„Der Unfall in Tschernobyl – Erklärungen und Folgen“

K. Kugeler, I. Tragsdorf, N. Pöppe

Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und –technik der RWTH Aachen

Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik des Forschungszentrums

Vortrag bei der DPG, 15.03.06 Heidelberg

Inhalt des Vortrags

- **Überblick über den Unfall und seine Folgen**
- **Aufbau von RBMK-Anlagen**
- **Verläufe von Leistung, Reaktivität, Brennstofftemperatur**
- **Erklärungen zum neutronischen Geschehen**

  (positiver Voidkoeffizient, nukleare Exkursion)
- **Erklärungen zum energetischen Geschehen**

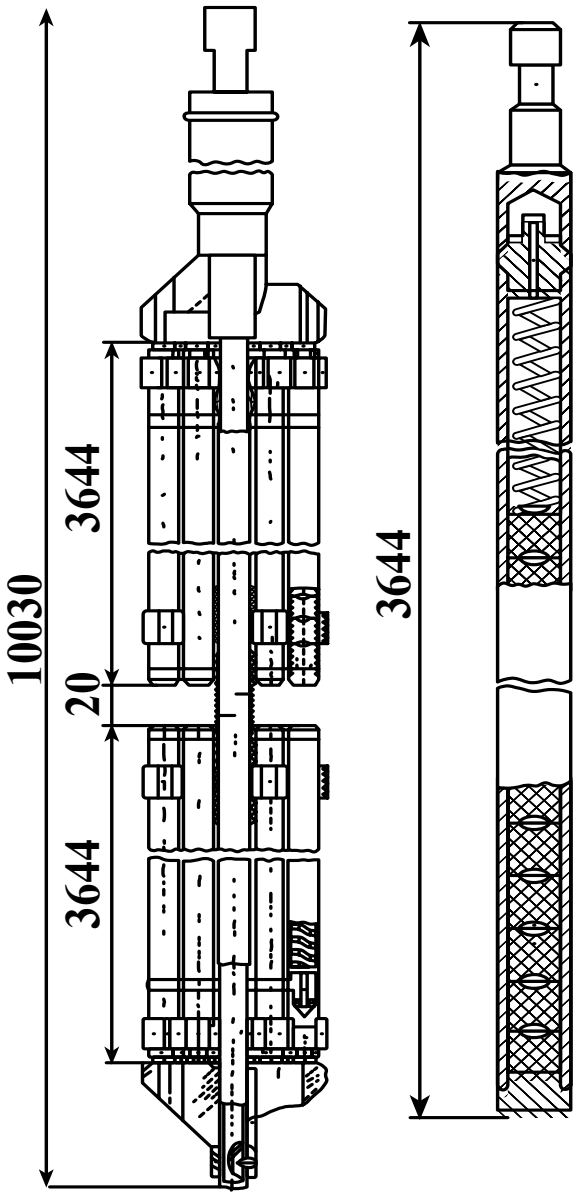
  (Wärme aus der Exkursion, Wasserstoffreaktion, Grafitbrand)
- **Zerstörungen an der Anlage**

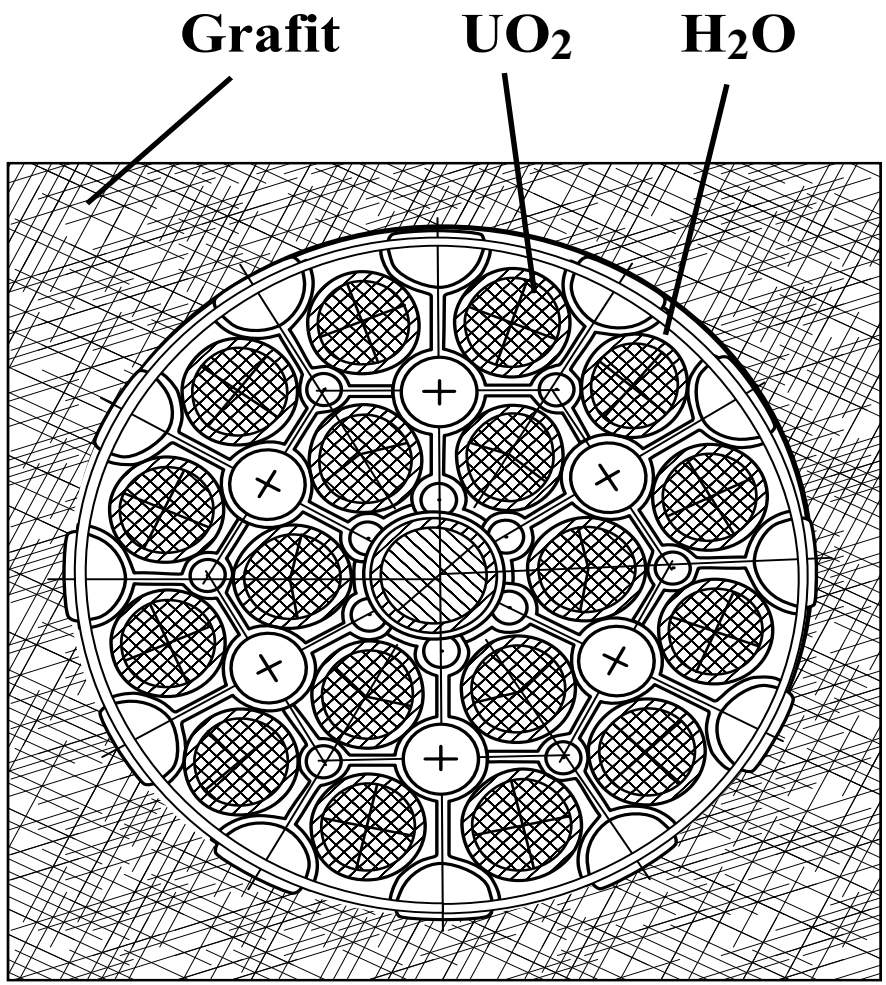
  (Verbleib des Coriums, Spaltstoffverteilung, Sarkophag)
- **Kontamination von Gebieten**
- **Verbesserungen bei laufenden RBMK-Anlagen**
- **Anforderungen an eine zukünftige katastrophenfreie Kerntechnik**

Überblick über Unfall und Folgen

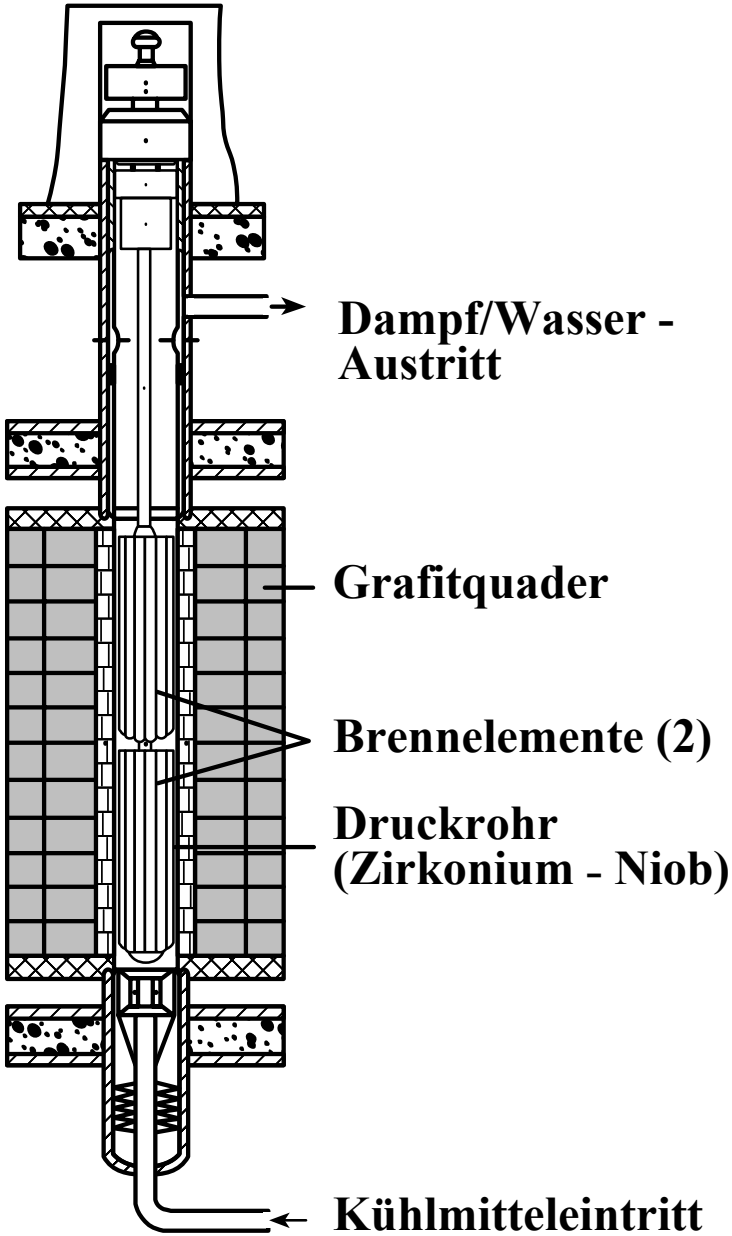
- **Bei einem Experiment kam es aufgrund eines positiven Reaktivitätskoeffizienten zu einer starken nuklearen Exkursion.**
- **Der Reaktor wurde durch Kernschmelzen, Bildung großer Wasserstoffmengen und anschließenden Grafitbrand vollständig zerstört.**
- **Große Mengen an Spaltprodukten und -stoffen wurden in die Umwelt freigesetzt. Durch den starken Auftrieb kam es zur Verteilung von Radioaktivität bis nach Westeuropa.**
- **Große Landflächen wurden kontaminiert.**
- **Viele Menschen mussten evakuiert und später umgesiedelt werden.**
- **Es gab Soforttote und Menschen, die an den Spätfolgen gestorben sind.**
- **Um die zerstörte Anlage wurde ein Sarkophag gebaut, der auch heute noch eine sehr unvollkommene Lösung darstellt.**
- **Der materielle Schaden und die Auswirkungen auf die Akzeptanz der Kernenergie waren verheerend.**

