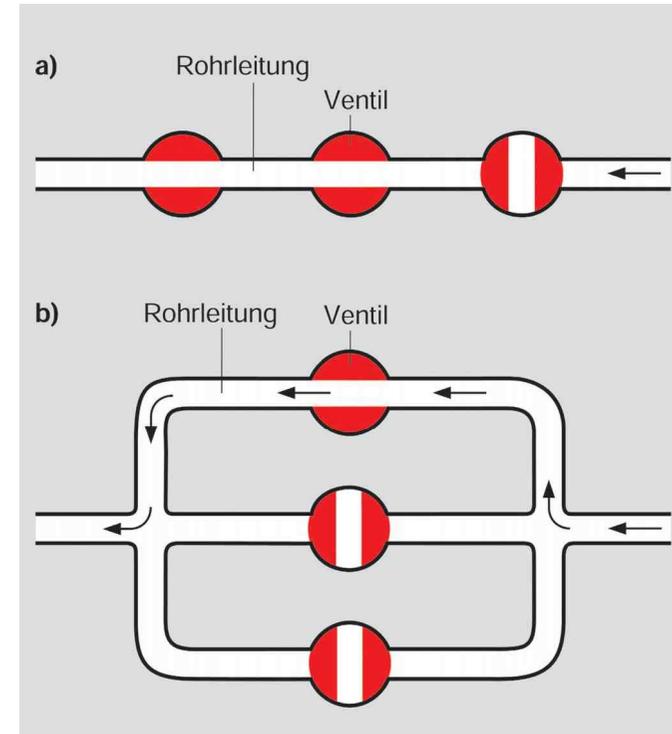
Tritt an einer Barriere ein Leck auf, sorgen die übrigen Barrieren weiterhin für Sicherheit

