

„Perspektiven der zukünftigen Erzeugung flüssiger Kohlenwasserstoffe unter Einsatz von Kernenergie“

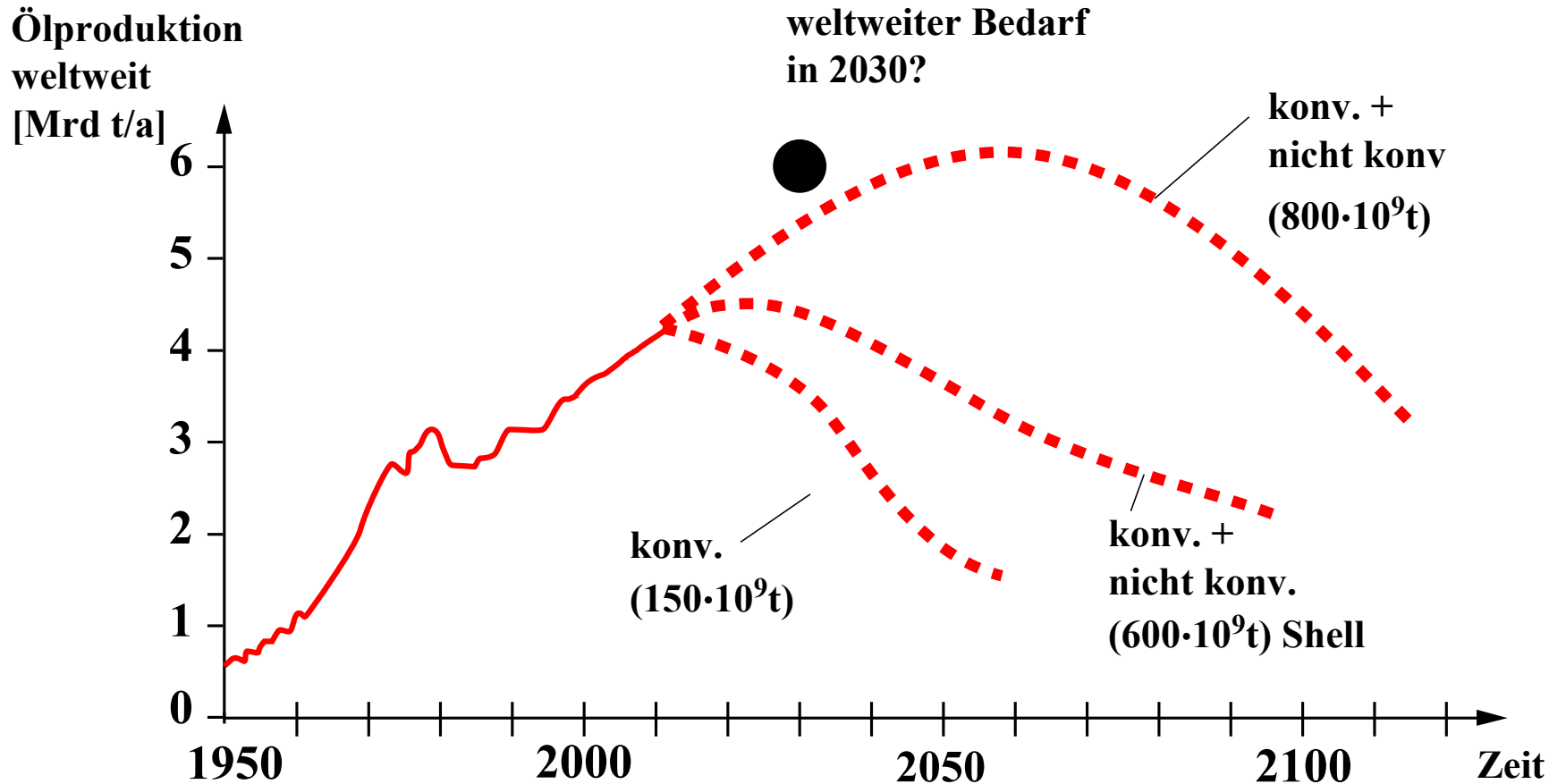
K. Kugeler, I. Tragsdorf, N. Pöppe

**Lehrstuhl für Reaktorsicherheit und –technik
der RWTH Aachen**

**Institut für Sicherheitsforschung und
Reaktortechnik des Forschungszentrums**

Vortrag bei der DPG [AKE], 20.03.06 München

Bisherige Entwicklung der weltweiten Ölproduktion und Prognosen zukünftiger Versorgung

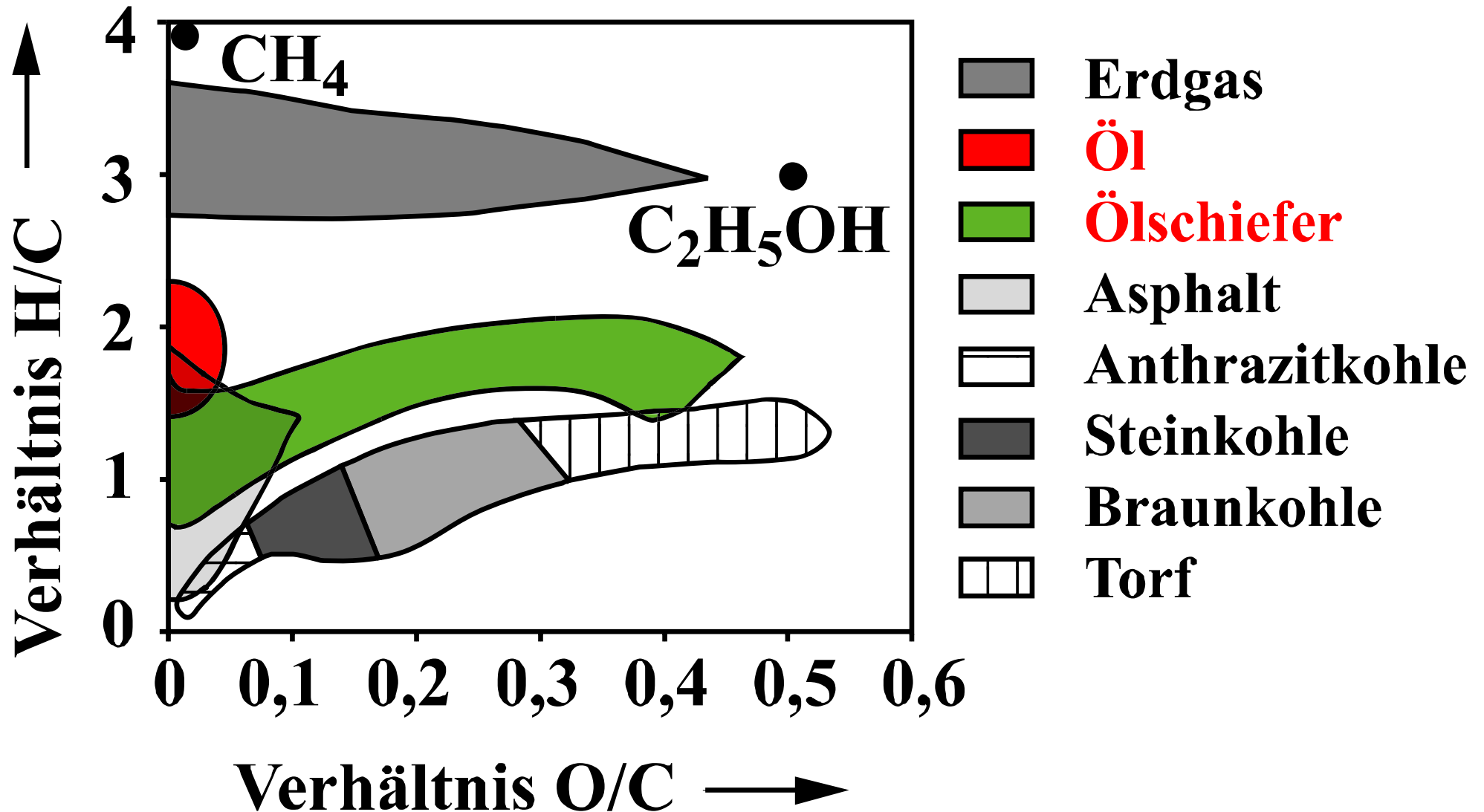


- heute wirtschaftlich gewinnbare Vorkommen ($150 \cdot 10^9 \text{ t}$ bis evtl. $250 \cdot 10^9 \text{ t}$) reichen für einige Dekaden
- nicht konventionelle Öle (tertiäre Gewinnungsverfahren, Ölsand, Ölschiefer) werden zunehmend entscheidend für die Versorgung

Optionen zur zukünftigen Versorgung der Weltwirtschaft mit flüssigen Kohlenwasserstoffen

- Anforderung: in **2030** müssen voraussichtlich etwa **6 Mrd. t Öl/a** bereitgestellt werden (**heute 3,6 Mrd. t/a**)
- **konventionelle Öle** reichen bei weitem **nicht** zur Bedarfsdeckung aus (**max. Produktion** auf evtl. **4...5 Mrd. t/a** steigerbar)
- **nicht-konventionelle Öle** und andere Optionen, die in **Zukunft entscheidend** für die Versorgung werden:
 - tertiäre Ölgewinnungsverfahren (**Dampffluten**)
 - Ölgewinnung aus **Ölsanden** und **Ölschiefer**
 - Herstellung von **Methanol aus Erdgas**
 - Herstellung **flüssiger Kohlenwasserstoffe aus Kohle**
 - Umwandlung von **Biomassen in Energiealkohole**
 - Einsatz von **Flüssiggasen als Treibstoff**