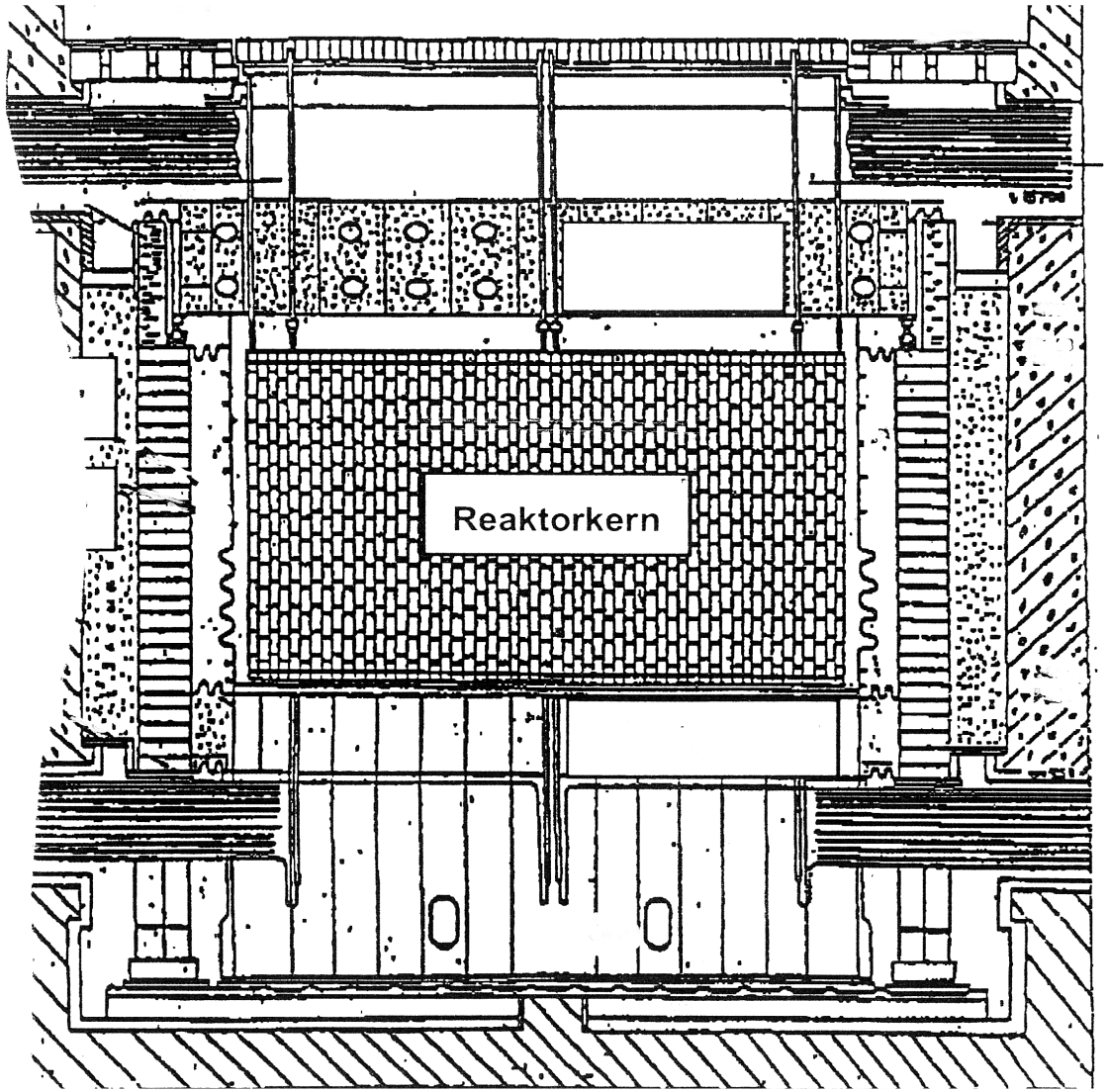
Brennelemente des RBMK-Reaktoren



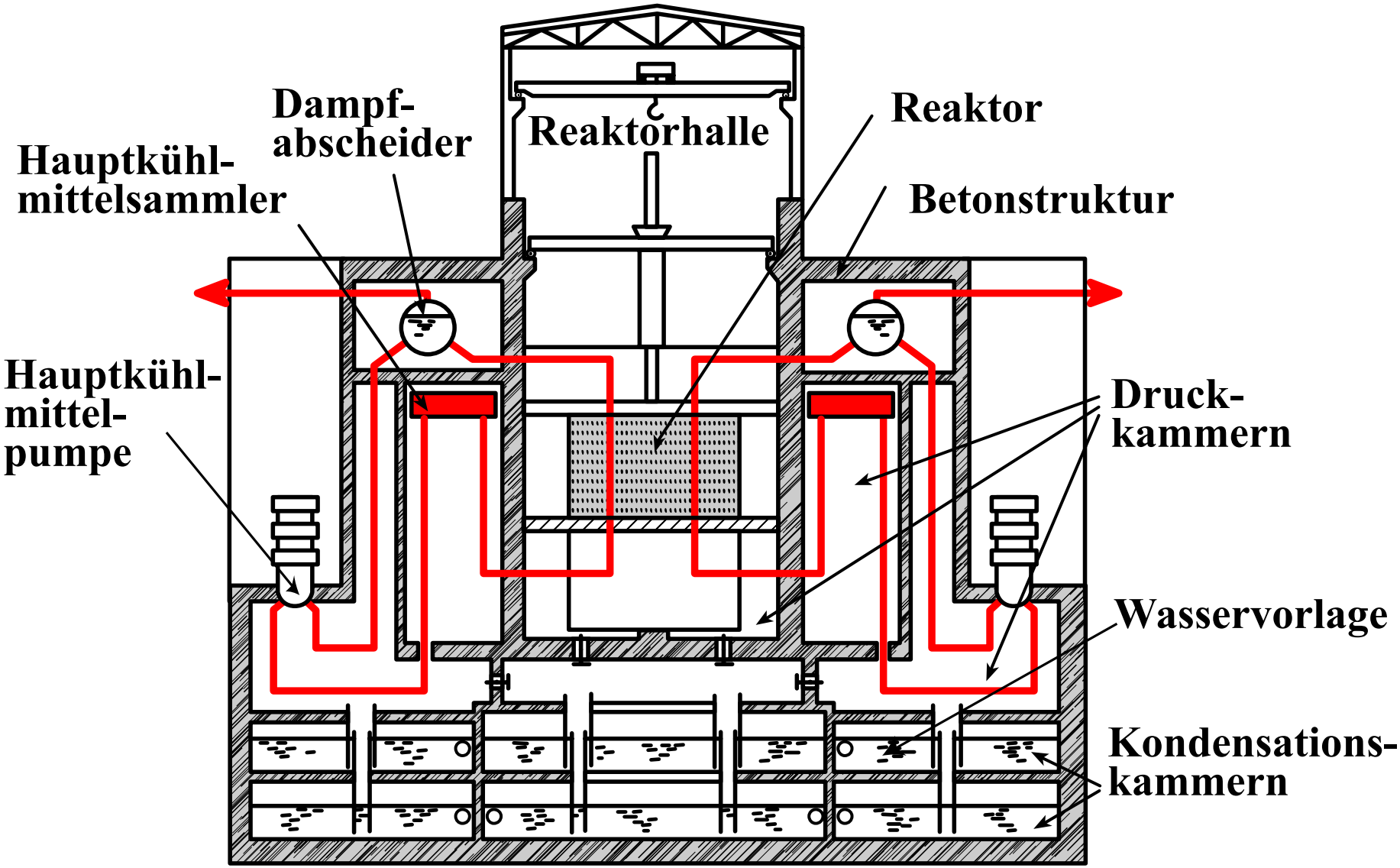


Coreaufbau von RBMK-Reaktoren

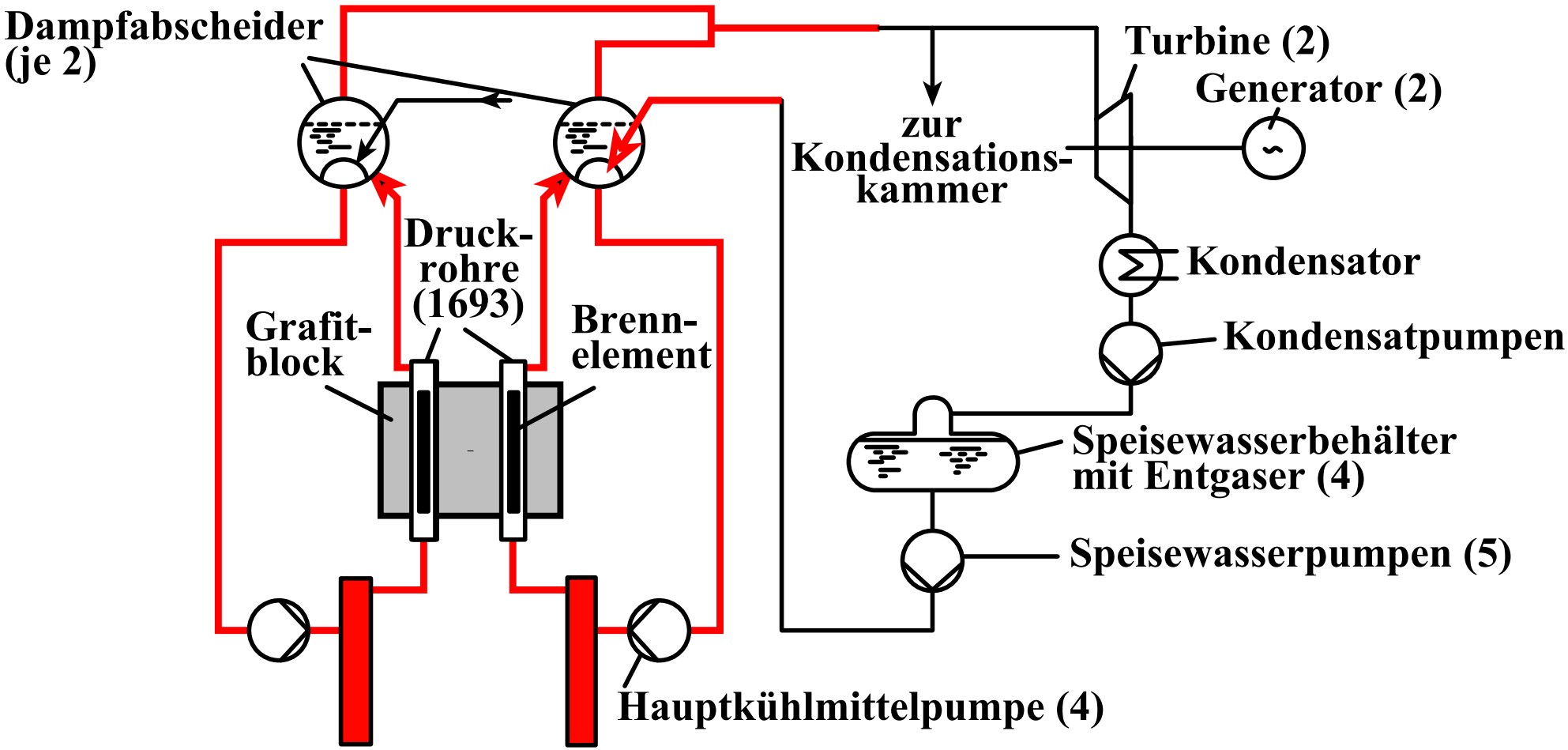




Reaktorgebäude von RBMK-Anlagen



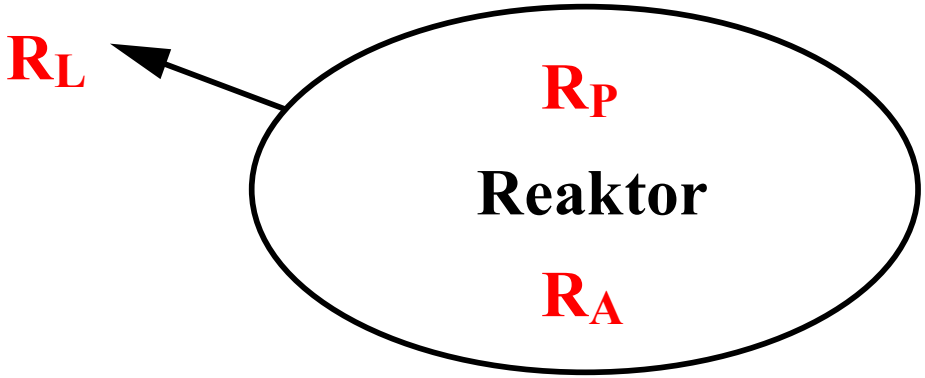
Prinzipschaltung der RBMK-Anlagen



Ablauf des Unfallgeschehens

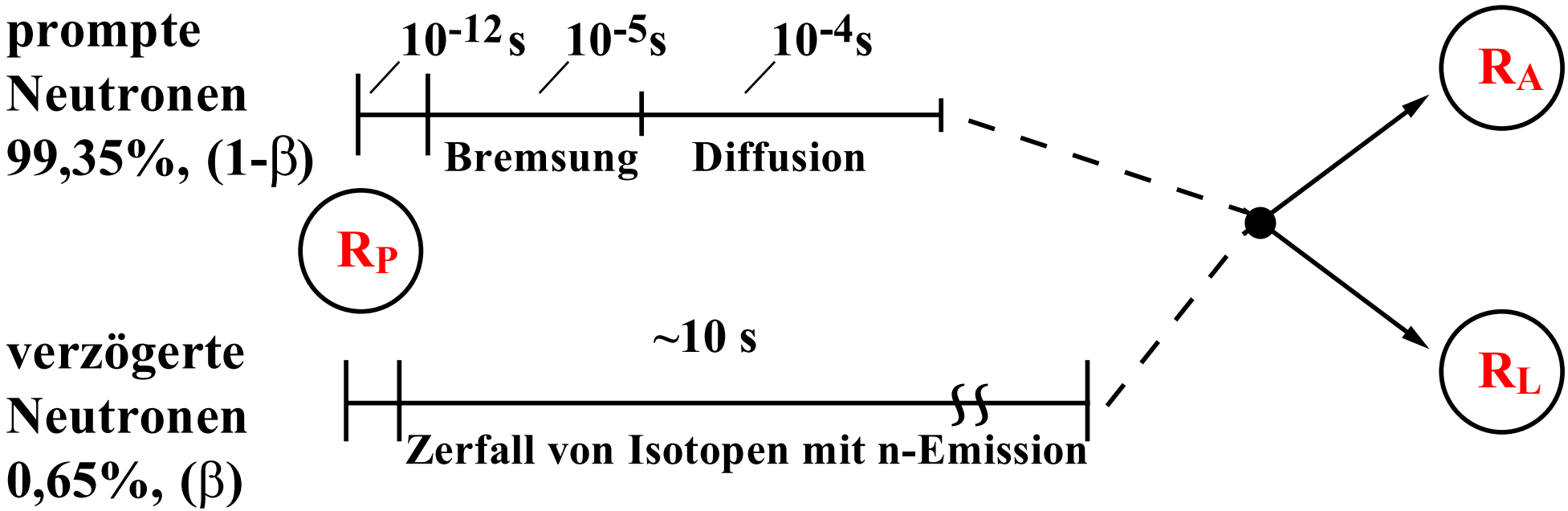
- **Versuch: Weiterlauf eines Generators zur Eigenbedarfsdeckung**
- **Reduktion des Kühlwasserstroms ($P^0_{th} \approx 7\%$) führte zur erhöhten Dampfbildung in Druckrohren**
- **Wegen des positiven Dampfblasenkoeffizienten erfolgte eine Leistungssteigerung → Faktor 100**
- **Reaktorschnellabschaltung von Hand war praktisch unwirksam für die Exkursion**
- **hohe Leistung erzeugte hohe Brennstofftemperaturen → Schmelzen**
- **durch Reaktion von Zirkaloy und Dampf wurde Wasserstoff erzeugte → Explosion**
- **Grafit wurde aufgeheizt, geriet in Brand → starker Auftrieb von radioaktiven Stoffen in die Atmosphäre**