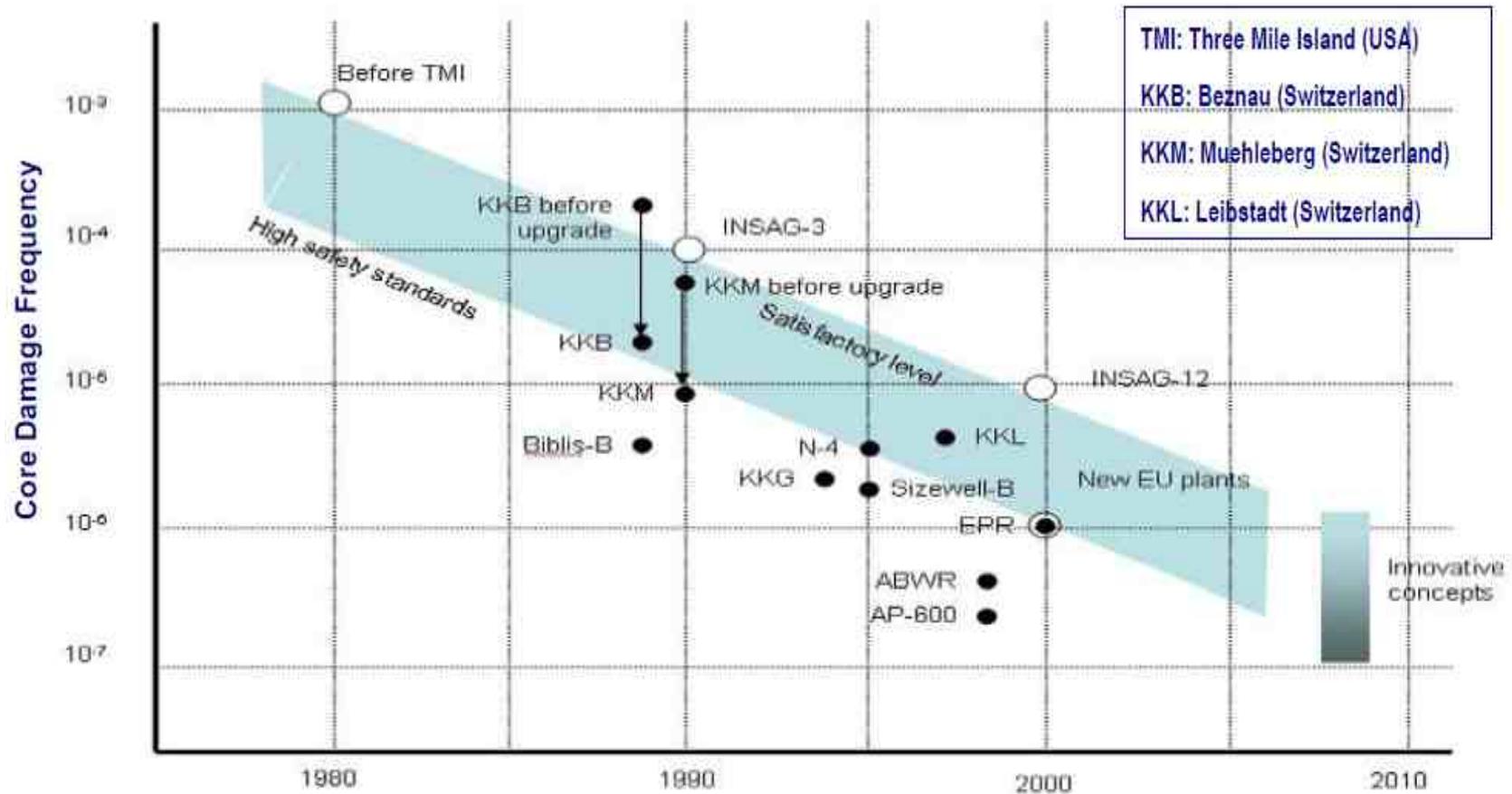
Gestaffelte Sicherheitsbarrieren

- Gegen die Ausbreitung von radioaktiven Stoffen

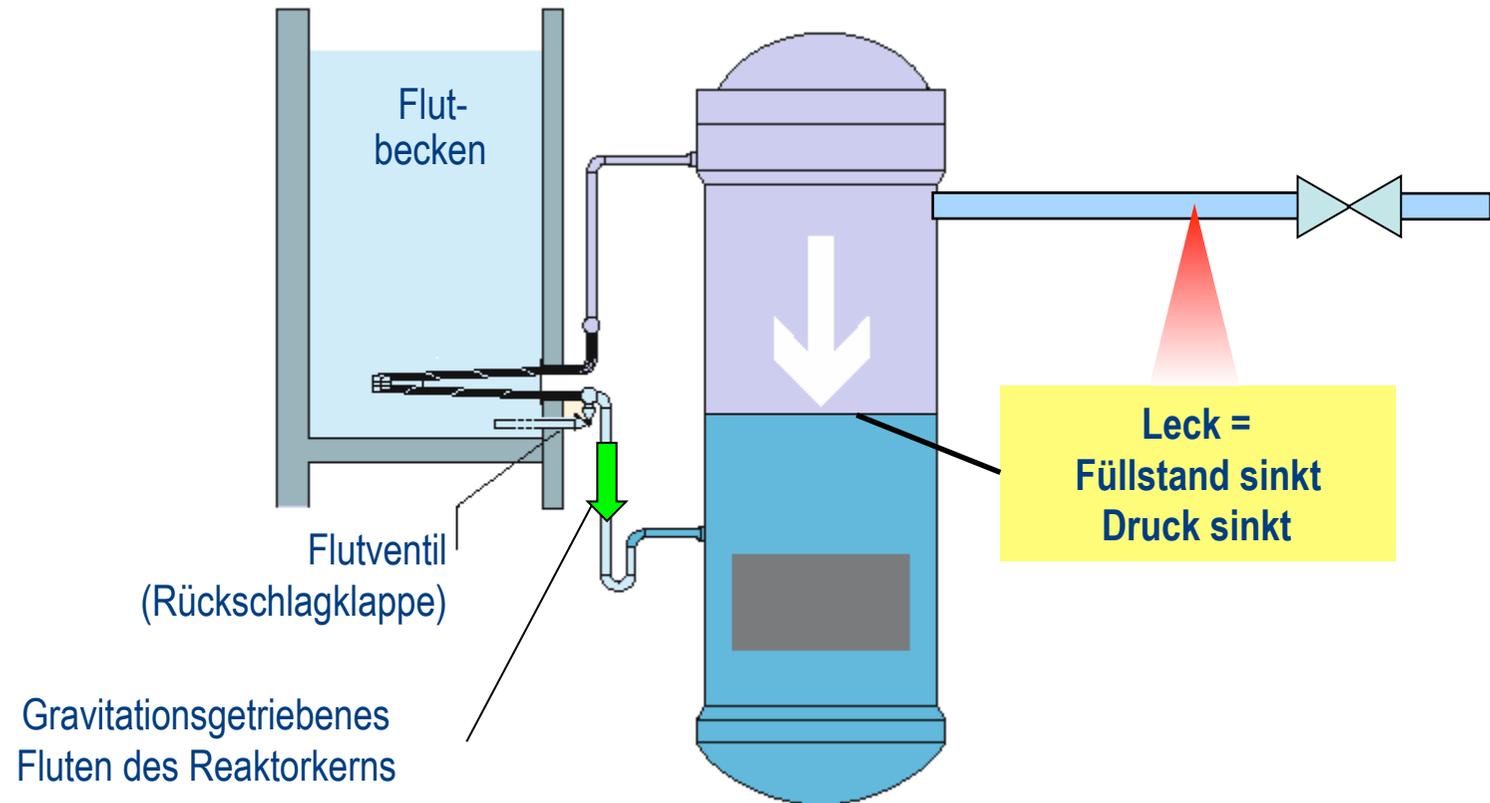
Auslegungsgrundsätze von Sicherheitssystemen