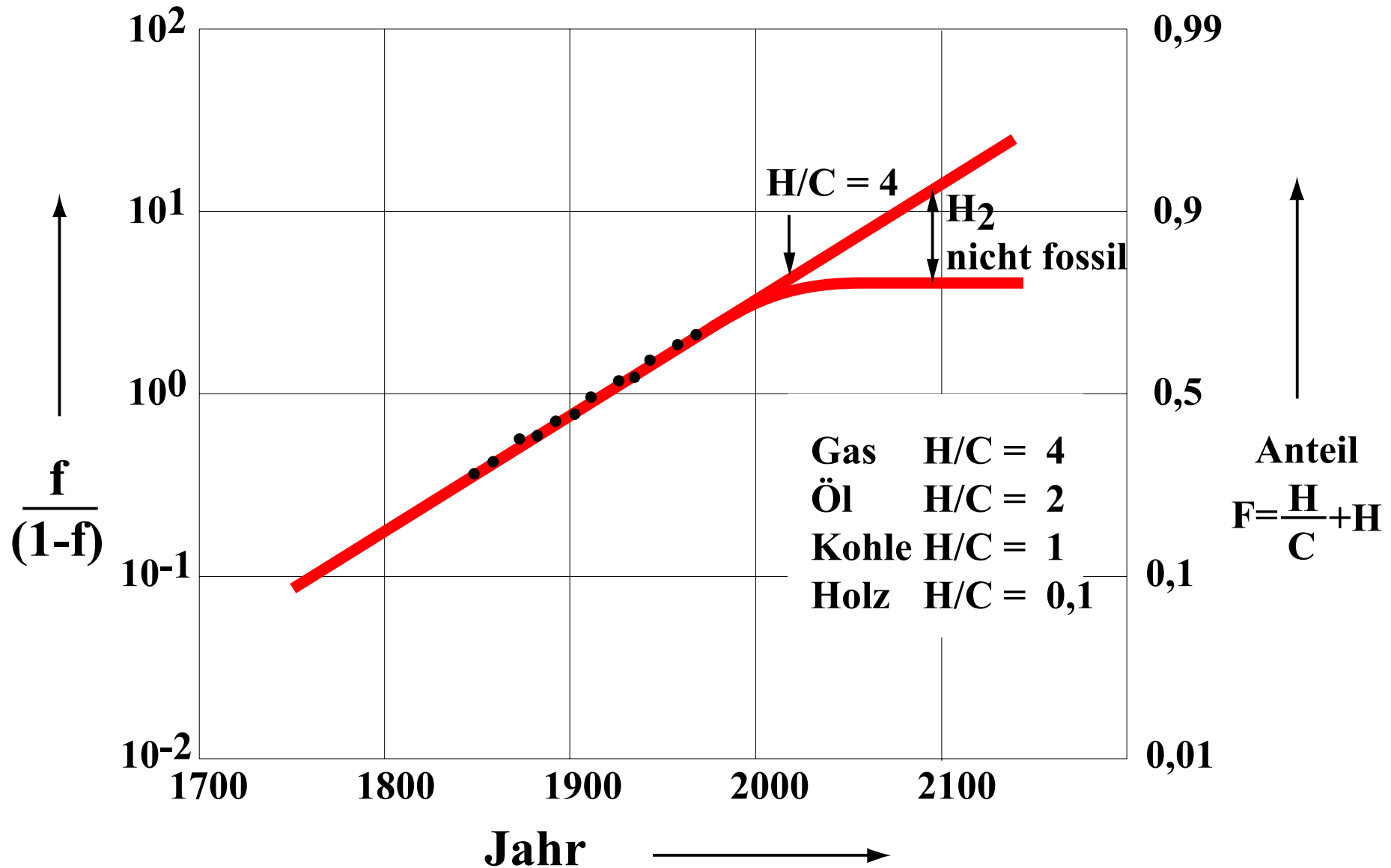
Charakterisierung der bekannten Kohlenstoffträger durch die H/C- und O/C-Verhältnisse



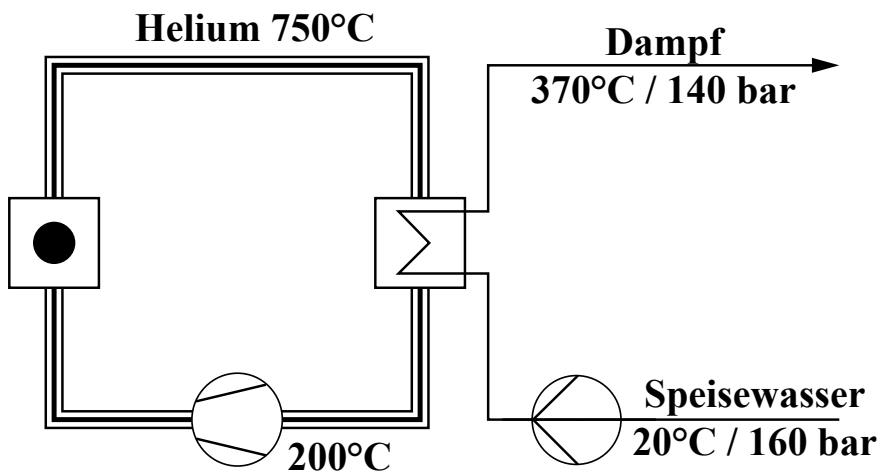
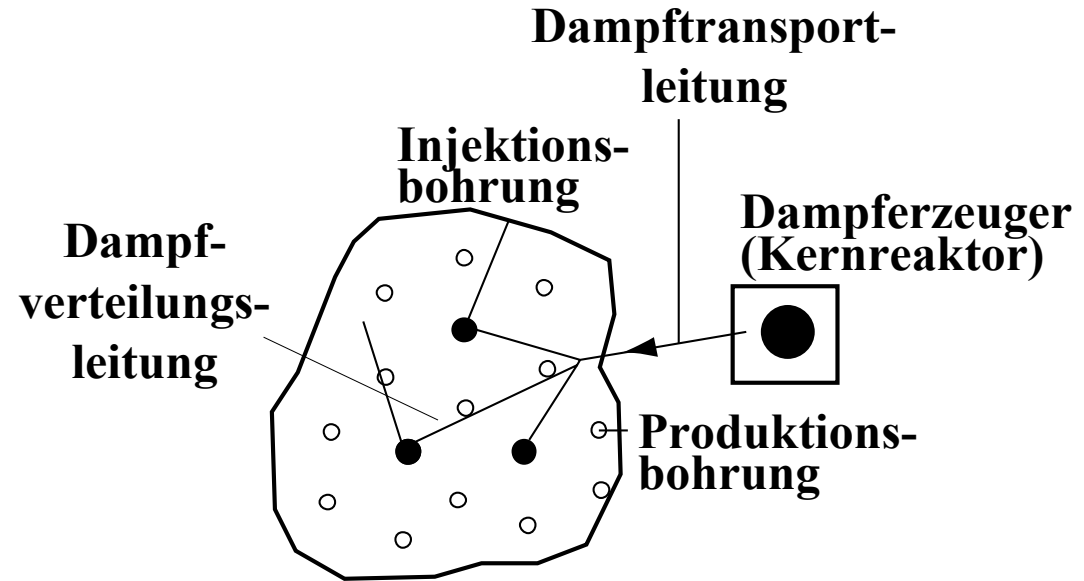
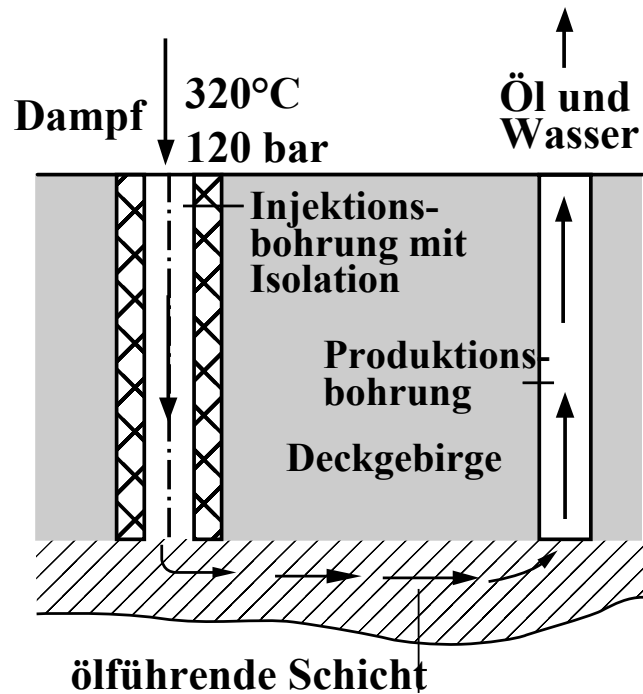
Notwendige Wasserstoffmengen zur Erzeugung von Benzin aus Kohlenstoffträgern

| | $\frac{\text{g O,S,N}}{100 \text{ g C}}$ | $\frac{\text{g H}}{100 \text{ g C}}$ | $\frac{\text{g H}_{\text{disp.}}}{100 \text{ g C}}$ | $\frac{\text{m}^3_{\text{N}} \text{H}_2 \text{ theor.}}{\text{t Benzin}}$ | $\frac{\text{Molgewicht}}{(\text{g/mol})}$ |
|------------------------|--|--------------------------------------|---|---|--|
| Rohstoffe | | | | | |
| Gaskohle | 9,4 | 6,15 | 4,9 | 1148 | 5000 |
| Braunkohle | 39,2 | 7,64 | 3 | 1330 | 5000 |
| Erdöl (H-arm) | 5 | 12,7 | 12,1 | 460 | 550 |
| Vakuumrückstand | 8,22 | 12,18 | 11,5 | 518 | 870 |
| Fertigprodukte | | | | | |
| Diesel | | 15,2 | | | 200 |
| Benzin | | 16,7 | | | 100 |