Kritikalität eines Reaktors

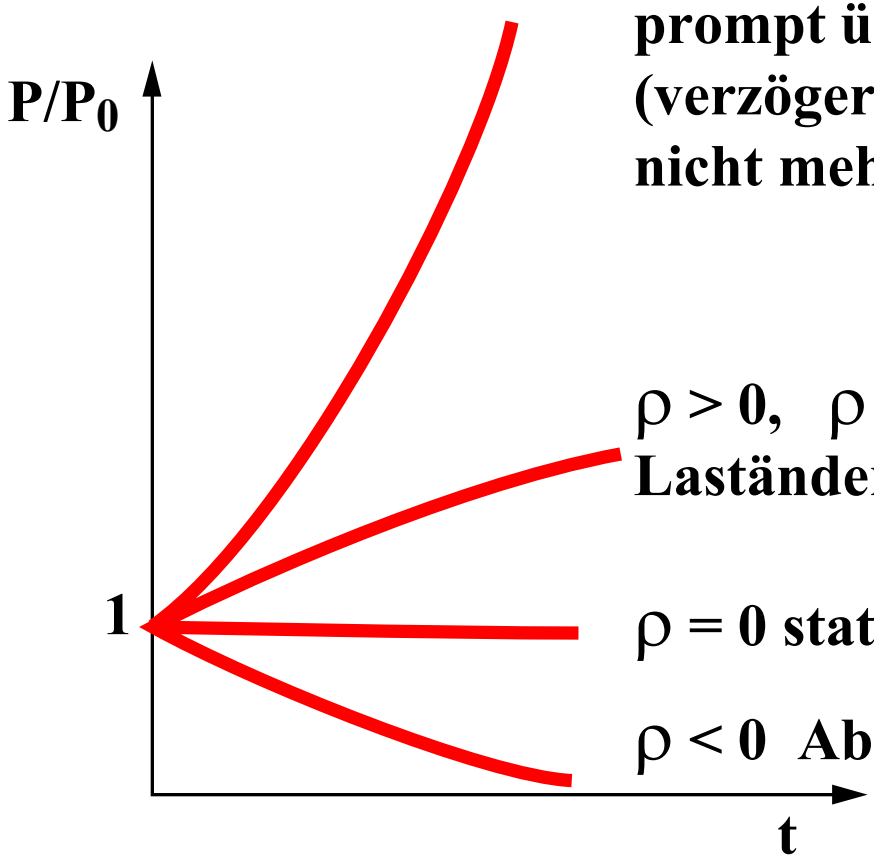


$$k_{eff} = \frac{R_P}{R_A + R_L} = 1$$

$$R_P = R_A + R_L$$



Reaktorverhalten bei Reaktivitätsänderungen



$\rho > 0, \rho > \beta$
prompt überkritisch (verzögerte Neutoren sind nicht mehr wirksam)

$\rho > 0, \quad \rho < \beta$
Laständerungen, Anfahren

$\rho = 0$ **stationärer Betrieb**

$\rho < 0$ **Abschalten**

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

$\beta = 0{,}65\%$ **für** ^{235}U
(0,22% für ^{239}Pu**)**

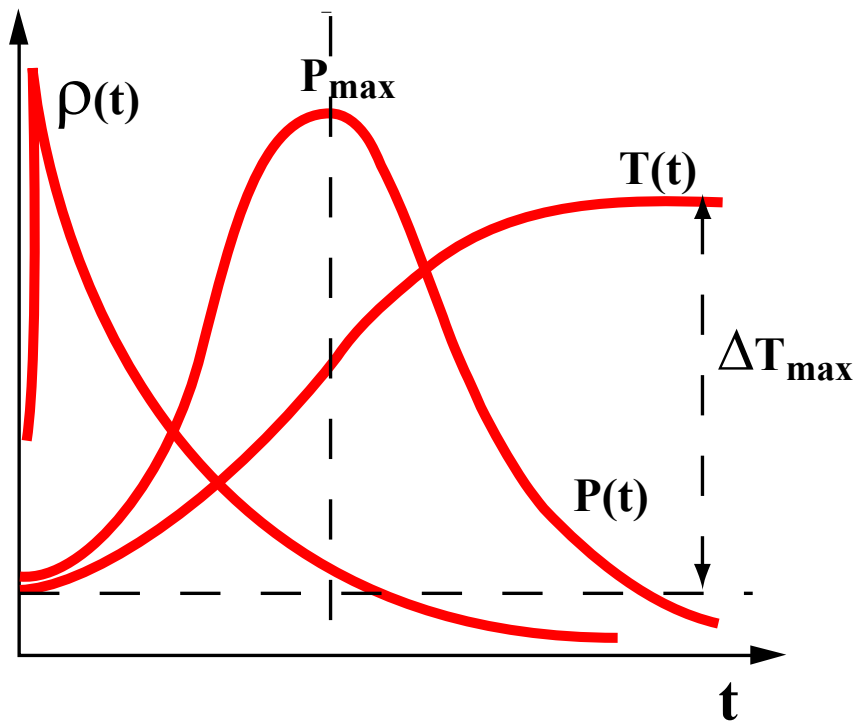
$$\phi \approx \phi_0 \cdot \exp\left(\frac{\rho}{l} \cdot t\right), \quad P \approx \phi,$$

$l =$ **Neutronenlebensdauer**

prompte nukleare Transiente (mit neg. Rückkop.)

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho_0 \pm \Gamma_i \cdot \Delta x_i}{l} \cdot n, \qquad \frac{1}{T_0} = \frac{\rho_0}{l}$$

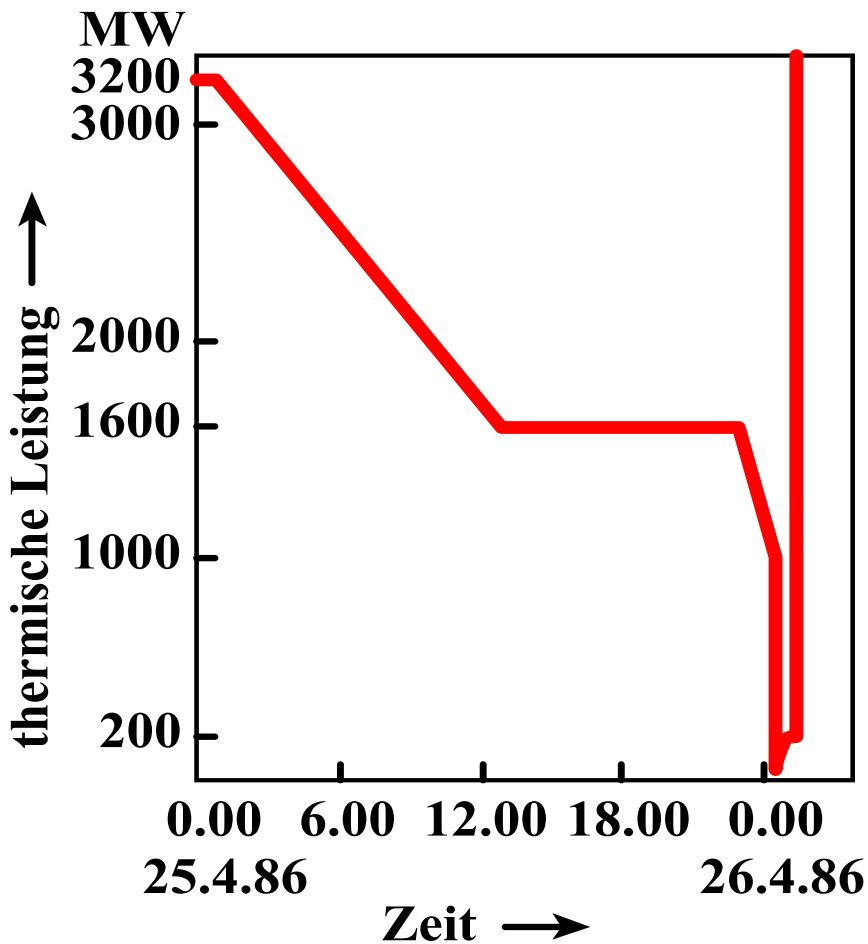
$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{T_0} \cdot P \pm \frac{\Gamma_i}{l \cdot M \cdot c} \cdot P \cdot \int_0^t P(t') \cdot dt', \qquad b = \frac{\Gamma_i}{l \cdot M \cdot c}$$