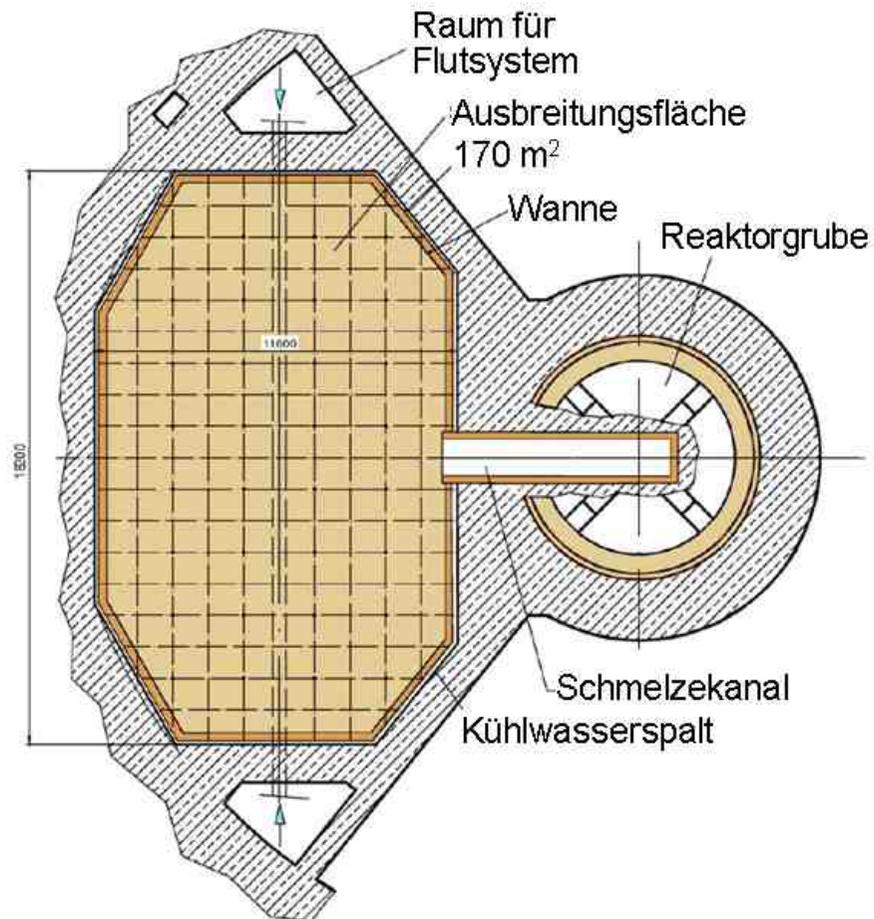
- Redundanz:** Mehrere identische Systeme (Stränge), die die gleiche Sicherheitsfunktion übernehmen (a schliessen; b öffnen)
- Diversität:** Systeme innerhalb der einzelnen Stränge müssen auf verschiedenen physikalischen Grundlagen beruhen
- Separation:** Die einzelnen Systemstränge müssen räumlich getrennt sein, um deren gleichzeitigen Ausfall infolge externer Events zu verhindern (Feuer, Überschwemmung, usw.)
- Automatische Funktion:** Betriebspersonal sollte nicht unter Stress reagieren müssen
- Test und Prüffähigkeit:** Während des Reaktorbetriebs
- Qualifikation:** Störfallfeste Auslegung





Hydrostatische Kernflutssysteme





Duales Core-Catcher-Konzept

- Einfluss des Szenarios auf Ausbreitungsvorgang minimiert
- Schutz der Ausbreitungskammer vor Kräften bei RDB-Versagen
- Schutz des Reaktorschachts bei unbeabsichtigtem Start des Flutens

Grossversuche zur Schmelzeausbreitung COMAS



W. Steinwarz et al., 2001



- www.euronuclear.org
 - www.world-nuclear.org
 - www.kernenergie.de
 - www.grs.de
 - www.nuklearform.ch
 - www.swissnuclear.ch
 - www.kernfachleute.ch
-