Trends der Änderung des H/C-Verhältnisses in der Weltenergiewirtschaft

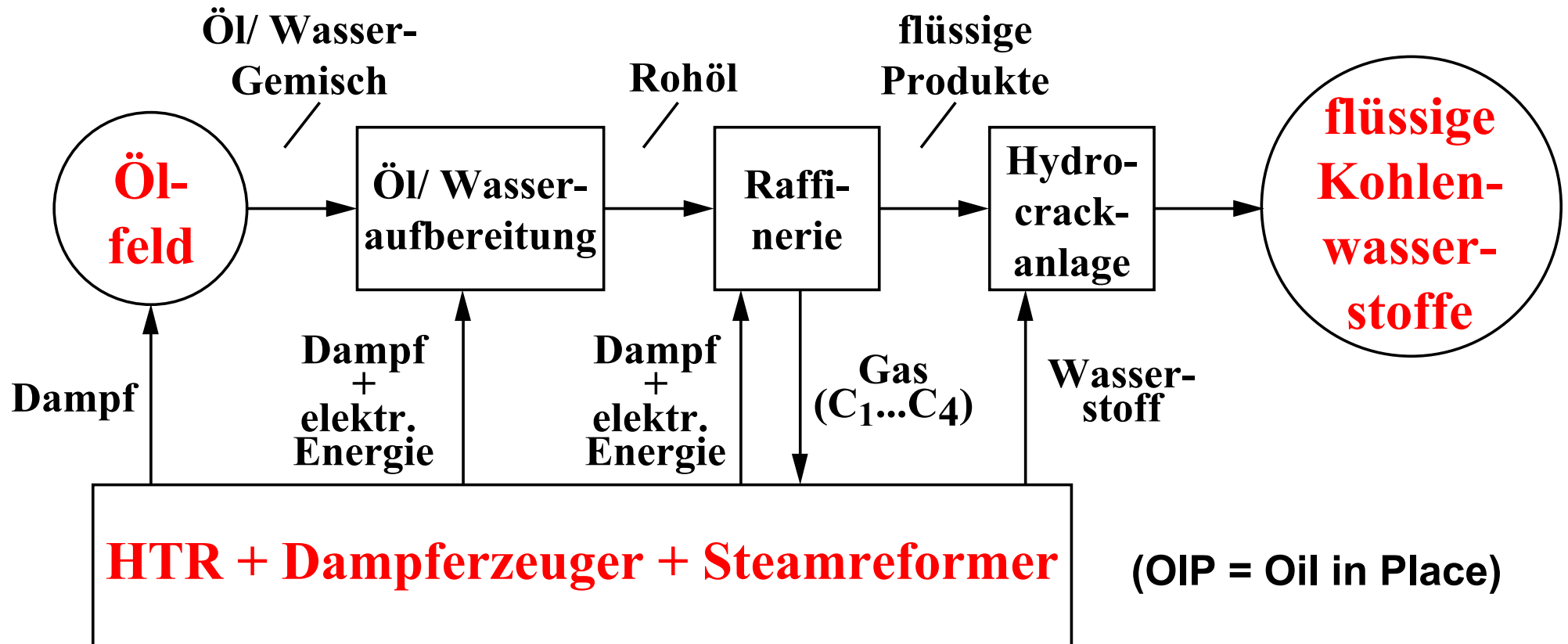


Gewinnung flüssiger Kohlenwasserstoffe durch Dampfpluten



- Einsatz von rund **5 t Dampf / 1 t Öl**
- Konventionelles **Verfahren etabliert** (~ 5% der Weltölproduktion)
- Rohöl erfordert **Weiterverarbeitung** zu leichteren flüssigen Produkten

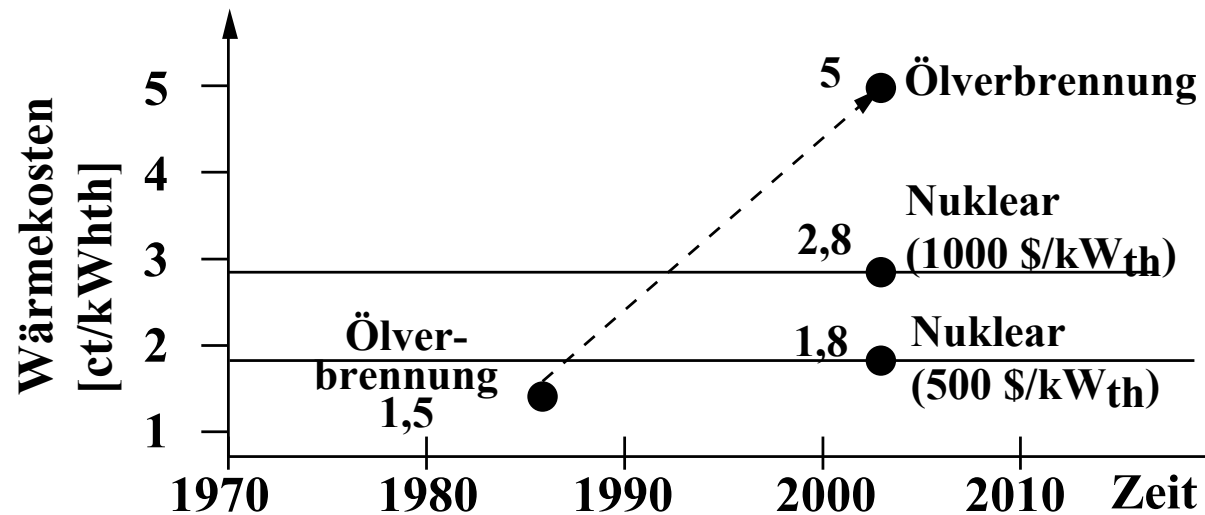
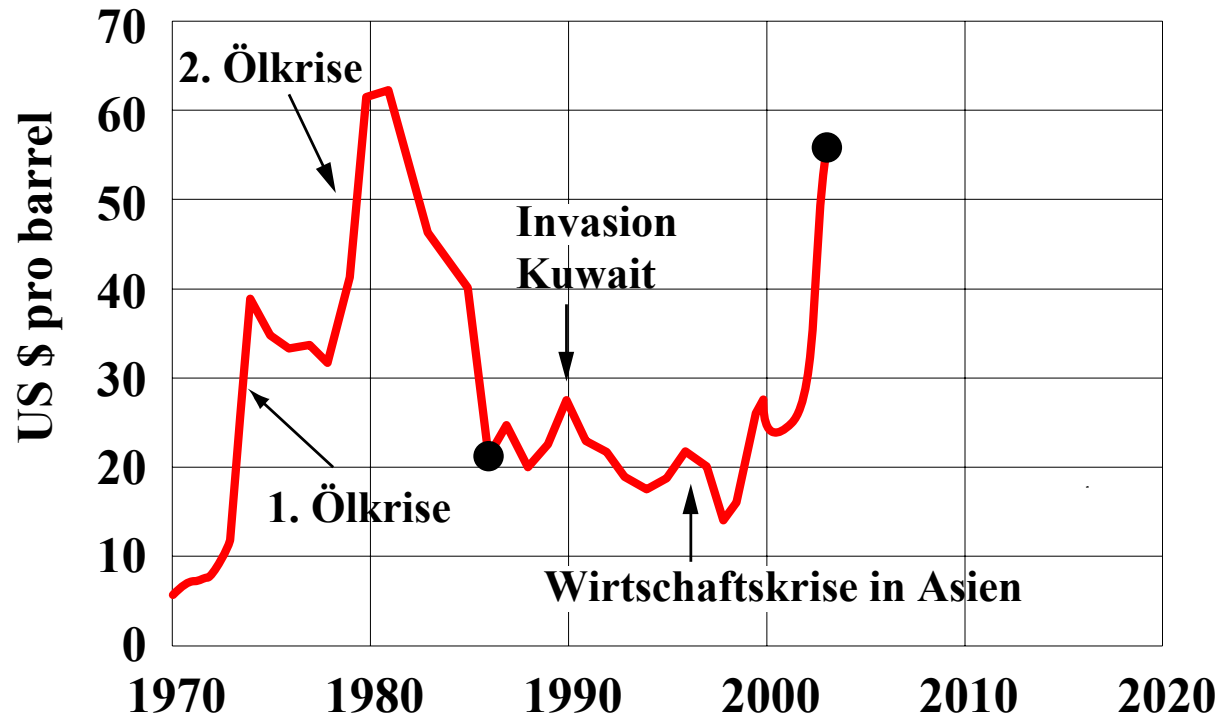
Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen durch Dampfpluten