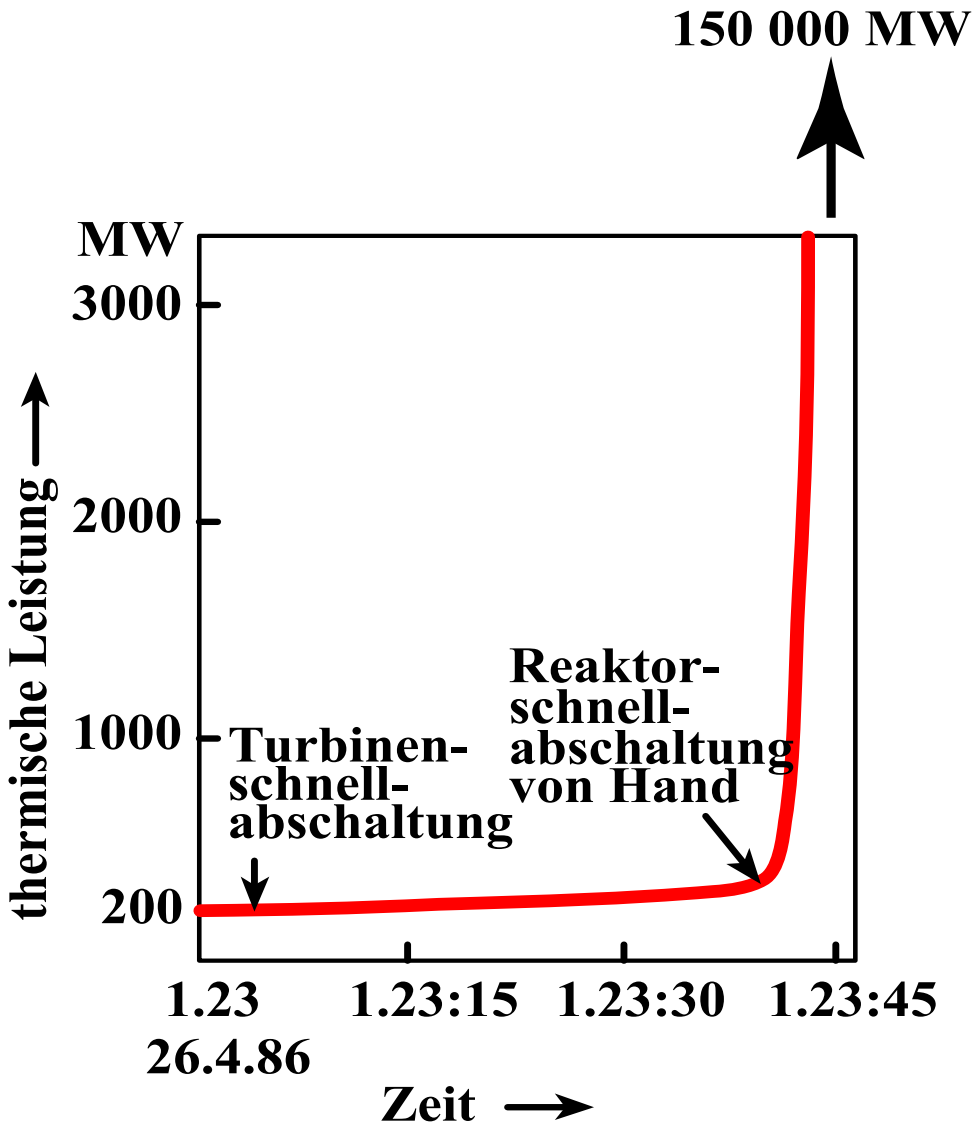


$$P_{max} \approx \frac{1}{T_0^{\,2}} \cdot \frac{1}{b}$$

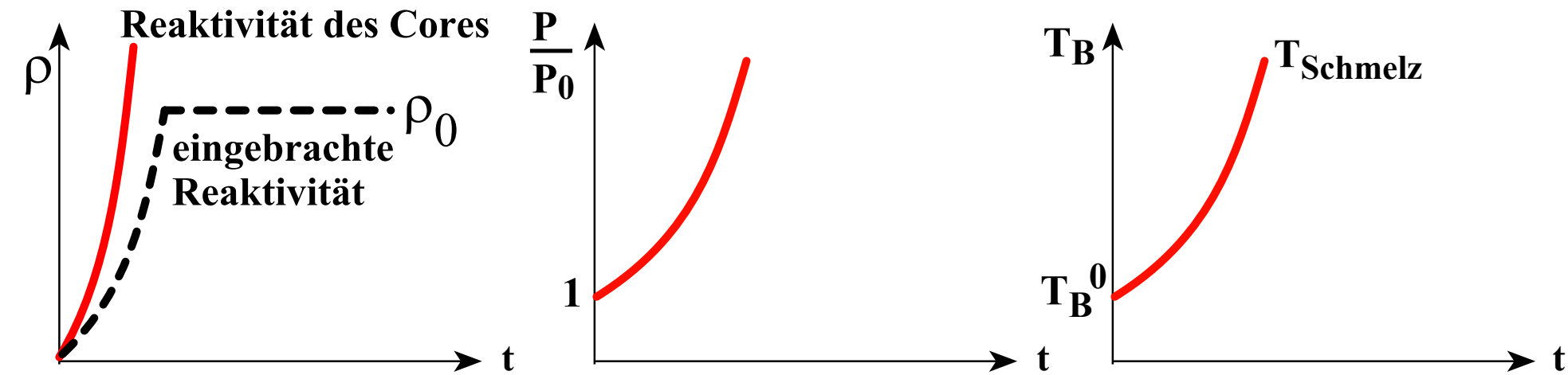
$$\Delta T_{max} \approx \frac{1}{T_0} \cdot \frac{1}{b \cdot M}$$

Leistung vor und während des Unfalls

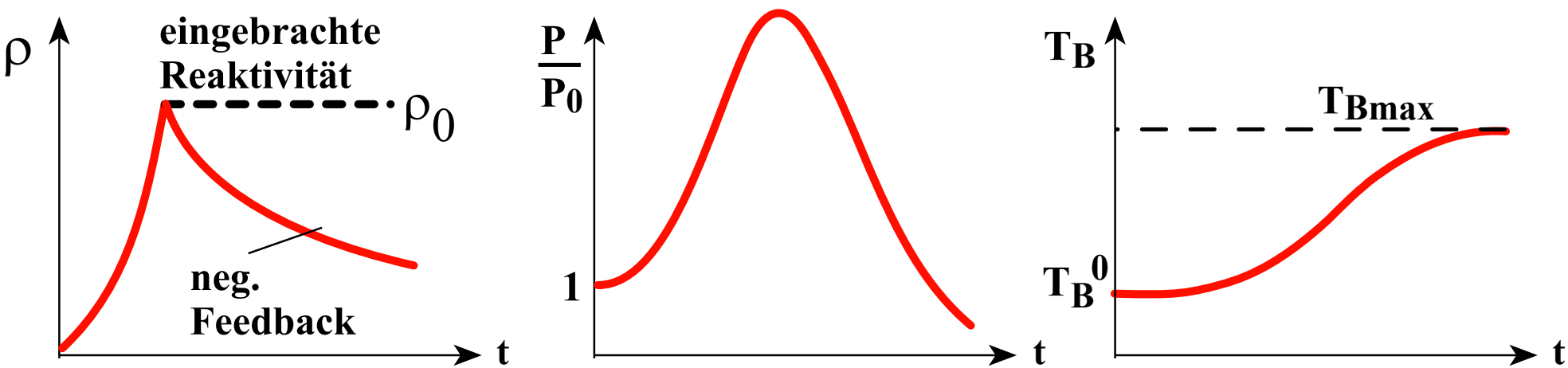




Prompte nukleare Exkursionen

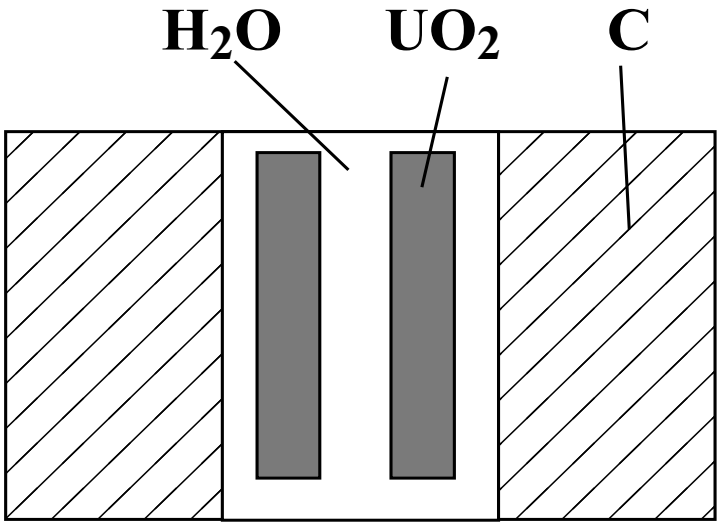


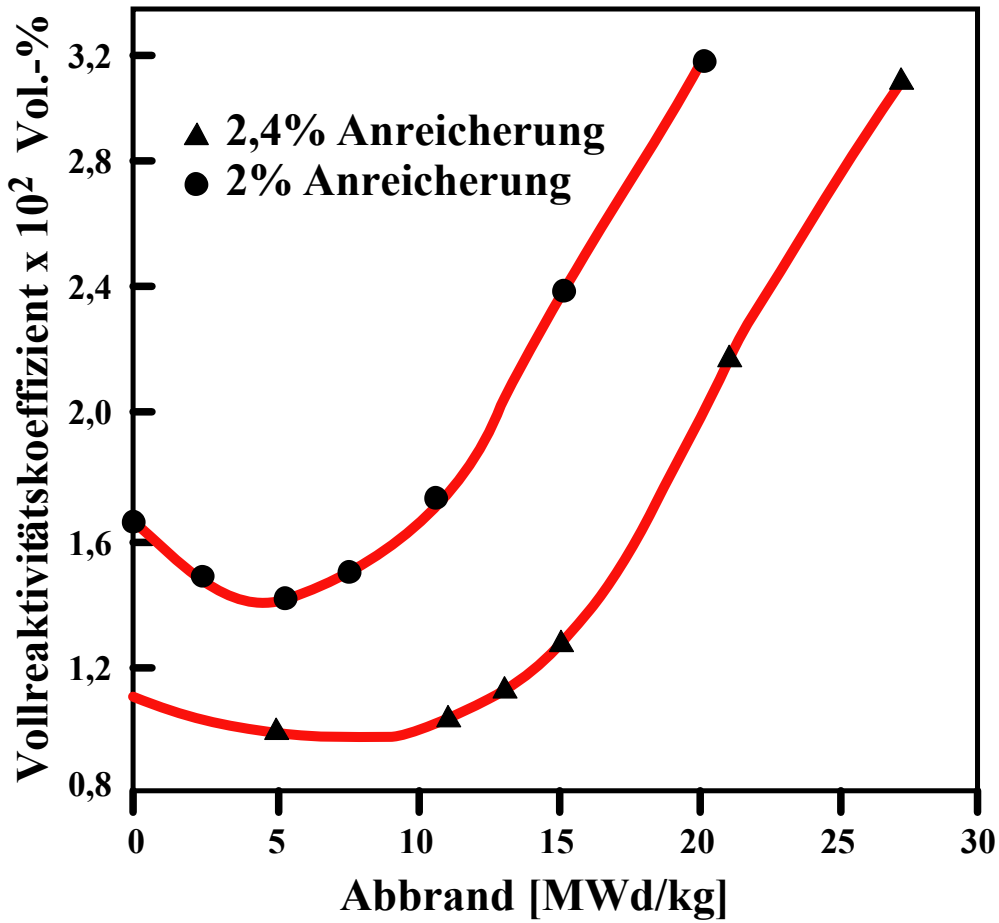
ohne bzw. mit positiver Rückkopplung



mit negativer Rückkopplung

Voideffekt – Erklärung





Normalbetrieb

$$k_{eff} = \frac{R_P}{R_A(H_2O) + R_A(C) + R_A(B) + R_L} = 1$$

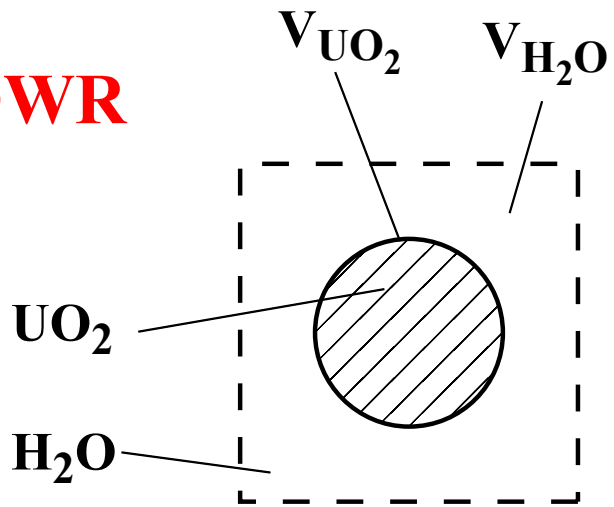
Störfall Kühlmittelverlust

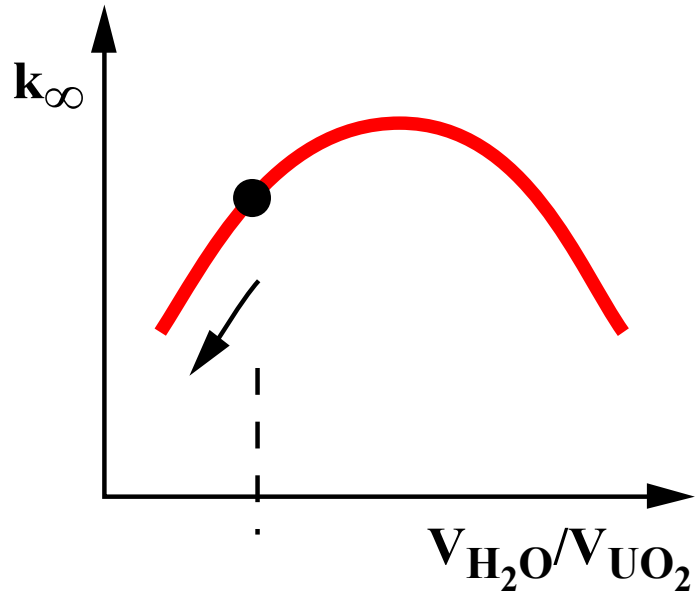
$$k_{eff}^{*} = \frac{R_P}{R_A(C) + R_A(B) + R_L} > 1$$

$$R_P = \iint \nu \cdot \Sigma_f \cdot \phi \cdot dE \cdot dV \qquad R_A = \iint \Sigma_a \cdot \phi \cdot dE \cdot dV$$