Konv.: 2 t OIP → 1 t flüssige Kohlenwasserstoffe + 2,5 t CO₂

Nukl.: 2 t OIP + 12 MWh_{th} → 2 t flüssige Kohlenwasserstoffe

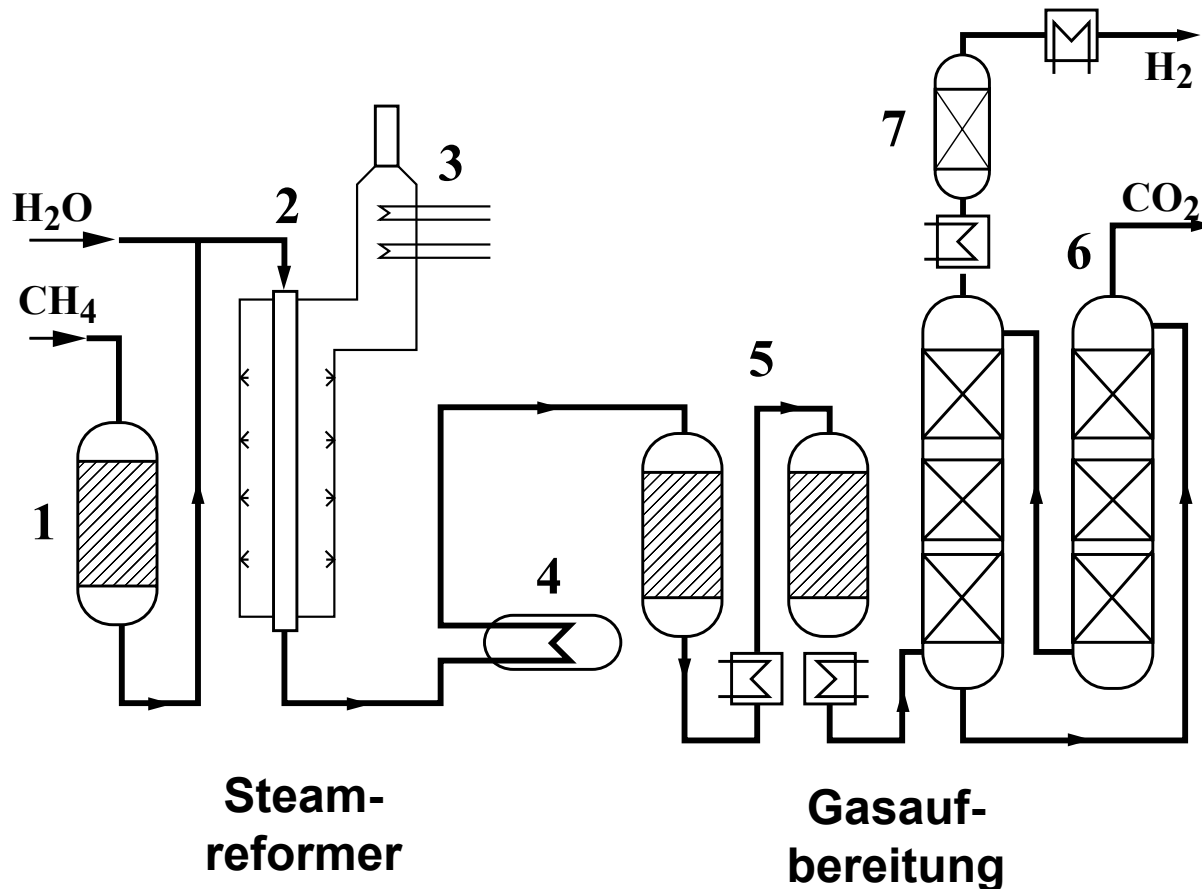
Kostenfrage: Ölverbrennung – nukleare Wärme



Vorteile des nuklearen Verfahrens

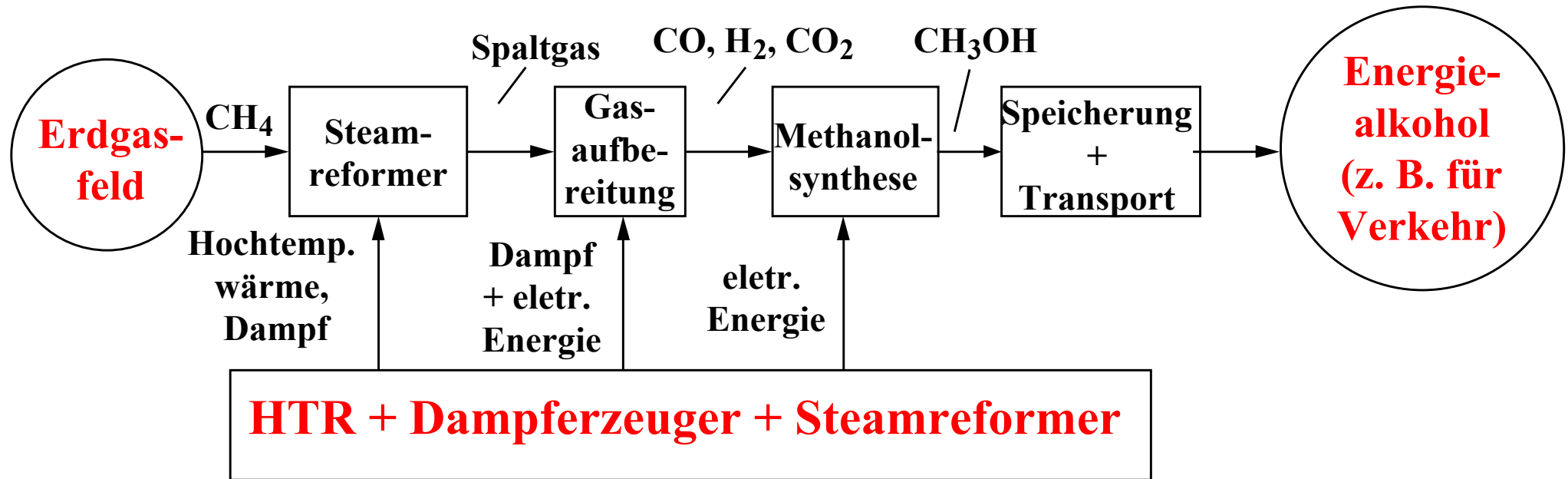
- Die **Erzeugungskosten** für die flüssigen Kohlenwasserstoffe werden deutlich **gesenkt**; die **Wärmekosten** bleiben **zeitlich** etwa **konstant**
- Die **Emission** von **2,5 t CO₂/t Öl** wird **vermieden**: das bedeutet weitere **Kostensenkung**: $\approx 100 \dots 150 \text{ €/t Öl}$
- Die **Ausbeute** aus dem Ölfeld wird **verdoppelt**.
- Das Verfahren gestattet es auch langfristig **weniger attraktive Ölvorkommen auszubeuten**

Erzeugung von Methanol aus Erdgas



- Erzeugung von Spaltgas:
 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
- Erzeugung von Methanol:
 $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
 $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$
- Gesamtwirkungsgrad:
Erdgas \rightarrow Methanol
 $\eta \approx 50\%$
- Weltweit bedeutender industrieller Prozess

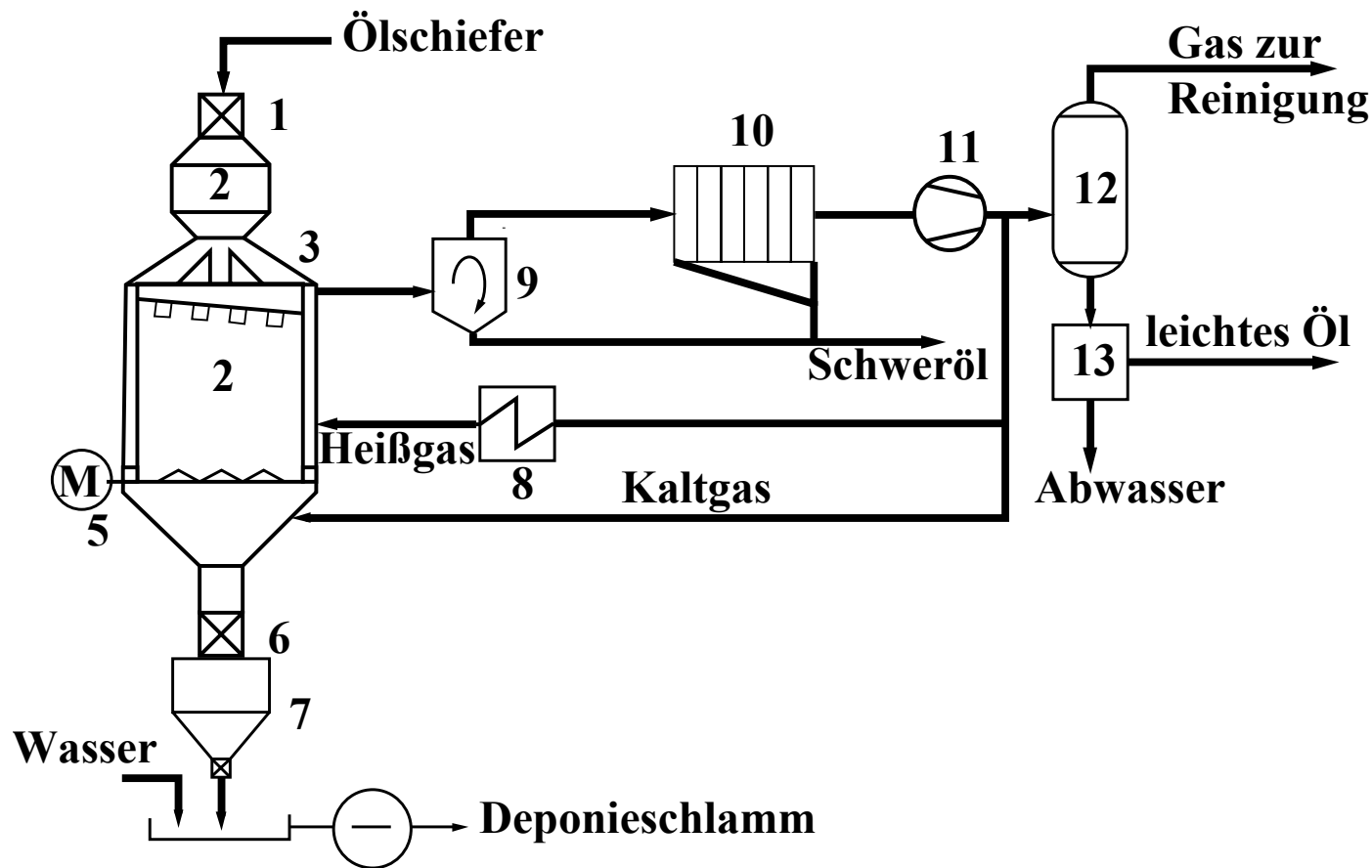
Erzeugung von Methanol aus Erdgas



Konv.: 1000 m³ Erdgas → 1 t Methanol + 1,5 t CO₂

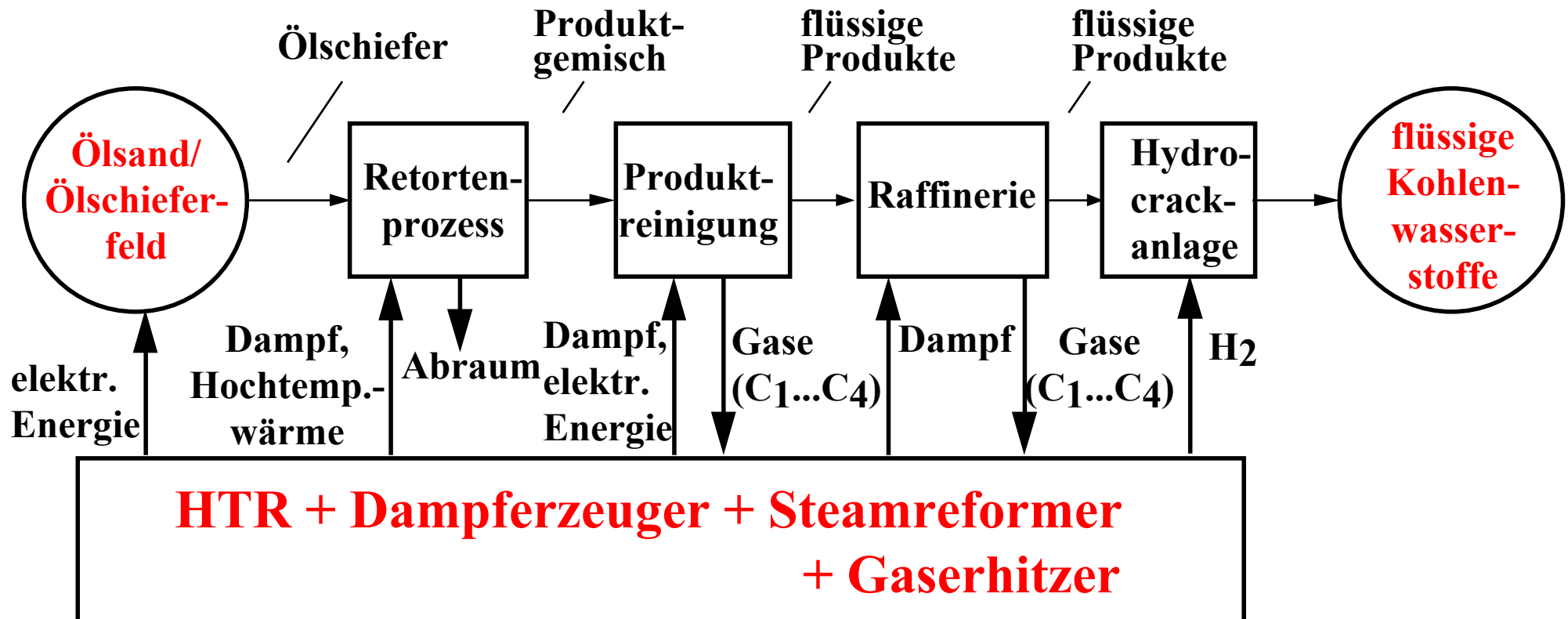
Nuklear: 1000 m³ Erdgas + 10 MWh_{th} → 2 t Methanol

Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Ölsand bzw. Ölschiefer



- Ölschiefer:
160 l Öl/m³ Material
- konventionelles Retortenverfahren:
 $\eta \approx 50\%$
- große Abraummenge
- bereits **$\sim 2,5 \text{ t CO}_2$** -Emission bei der Ölverbrennung zur Prozessbereitstellung
- Wirtschaftlich
ab **$\sim 35 \text{ \$ / barrel}$**

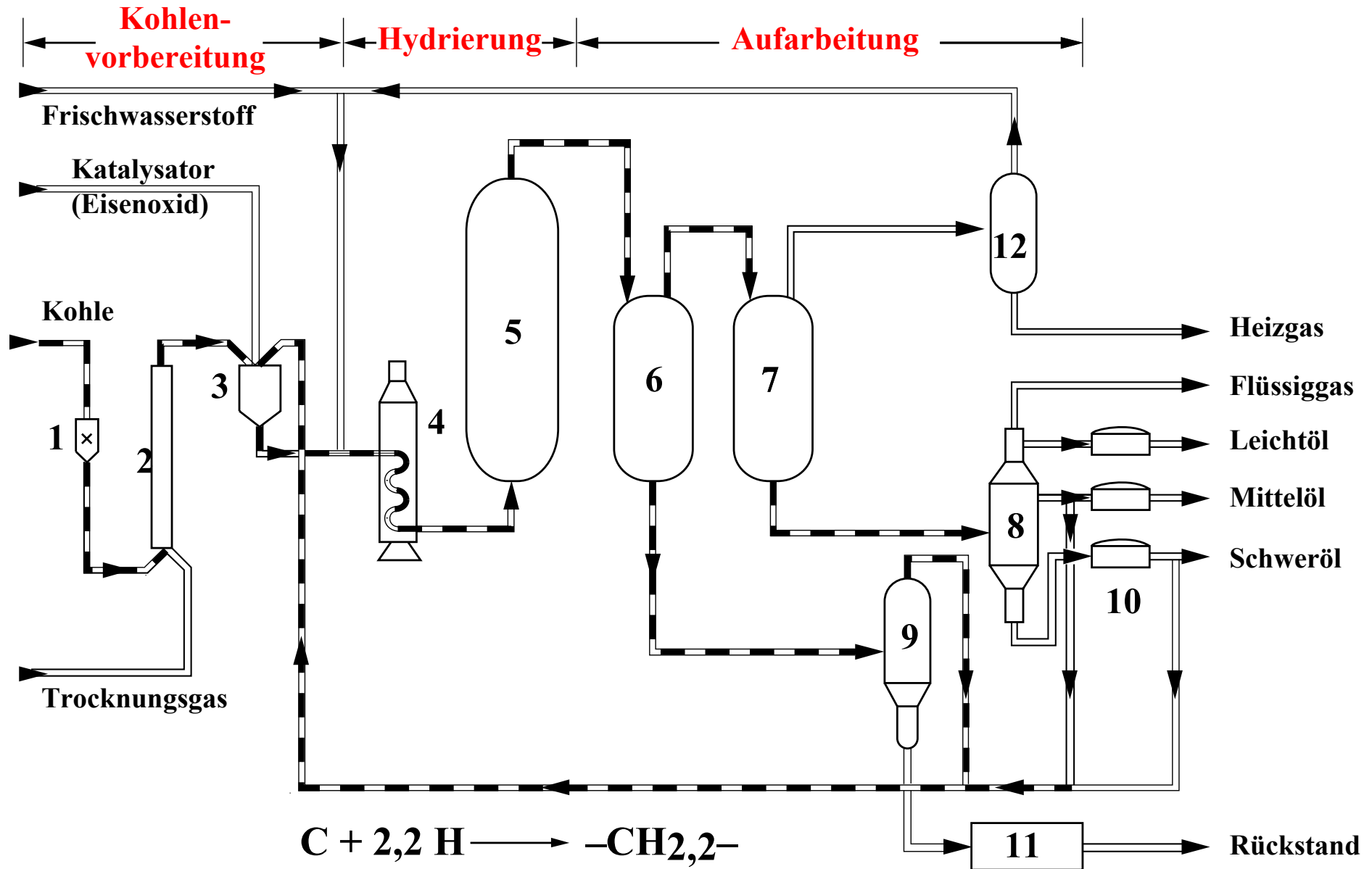
Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Ölsand bzw. Ölschiefer