Voideffekt bei DWR und RBMK-Reaktoren

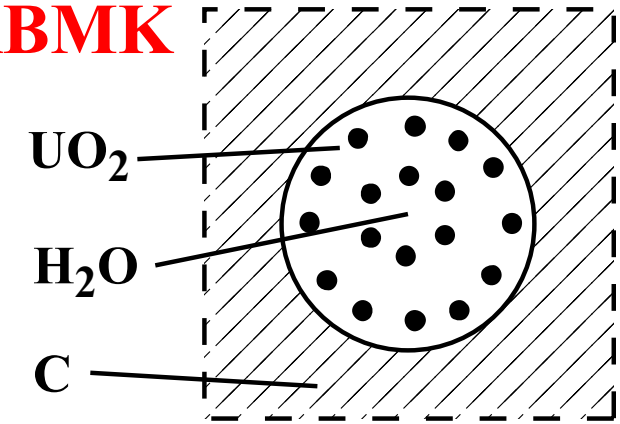
DWR

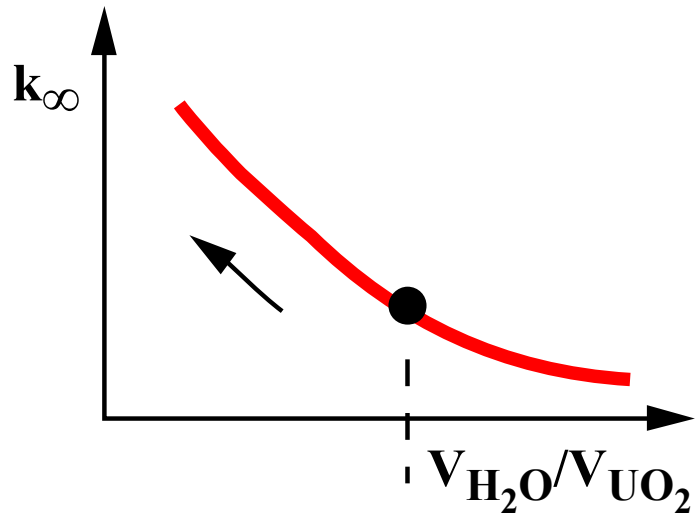




negativer Voideffekt bei Kühlmittelverlust

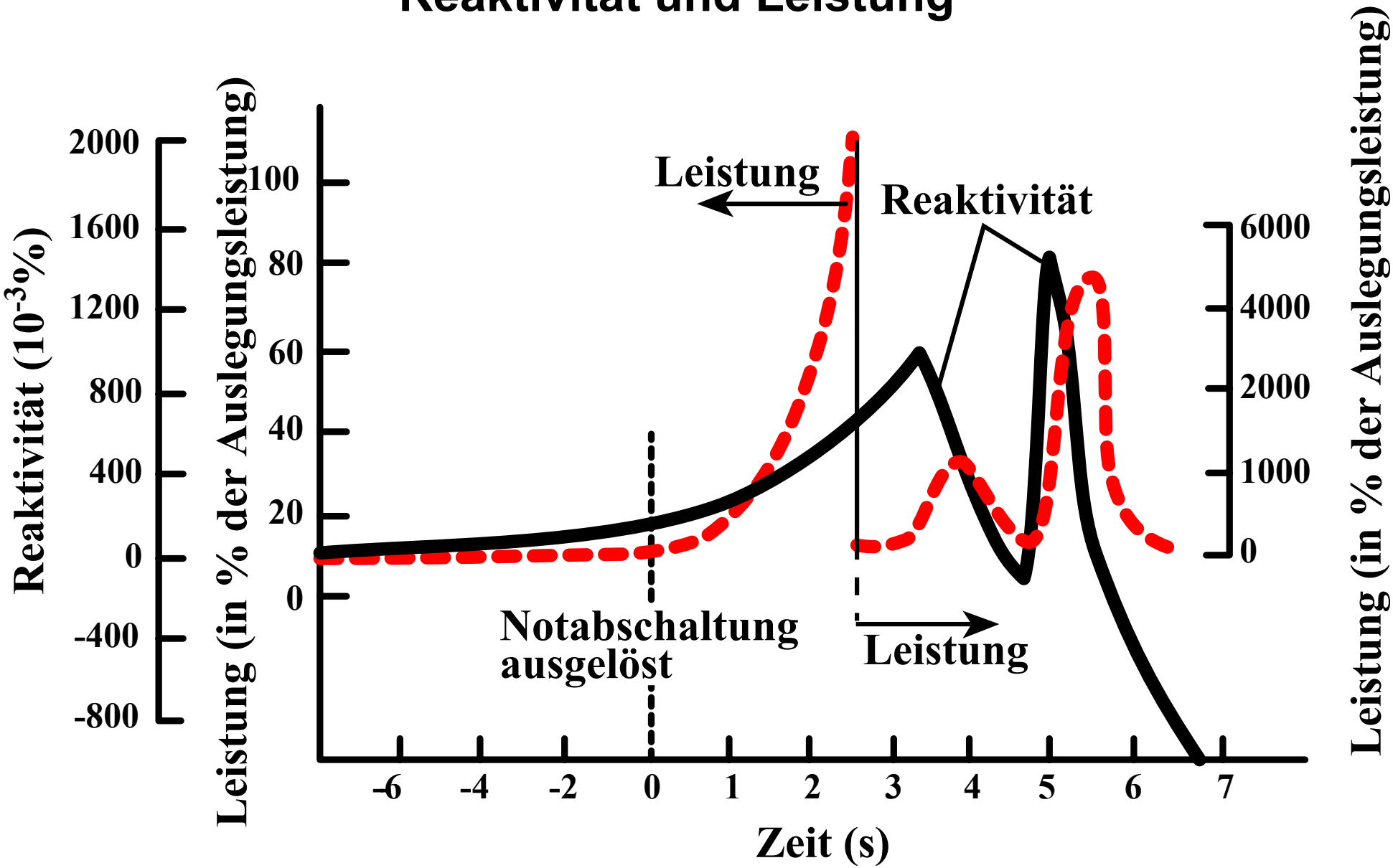
RBMK



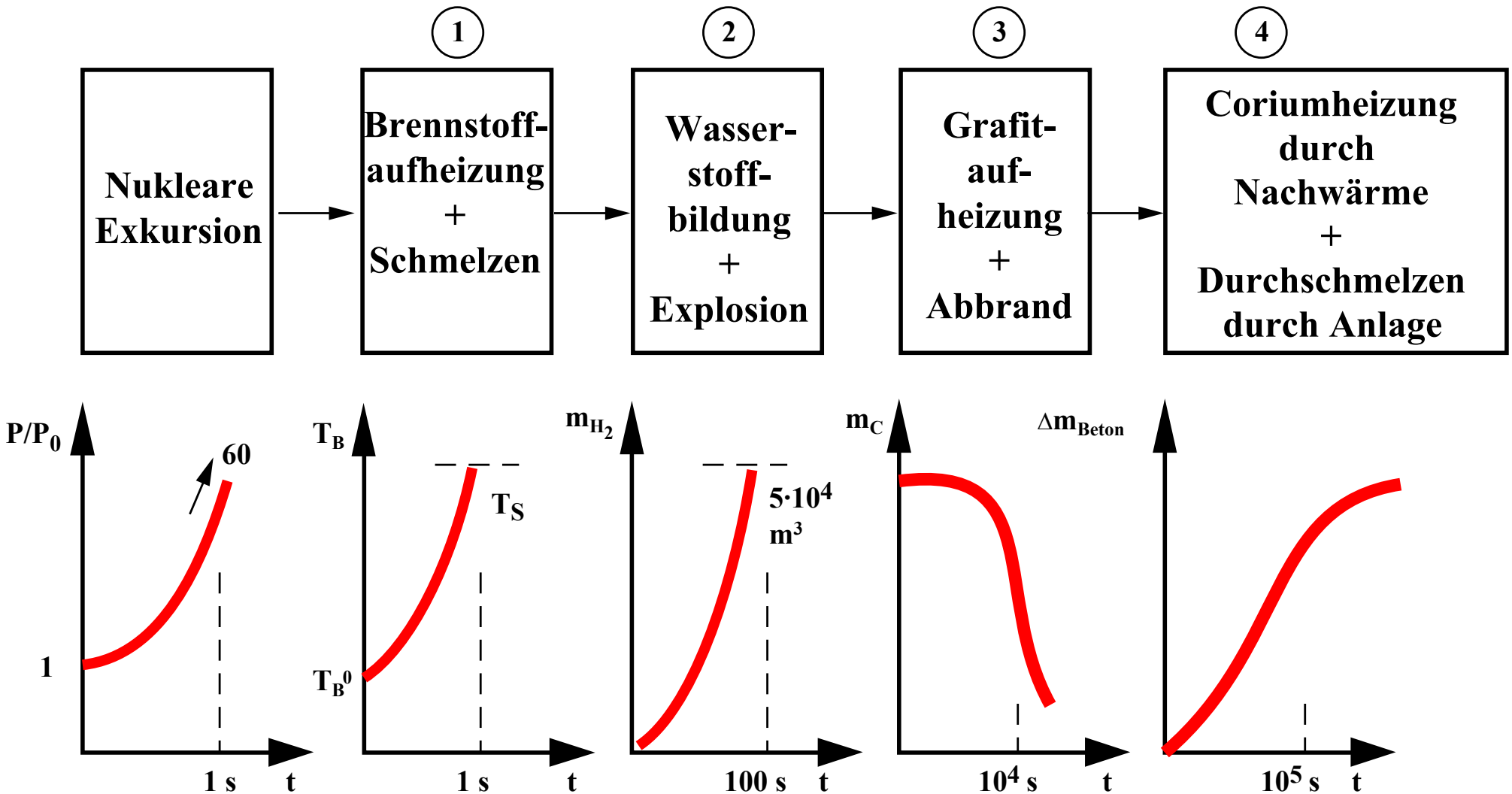


positiver Voideffekt bei Kühlmittelverlust

Simulation des Unfallablaufs
Reaktivität und Leistung



Überblick über Phasen beim Unfallablauf



Energiefreisetzung beim Unfall (1. Phase)

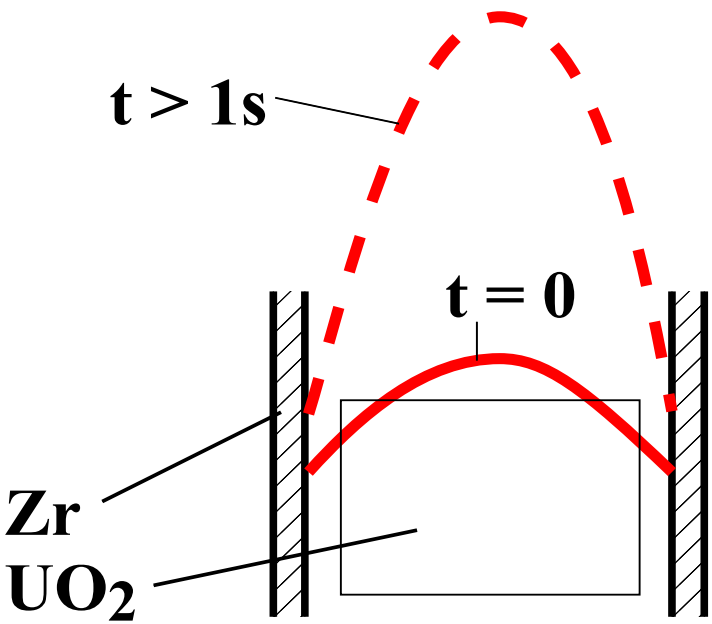
Zeitdauer: $\tau_1 \approx 1\,s$

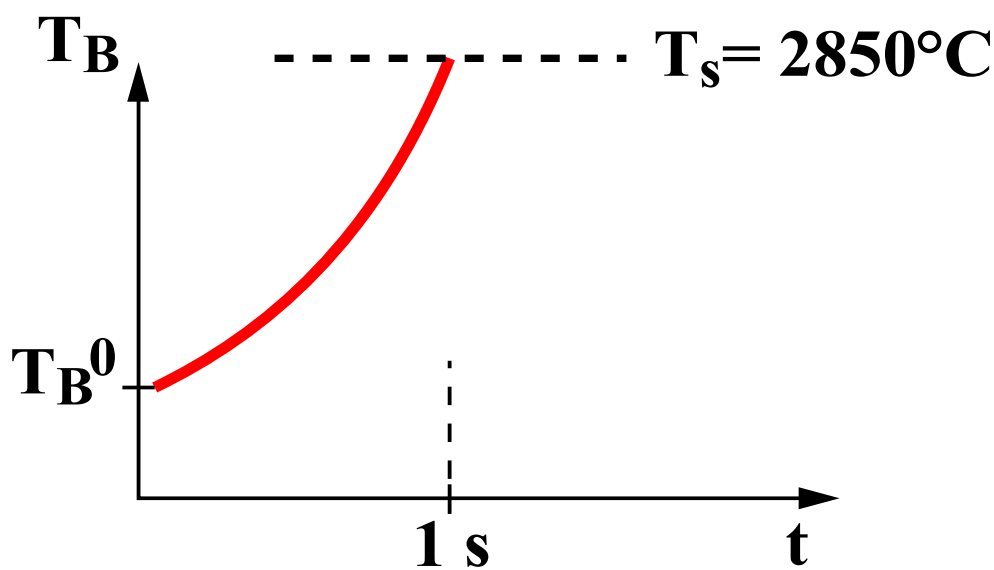
Energie: $E_1 = \int_0^{\tau_1} P(t)dt \approx 30 \cdot 3000\,MW \cdot 1\,s \approx 9 \cdot 10^7\,kJ$

Folge: $\Delta T_B = E_1 / (M \cdot c) \approx 9 \cdot 10^7\,kJ / (10^5\,kg \cdot 0{,}35 \frac{kJ}{kgK})$

$\Delta T_B \approx 2600\,K, \quad Ts = 2850°C$

Brennstoff geschmolzen





Nukleare Exkursion und Schmelzen des Brennstoffs

Energiefreisetzung beim Unfall (2. Phase)

Zeitdauer: $\tau_2 \approx 100\,s$

- **Reaktion bei H_2-Bildung:** $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2 + 586\frac{kJ}{mol}$

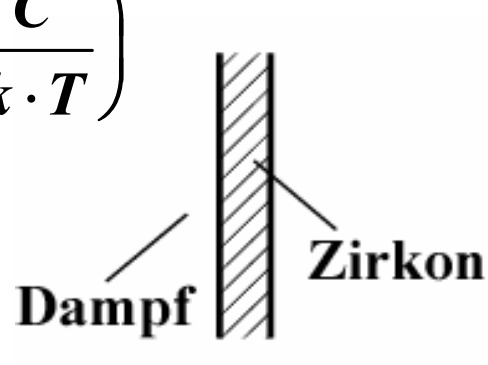
$E_2 = m_{Zr} \cdot \Delta H = 5 \cdot 10^8\,kJ$ $\quad (1\,kg\,Zr \rightarrow 0{,}5\,m^3 H_2,\ \ 1{,}5\,kWh/kg_{Zr})$

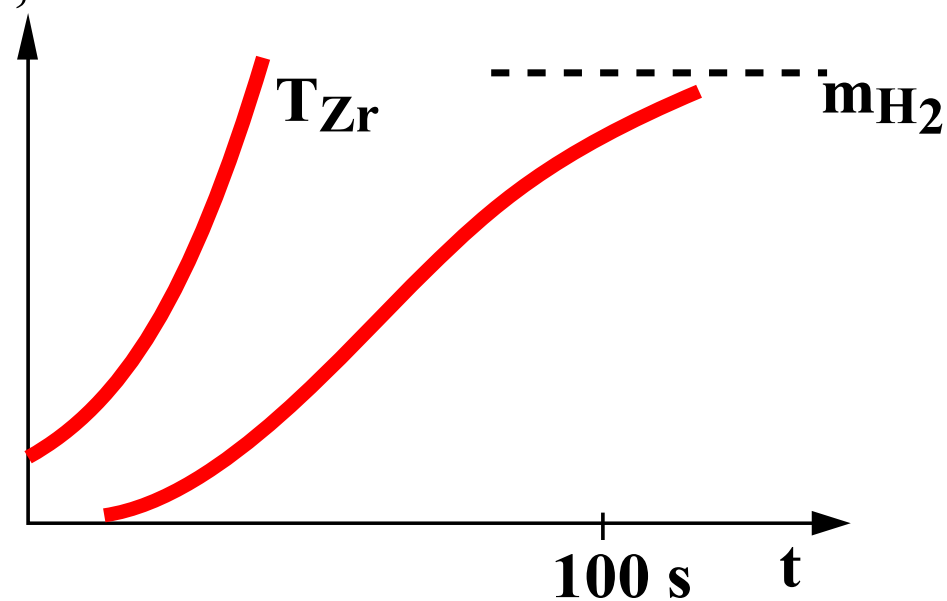
- **Explosion des H_2-Luft-Gemisches**

(Explosion: 4...75%, Detonation: 13...60%)

$E_2^* = H_u(H_2) \cdot m_{H_2} = 3{,}54\,\frac{kWh}{m^3} \cdot 5 \cdot 10^4\,m^3 = 6{,}4 \cdot 10^8\,kJ$

$$r = r_0 \cdot \exp\left(-\frac{C}{k \cdot T}\right)$$





Bildung von Wasserstoff und Explosion

Energiefreisetzung beim Unfall (3. Phase)

Zeitdauer: $\tau_3 \approx$ Tage

Grafitaufheizung: $\Delta T_C \approx (E_2 + E_2^{'}) \cdot \varepsilon / (M_C \cdot c_C)$

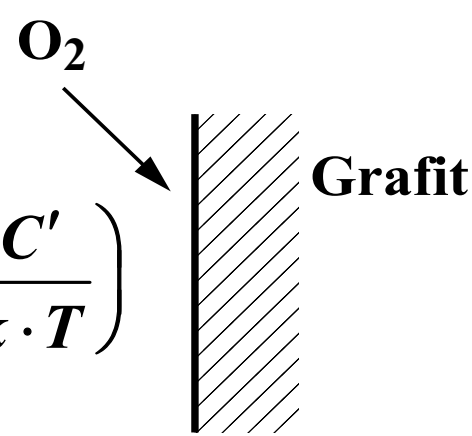
Annahme: $\Delta T_C \approx 6 \cdot 10^8\, kJ \Big/ \left(10^6\, kg \cdot 0{,}6 \dfrac{kJ}{kgK} \right) \approx 1000\, K$

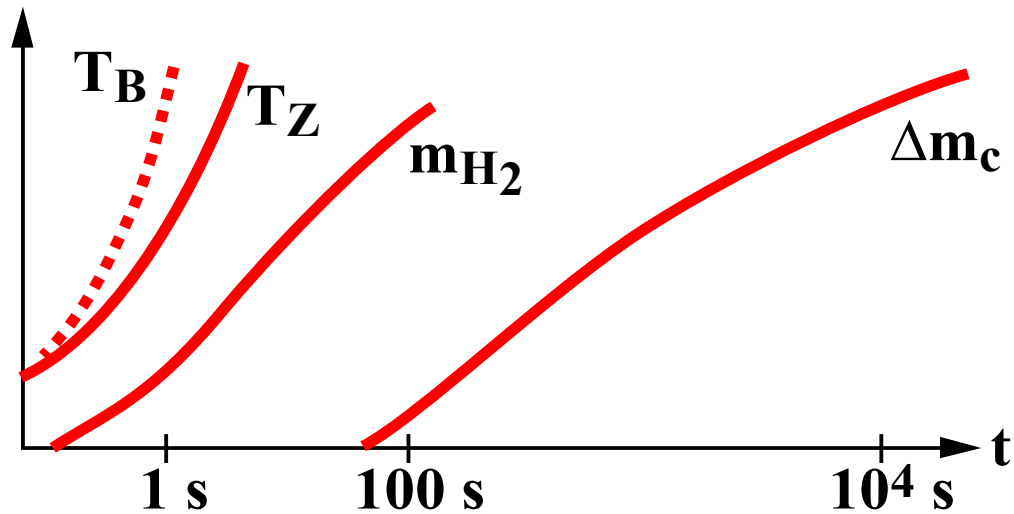
Reaktionsrate mit Luft bei 1000°C: $\approx 1\% / h$

Verbrennungsenergie: $E_3 = H_u(C) \cdot M_C \approx 3 \cdot 10^{10}\, kJ$

Folge des Brandes: starker Auftrieb

$$r = r_0 \cdot \exp\left(-\frac{C'}{k \cdot T} \right)$$





Aufheizung des Grafits und Grafitbrand

Energiefreisetzung beim Unfall (4. Phase)

Zeitdauer: Tage

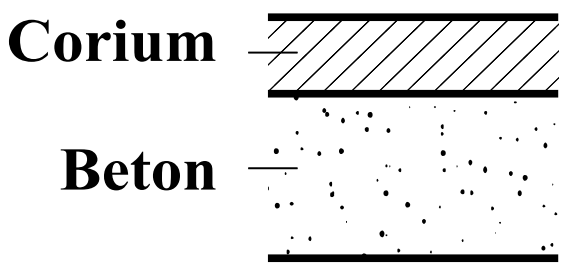
Nachwärme: $P_N(t) = P_{th} \cdot 0{,}06 \cdot t^{-0{,}2}$

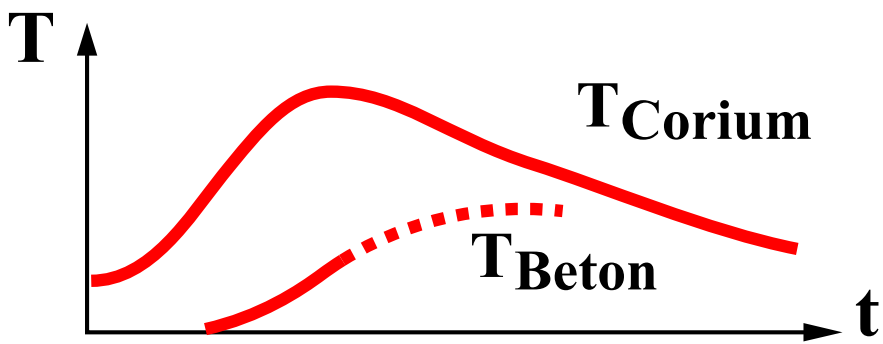
Energiebilanz für Corium: $m_{CO} \cdot c_{CO} \cdot \frac{dT_{CO}}{dt} = P_N(t) - \bar{\alpha} \cdot A \cdot \left(T_{CO} - T_{Beton}\right)$

Energiebilanz für Beton: $m_B \cdot C_B \cdot \frac{dT_B}{dt} = \dot{q}'' - \bar{\alpha}^* \cdot A \cdot \left(T_B - T_u\right), \quad \dot{q}'' \approx k\left(T_{CO} - T_B\right)$

Energie: $E_4 = \int_0^{\tau_u} P_N(t)dt \approx 1{,}5 \cdot 10^8\, kJ$

Betonzerstörung: $\Delta s / \Delta t \approx 1\, m / \text{Tag}$





Nachwärmeproduktion im geschmolzenen UO_2 und Durchschmelzen des Coriums durch Bodenstrukturen der Anlage

Übersicht über Energiefreisetzung

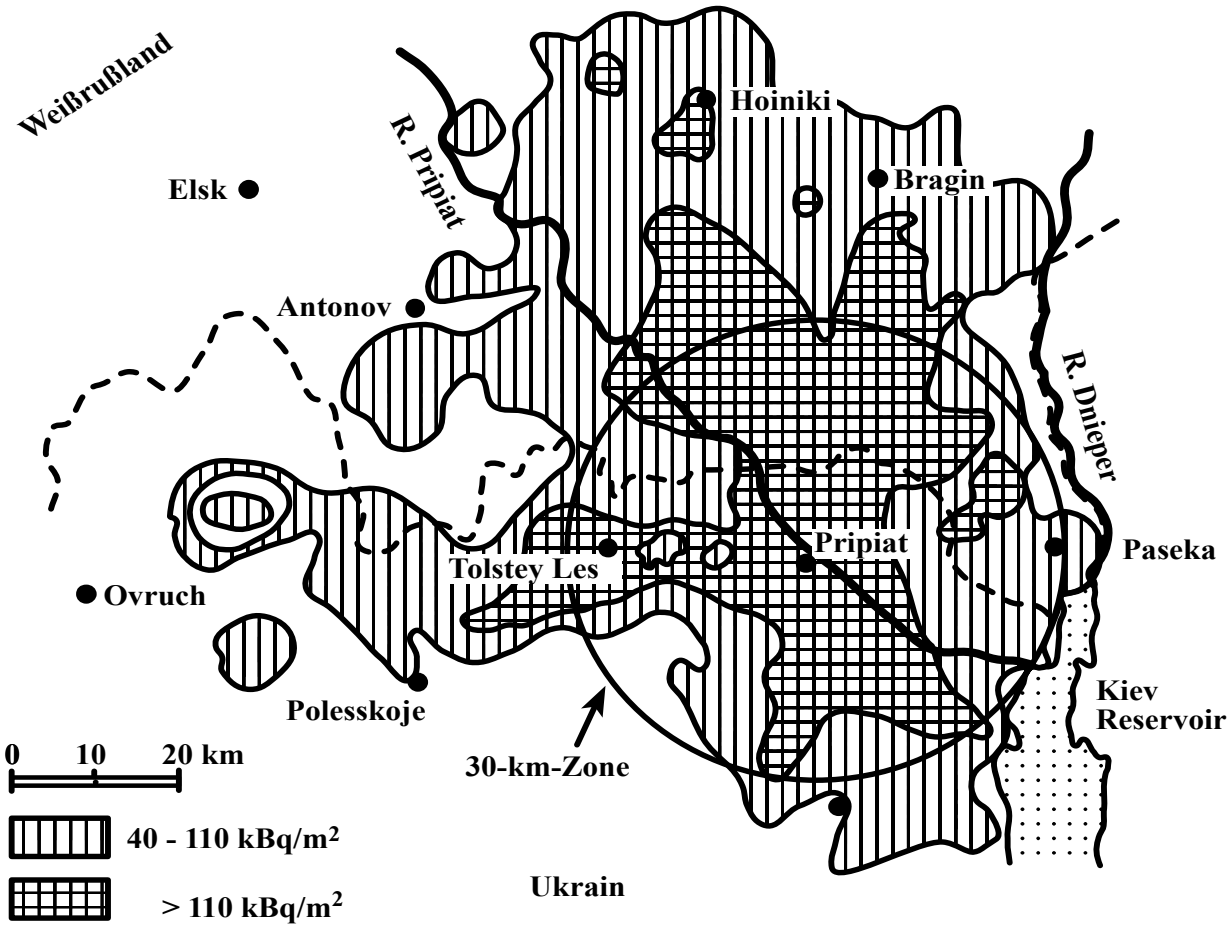
Phase	Kennzeichung der Phase	Energie-menge E_i (kJ)	charakt. Zeitdauer	Folgen
1	Nukleare Exkursion	**10^8**	**1 s**	Schmelzen des Brennstoffs und des Zirkaloy
2	Zirkaloy/Dampf-reaktion + H_2-Explosion	**10^9**	**100 s**	Wasserstoffbildung aus Zirkaloy Explosionsenergie
3	Grafit/Luft Reaktion	**$3 \cdot 10^{10}$**	**10^5 s**	Grafitaufheizung Abbrand
4	Wechselwirkung Corium Beton	**$1{,}5 \cdot 10^8$**	**10^5 s**	Durchschmelzen des Coriums durch Strukturen