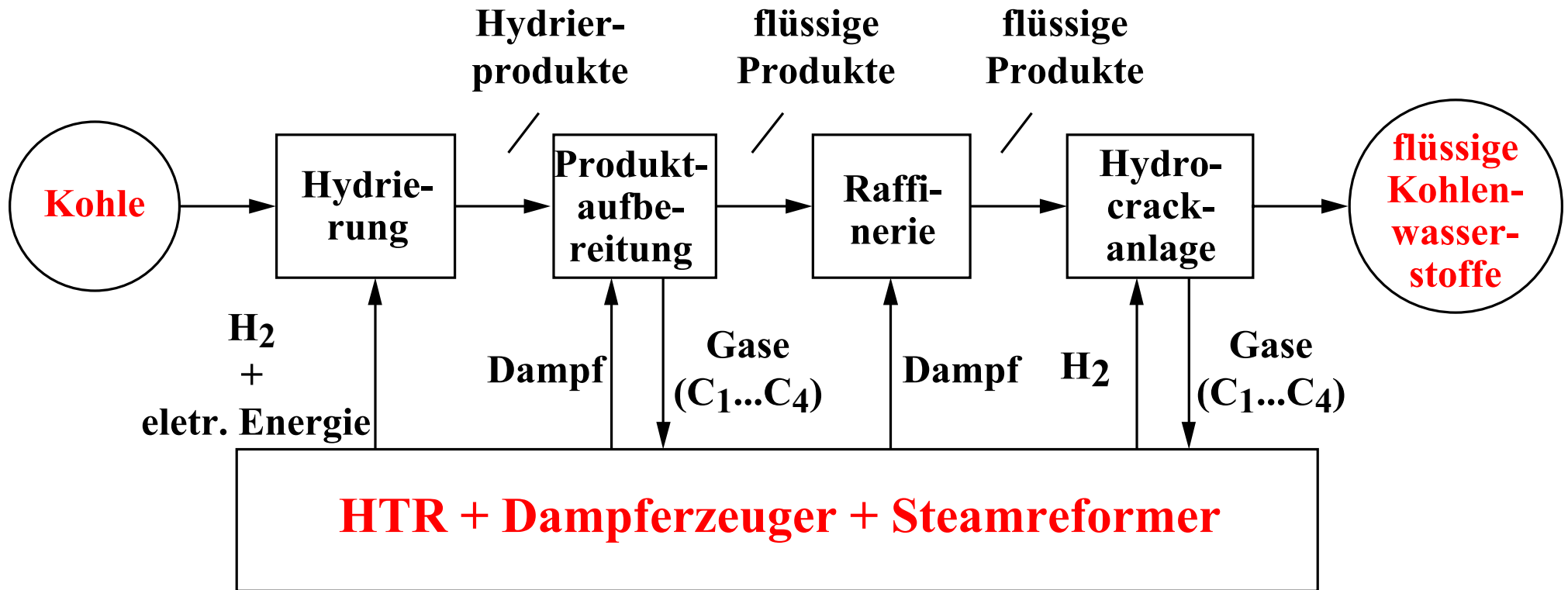
Konv.: 12 t Ölschiefer → 1 t flüssige KW-Stoffe + 2,5 t CO₂

Nuklear: 12 t Ölschiefer + 12 MWh_{th} → 2 t flüssige KW-Stoffe

Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Kohle durch Kohlehydrierung



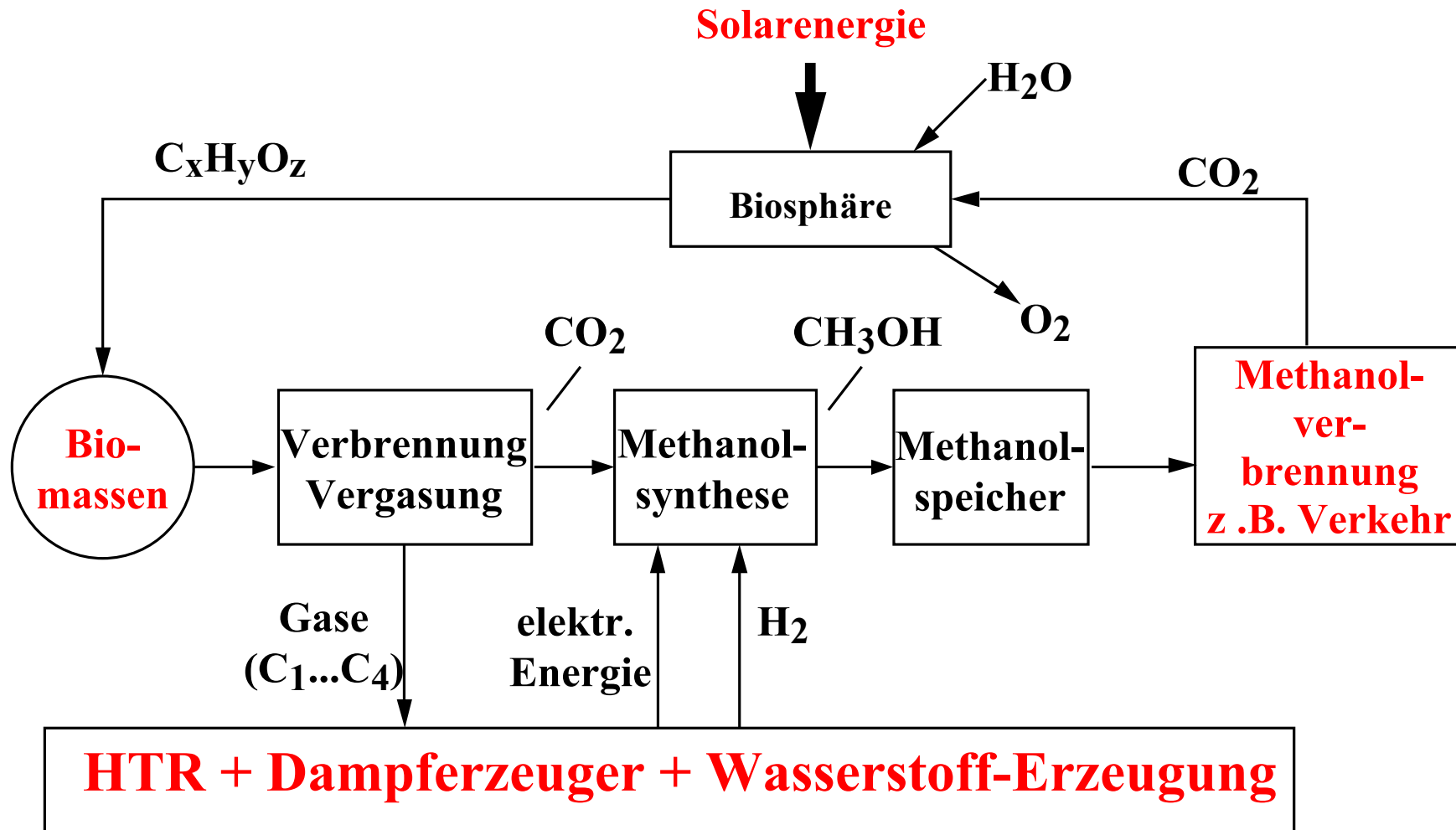
Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Kohle durch Kohlehydrierung



Konv.: 3,2 t Kohle → 1 t flüssige KW-stoffe + 4,5 t CO₂

Nuklear: 1,8 t Kohle + 10 MWh_{th} → 1 t flüssige KW-stoffe

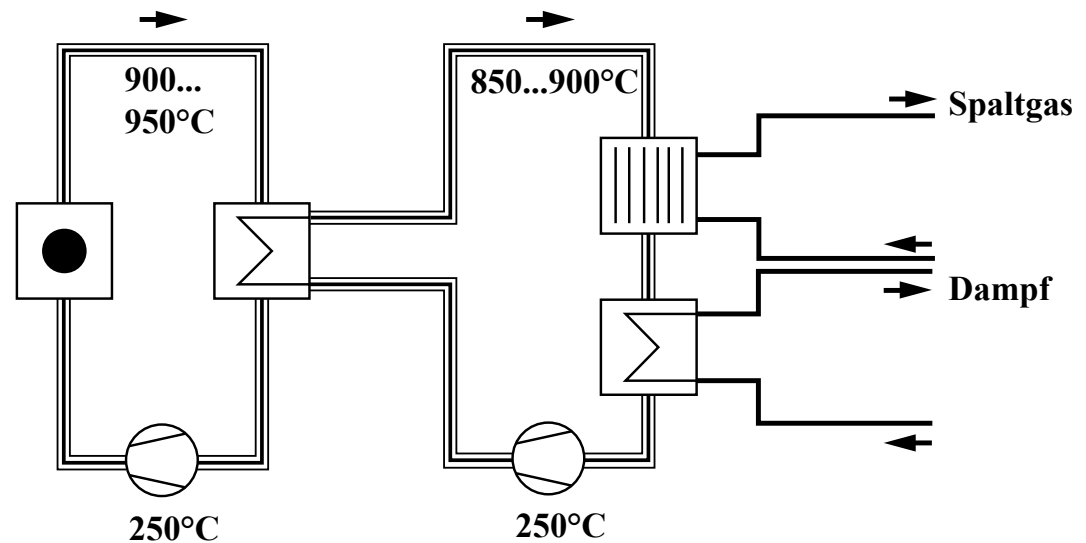
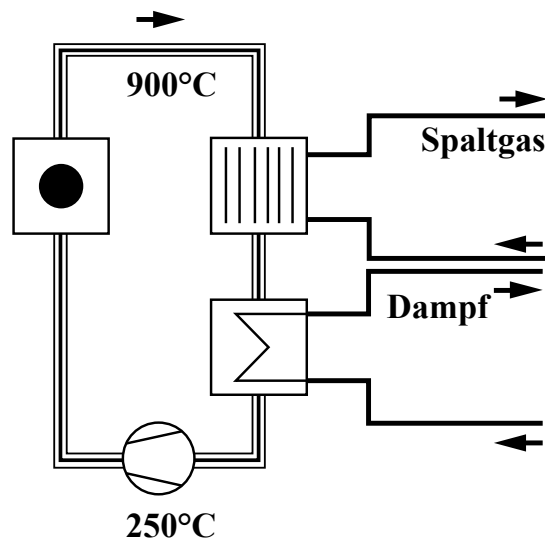
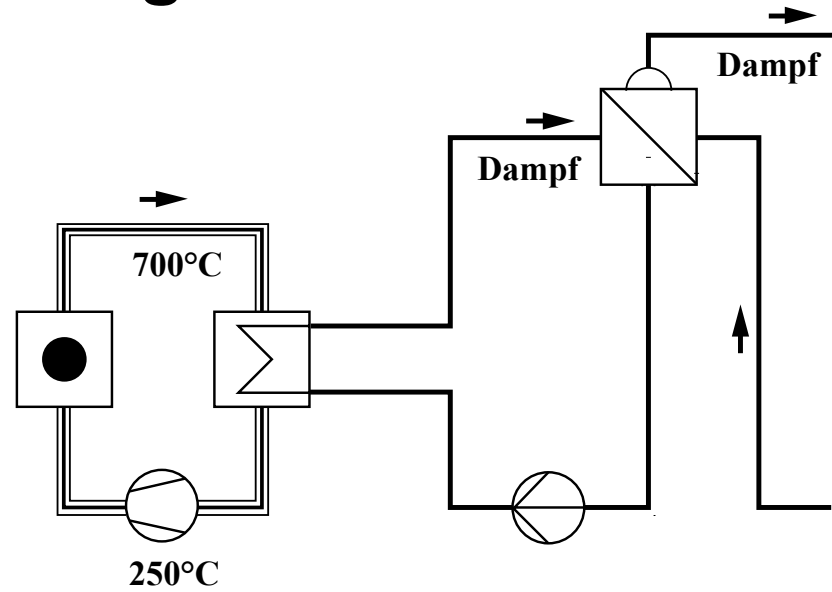
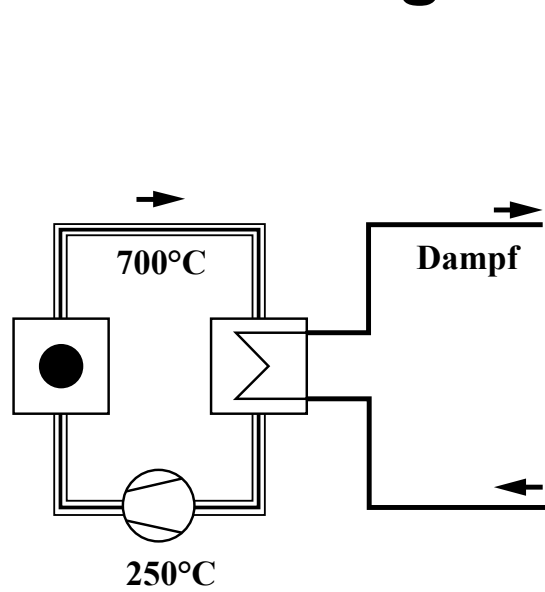
Gewinnung von flüssigen Kohlenwasserstoffen aus Biomassen und Nuklearenergie



Konv.: 12 t Biomasse → 1 t flüssige KW-stoffe (z. B. CH_3OH)

Nuklear: 12 t Biomasse + 10 MWh_{th} → 2 t flüssige KW-stoffe (z. B. CH_3OH)

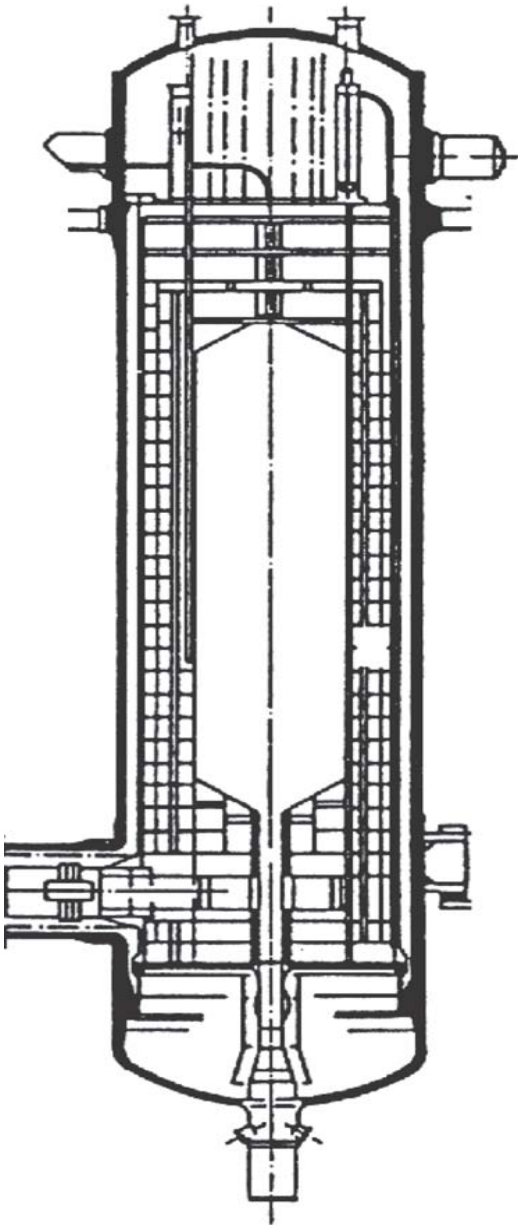
Einkopplung von nuklearer Wärme in Prozesse zur Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen



Technische Aufgaben

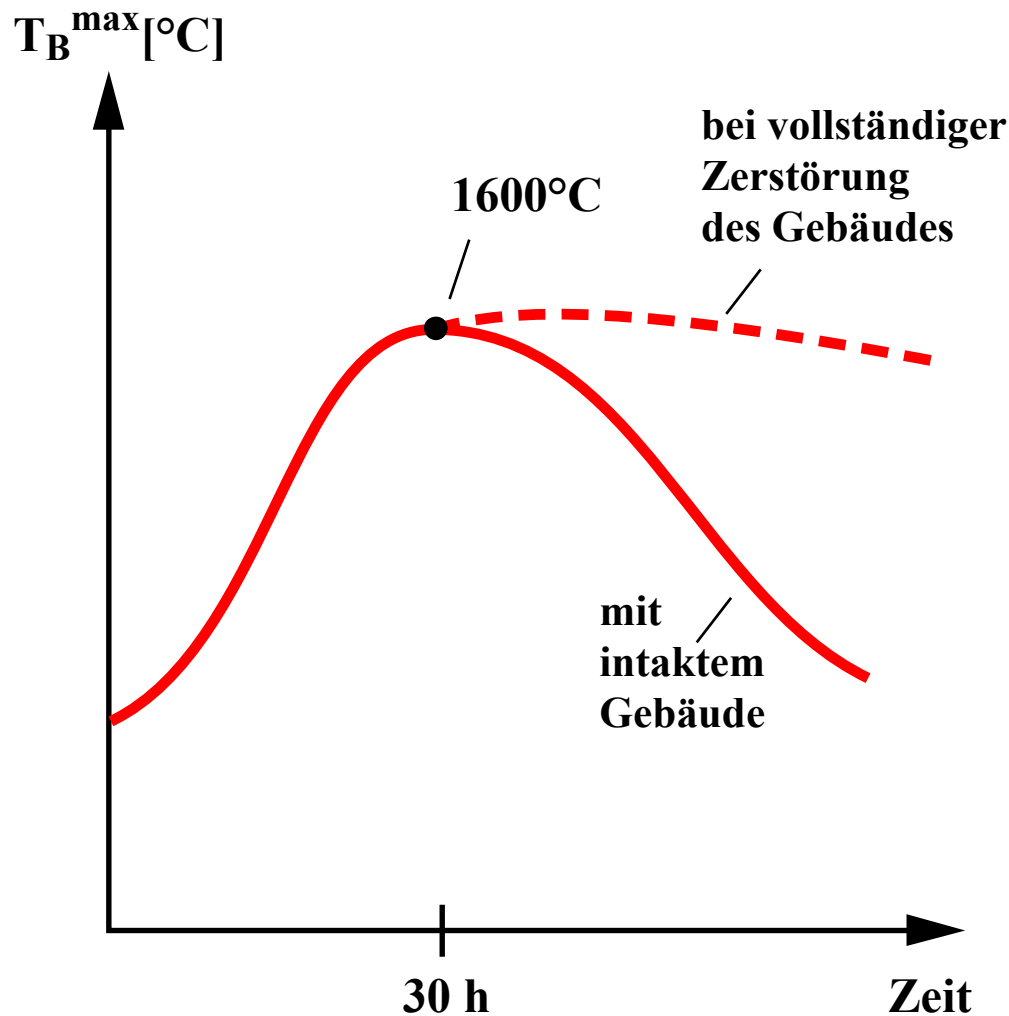
- **modularer HTR (200 bis 400 MW_{th})** mit einer **Heliumaustrittstemperatur** von **900 bis 950°C**
- **Zwischenkreislauf - Wärmeübertrager** mit einer Temperatur von **850 bis 900°C** auf der **Sekundärseite**
- **Steam - Reformer** mit **Spaltendtemperaturen** von **800°C** und Heliumbeheizung
- **Materialien** für Wandtemperaturen von **900°C** und Lebensdauern von **100 000 h**
- **Lösung von Kopplungsfragen** zwischen Reaktor und Prozess (z. B. Tritiumpermetation, Prozessgase im Containment)
- Realisierung einer **neuartigen Sicherheitsanforderung** bei modularen HTR (**keine katastrophalen Freisetzungen** von **Radioaktivität** bei allen denkbaren Störereignissen)