Unfallfolgen

- vollkommene Zerstörung der Anlage – Bau eines Einschlusses (Sarkophag): Einsatz von 200 000 Menschen
- Freisetzung großer Mengen an Radioaktivität: 100% Edelgase, 50% ^{131}Jod, 33% ^{137}Cäsium, 5% Uran + Plutonium
- Soforttote: offizielle Angabe 32
  Spättote (z. B. unter Liquidatoren): Schätzung 2000 - 5000
  Evakuierung von ≈ 300 000 Menschen
- dauerhafte Umsiedlung von ~350 000 Menschen
- Verteilung der Radioaktivität bis nach Westeuropa (<1% Erhöhung der Belastung)
- Hoher materieller Schaden durch Landverlust, Verlust an Infrastruktur, Industrie, Privateigentum (einige 100 Mrd. €)
- weitgehender Verlust der Akzeptanz der Kernenergie in mehreren Ländern, so auch in Deutschland, obwohl RBMK nicht vergleichbar mit LWR

Langzeitkontamination von Ländern

Beispiel: ^{137}Cs, $E\gamma$ = 0,6 MeV, $T_{1/2}$ = 30 a

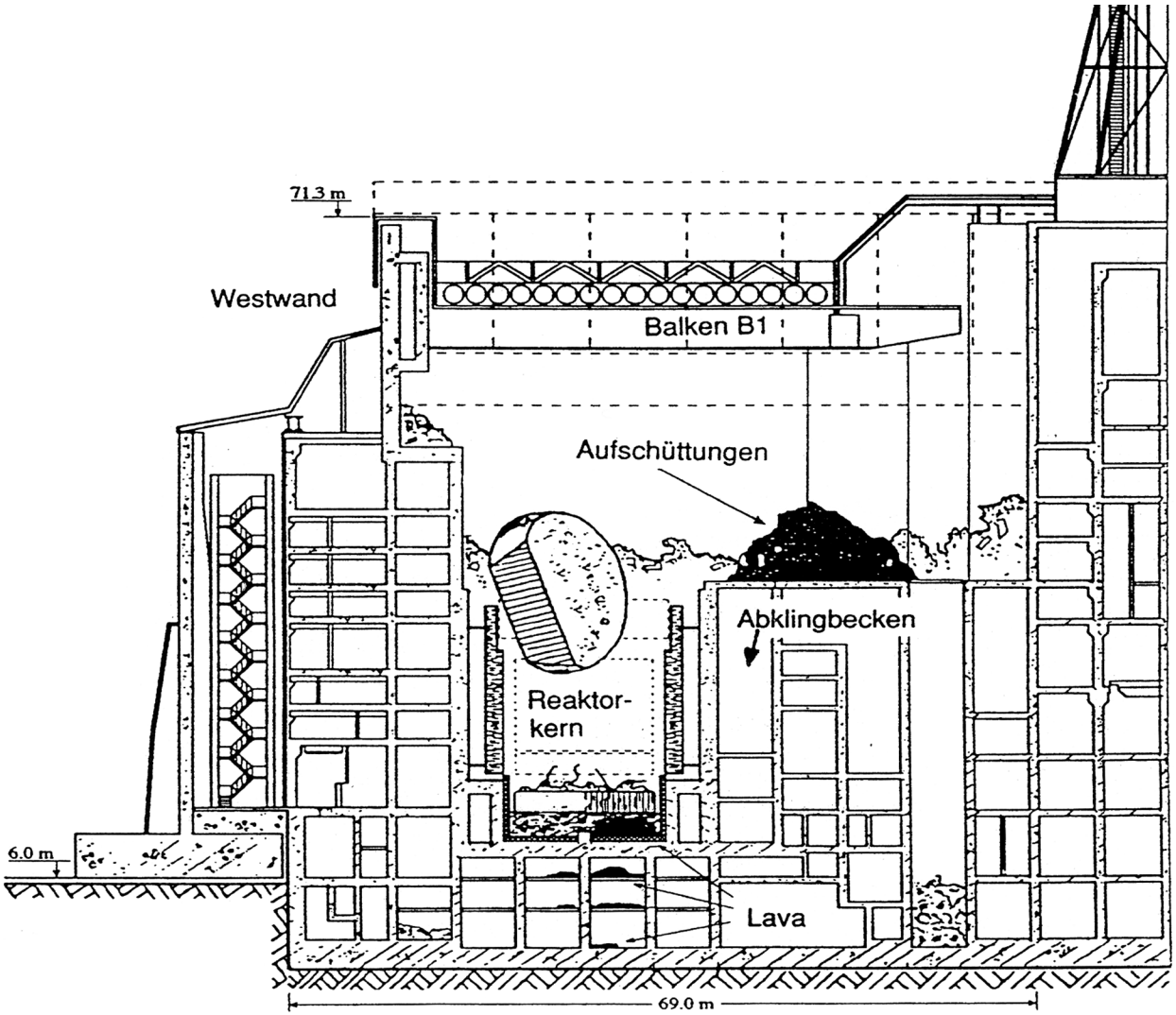


- **Jahresdosis (Direktbestrahlung)**

$$\frac{1\,Zerfall}{1\,cm^2} \square\ 80\,\mu Sv/a$$

- **3000 km²** $\sigma > 110\,\frac{kBq}{m^2}$, $D > 1\,mSV/a$
- **10 000 km²** $\sigma > 40\,\frac{kBq}{m^2}$, $D > 0{,}3\,mSV/a$
- **hinzu kommen Dosen durch Ingestion und Inhalation sowie Beiträge anderer Isotope: ^{90}Sr (28 a), ^{239}Pu (24400 a) usw.**
- **Umsiedlung notwendig**

Übersicht über den Sarkophag



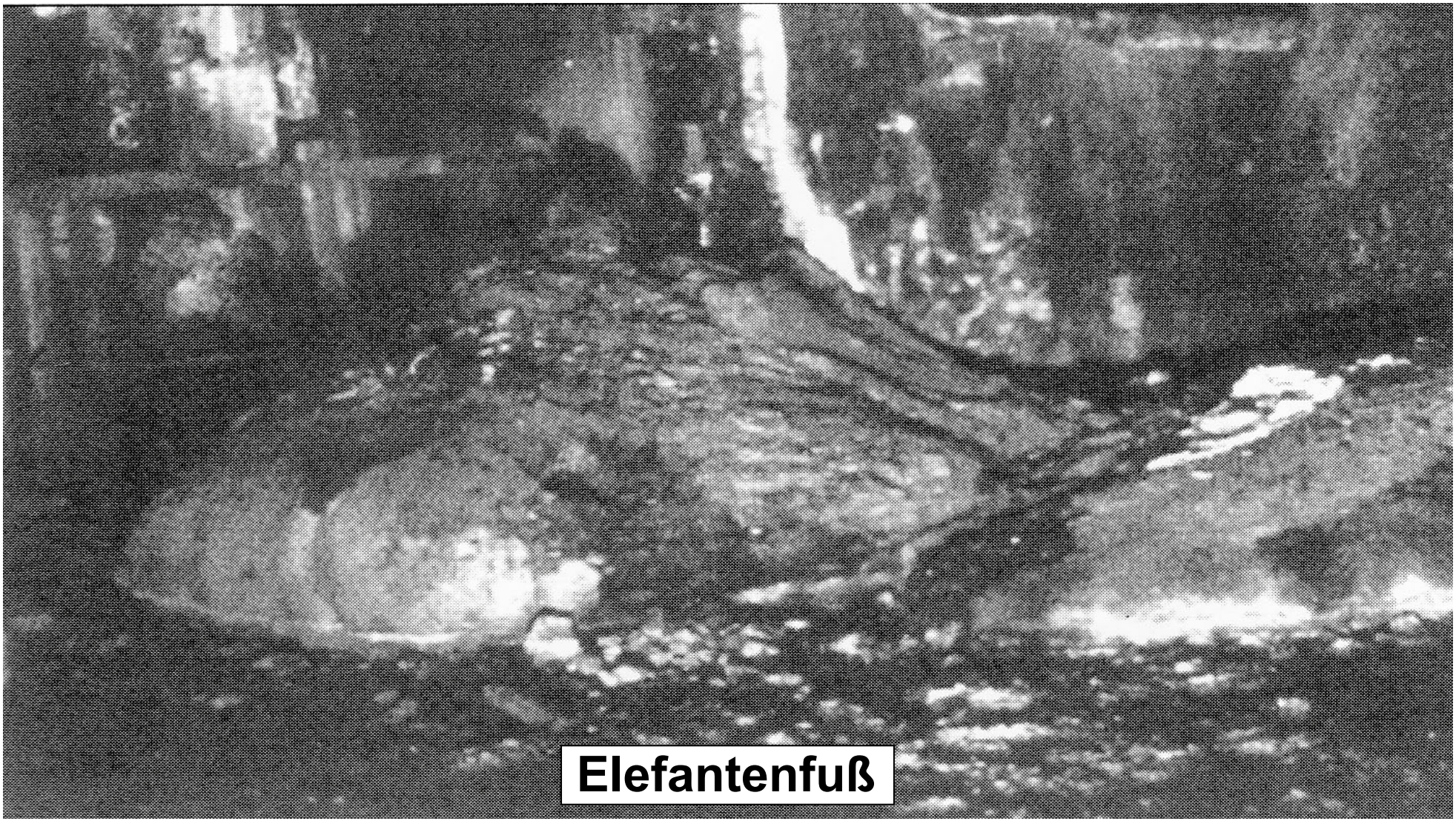
Gesamtmasse UO_2: 190 t

Schätzwerte zum Verbleib des Brennstoffes:

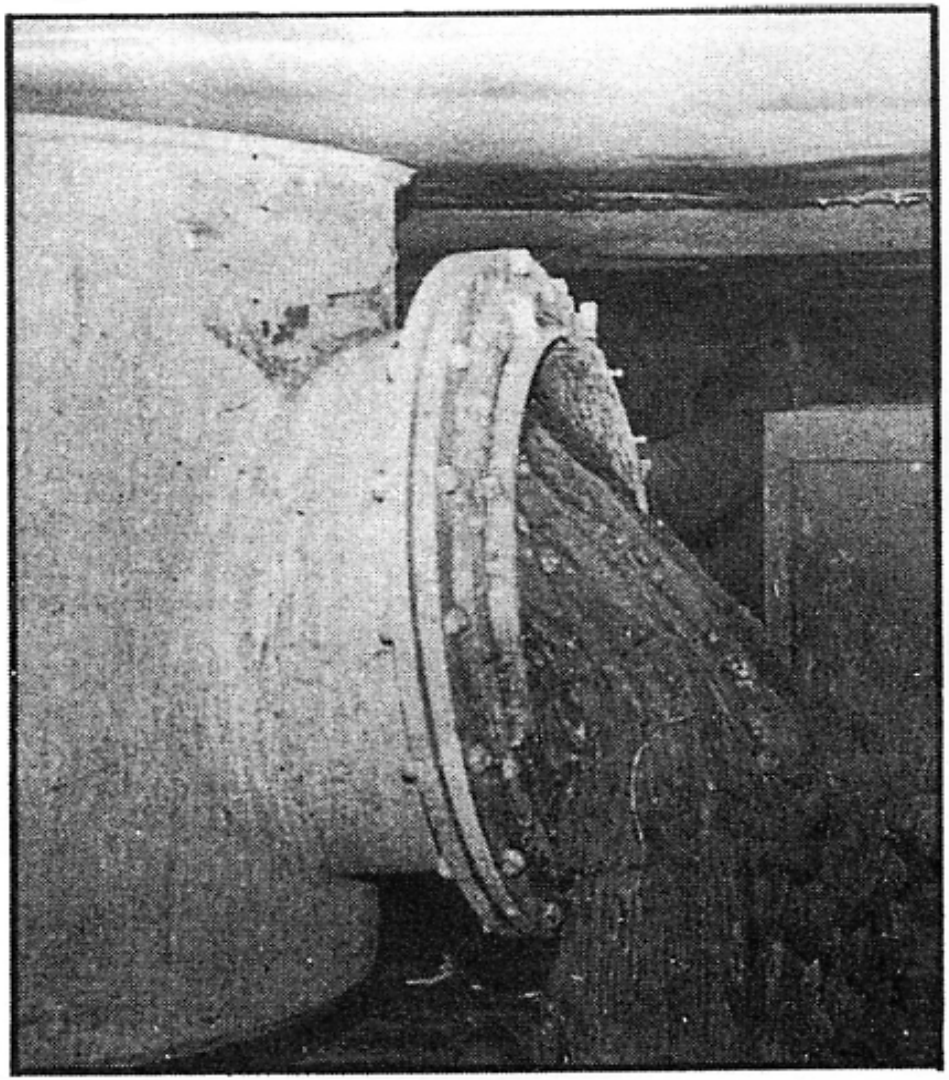
- **Bereich unter Reaktor ≈ 75 t U**
- **Abklingbecken ≈ 20 t U**
- **Korridor für Dampfverteiler ≈ 25 t U**
- **Kondensationsbecken ≈ 10 t U**
- **freigesetzt in die Umwelt: ≈ 10 t U + PuO_2**

UO_2-Inventar:Kleindispergierter Staub, Bruchstücke, erstarrte Lava, gelöstes Uran in Wasser

Ausbreitung von geschmolzenem Material

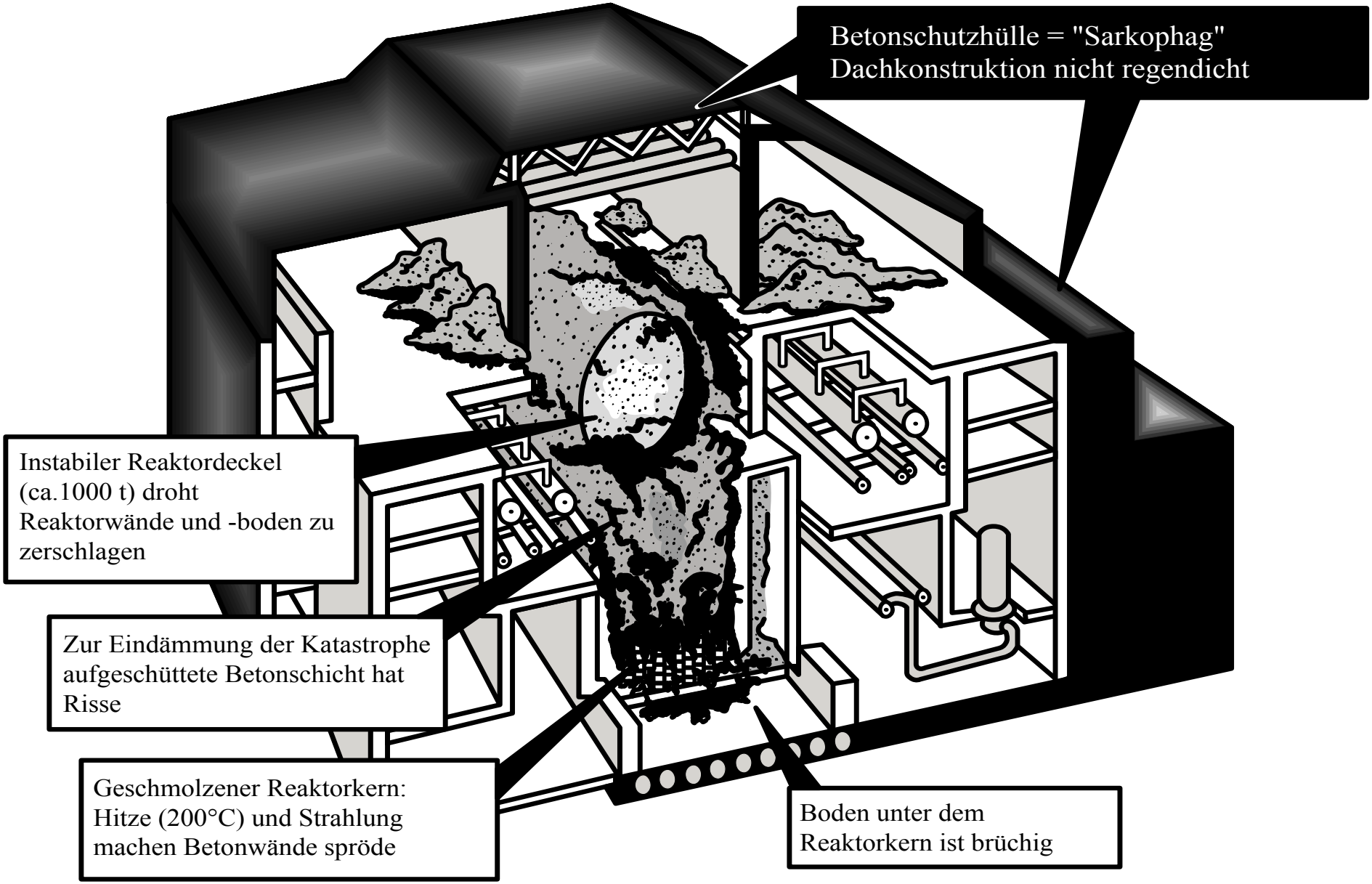


Ausbreitung von geschmolzenem Material



Lava in Räumen unterhalb des zerstörten Reaktors

Heutiger Zustand der Anlage (Sarkophag)



Verbesserungen bei RBMK-Anlagen

- **Verringerung des Wertes des positiven Voideffekts**
  → Zusätzliche feste Absorberstäbe im Kern (80 Stück), dadurch bedingt Erhöhung der Anreicherung von 2 auf 2,4%;
  jetzt statt + 5 β nur noch ~ + 1 β für Voidkoeffizient

- **Beseitigung des „positiven Abschalteffektes (Reduktion der Wassermenge im unteren Kernbereich durch geänderte Stabkonstruktion)**

- **Begrenzung des Reaktivitätszufuhr bei Kühlmittelverlust im Kühlkreislauf für die Steuerstäbe (Steuerstäbe sind wassergefüllt: Kühlmittelverlust bedeutet positive Reaktivität; Reduktion des Wasserinventars)**

- **Einbau eines schnellen Abschaltsystems (Verkürzung der Einfahrzeit bei einem Teil der Stäbe auf ≈ 2 s)**

- **Verbesserungen bei der Kernüberwachung und im Reaktorschutzsystem**

Anforderungen an kerntechnische Anlagen

- **positive Reaktivitätskoeffizienten müssen unbedingt vermieden werden: Ausschluss prompter Exkursion sicherstellen**

- **ausgeprägte Sicherheitskultur notwendig, Unabhängigkeit von Genehmigern, Gutachtern und Betreibern gewährleisten**

- **Vorkehrungen gegen Unfälle und Unfallfolgen treffen Interventionssysteme vorhalten, Evakuierungen üben**

- **zukünftig: katastrophenfreie Kerntechnik realisieren → keine katastrophalen Freisetzungen möglich bei inhärent sicheren Systemen**

Konzepte der Katastrophenfreien Kerntechnik

Störfallursachen

- innere
- absehbare äussere
- nicht absehbare äussere

⇑ es werden keine Störfalleignisse ausgeschlossen

Folgen für Anlage

- keine Kernschmelze durch Versagen der Nachwärmeabfuhr
- keine Kernzerstörung durch nukleare Exkursionen
- keine Kernzerstörung durch Korrosionseffekte
- keine schnelle Druckentlastung des Primärkreises

⇑ Brennelemente und Reaktorsystem bleiben intakt

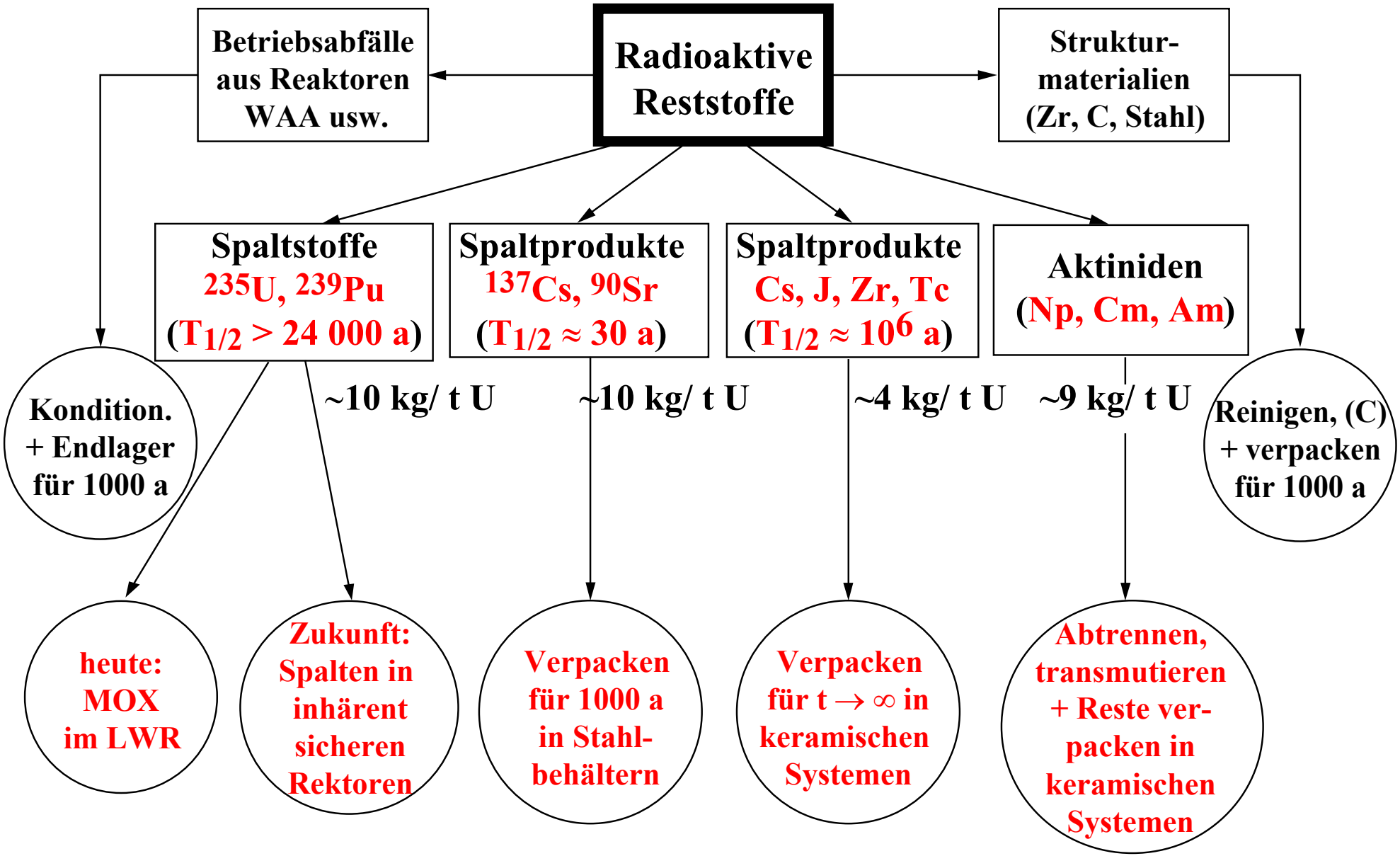
radiologische Folgen

praktisch keine Freisetzung aus den BE und aus der Anlage

⇑ keine Katastrophalen Freisetzung möglich

Unfallfolgen

- keine Soforttoten
- keine Evakuierungen
- keine Spättoten
- keine unzul. Landkontamination
- keine Einschränkung der Produktion von Lebensmitteln

⇑ keine unzulässige Belastung der Umwelt

Konzept der katastrophenfreien Kerntechnik