Modularer HTR als nukleare Wärmequelle



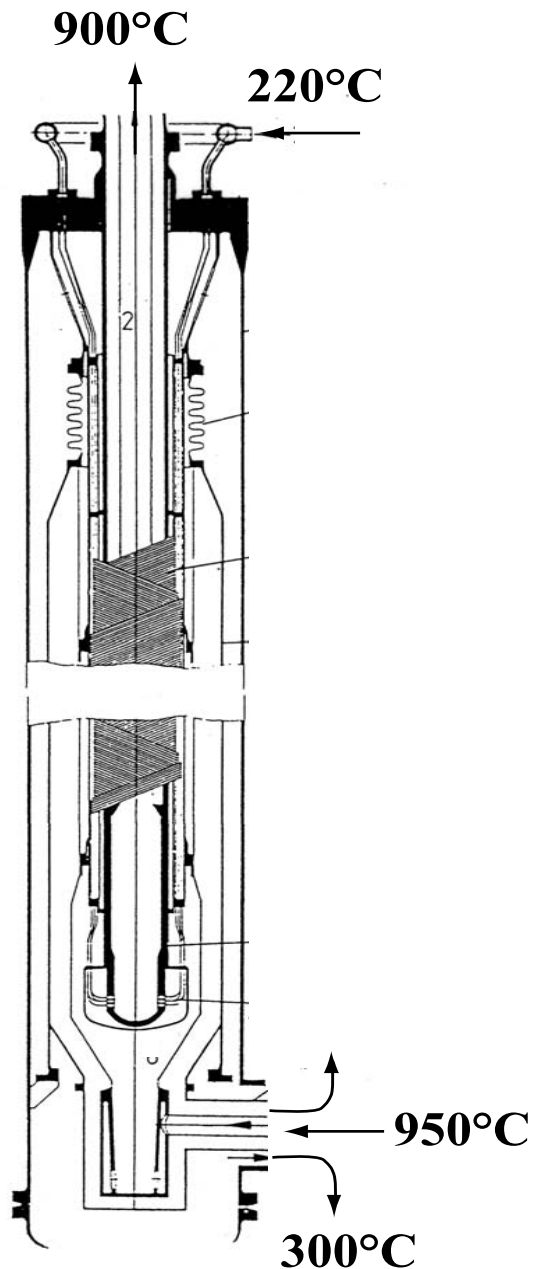
- modularer **HTR** mit Leistung von **200 MW_{th}** ist **universelle Wärmequelle**; System ist technisch ausführbar
- **Heliumtemperatur** von **950°C** ist erreichbar bei **Brennstofftemperatur** unter **1100°C**
- **Reaktorkern** kann auch bei vollständigem Verlust der aktiven Kühlung **nicht schmelzen** – selbsttätige Nachwärmeabfuhr
- **Nukleare Exkursionen** können die **Brennelemente nicht zerstören**
- **Korrosionseffekte** haben bei richtiger Gestaltung des Primärkreises und des Reaktorgebäudes **keine unzulässigen Spaltproduktfreisetzungen** zur Folge
- Insgesamt bleiben bei allen denkbaren Störfällen die **Spaltproduktfreisetzungen** auf **<10⁻⁵** des Inventars beschränkt: praktisch **keine radiologischen Folgen** außerhalb der Anlage

Modularer HTR für nukleare Wärme



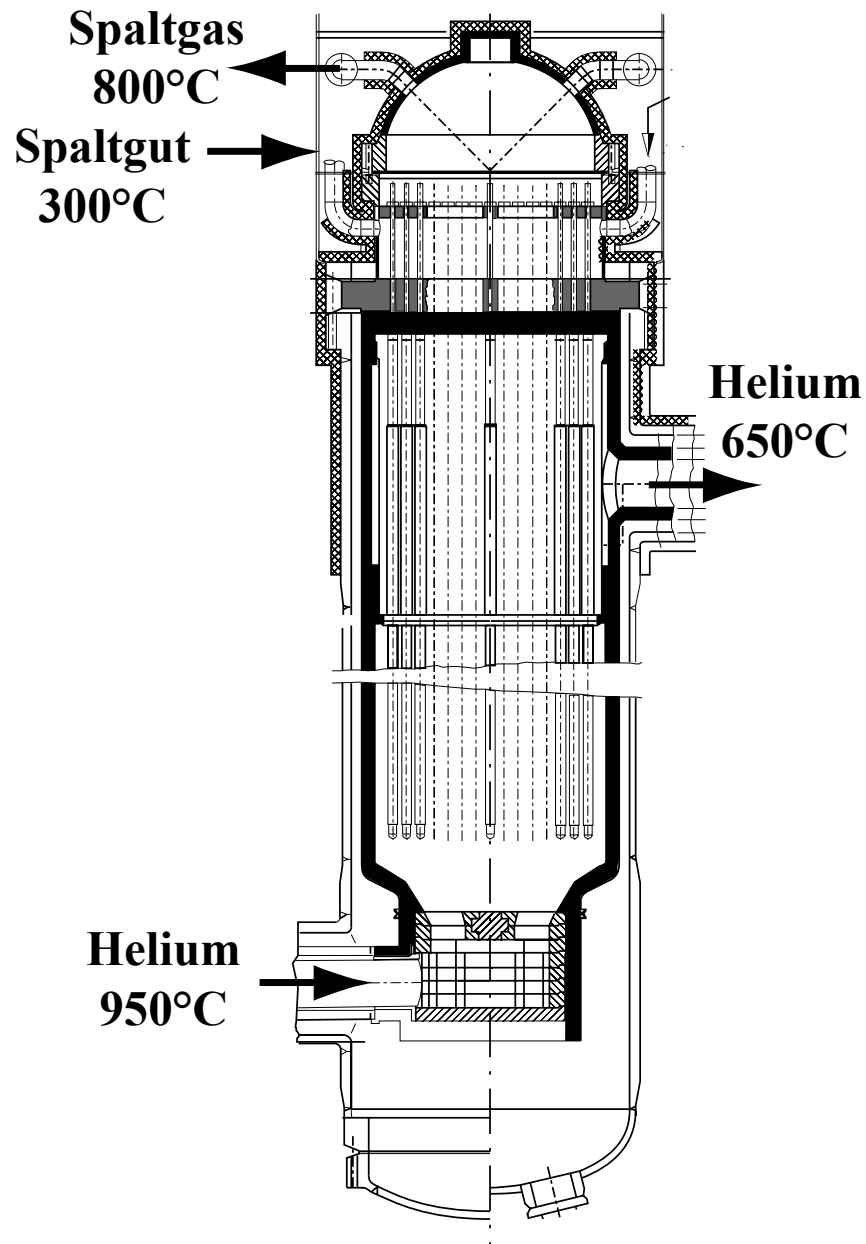
- **Selbsttätige Nachwärmeabfuhr** (nur Wärmeleitung, Wärmestrahlung, freie Konvektion) sorgt im Normalfall dafür, dass **Brennstofftemperatur T_B^{max} immer $< 1600^\circ\text{C}$ bleibt**
- Dann bleiben die **Spaltprodukte** praktisch vollständig **in den Brennelementen: keine radiologische Katastrophe möglich**
- Bei vollständiger Zerstörung des Reaktorgebäudes z. B. durch Terrorismus wirkt das Prinzip der **selbsttätigen Nachwärmeabfuhr** ebenfalls: **$T_B^{max} < 1600^\circ\text{C}$, aber verzögerte Abkühlung**

He / He-Zwischenkreislauf-Wärmeübertrager



- Der **Zwischenkreislauf-Wärmeübertrager** ist für viele Anwendungen die **Schlüsselkomponente** für die Trennung von Primär- und Sekundärkreislauf
- Heliumbeheizung mit **900 bis 950°C** ist realisierbar
- Sekundärseitige Heliumtemperatur **850 bis 900°C**
- 2 Wärmeübertragersysteme mit **10 MW** Leistung erfolgreich über **10 000 h** getestet
- Extrapolierbarkeit auf Leistung von **100 MW** belegt
- Material für **100 000 h** Einsatzzeit ist getestet und verfügbar
- Weitere Komponenten des Zwischenkreislaufs wurden erfolgreich getestet (**Heißgasleitungen, Ventile, Gebläse, Dampferzeuger**)

Steamreformer zur H₂-Erzeugung



- **Steamreformerprozess** ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$) ist **Schlüsselprozess** für viele Anwendungen
- **Prozess** aus konventioneller Technik **gut bekannt**
- Heliumbeheizung mit 900 ... 950°C, **hohe Heizflächenbelastung**
- Spaltendtemperatur: 800°C, **hohe Rate** der katalytischen **Methanumsetzung**
- Spaltrohrbündel mit **30 Originalrohren** erfolgreich über **10 000 h** getestet (EVA II, **10 MW, 950°C**)
- Extrapolierbarkeit auf Komponente mit **100 MW** belegt
- **Material** für **100 000 h** Einsatzzeit getestet und verfügbar

Gesamtbewertung

- Der **Markt für Treibstoffe** hat einen **ähnlichen großen Umfang** wie der für **elektrische Energie**.
- Verfahren mit Einsatz von **nuklearer Wärme** gestatten eine **Halbierung des Rohstoffeinsatzes**: **Schonung von Kohlenstoffressourcen**.
- Bei allen Verfahren mit **Einsatz von nuklearer Wärme** wird die **CO₂-Emission** bei der Herstellung der flüssigen Kohlenwasserstoffe eingespart: dies dient der **Umweltschonung**.
- **Nukleare Verfahren** sind **kostengünstiger** als konventionelle Verfahren; die nukleare Wärme ist um einen **Faktor 2** günstiger als Wärme aus der Verbrennung von Öl; **langfristig** bleiben die Kosten von **nuklearer Wärme** praktisch **konstant**.
- Die **Techniken** zur Herstellung von flüssigen Kohlenwasserstoffen sind praktisch **verfügbar**: besonderes **Know How** ist in **Deutschland** vorhanden.
- Die **Verfahren** sind äußerst interessant und **wichtig** für die **Zukunft**. **International** sind **große Bemühungen** zur Etablierung der Verfahren im Gange.