

PASSIVE SICHERHEIT IN MODERNEN KERNREAKTOREN

Warum Unfälle wie Tschernobyl und Fukushima heute nicht passieren können?

Vergleichsanalyse mit Deep Fission (DB-PWR) · VVER-1200/Akkuyu TR · RITM-200N · HTR-PM · AP1000
Reaktoren | April 2026

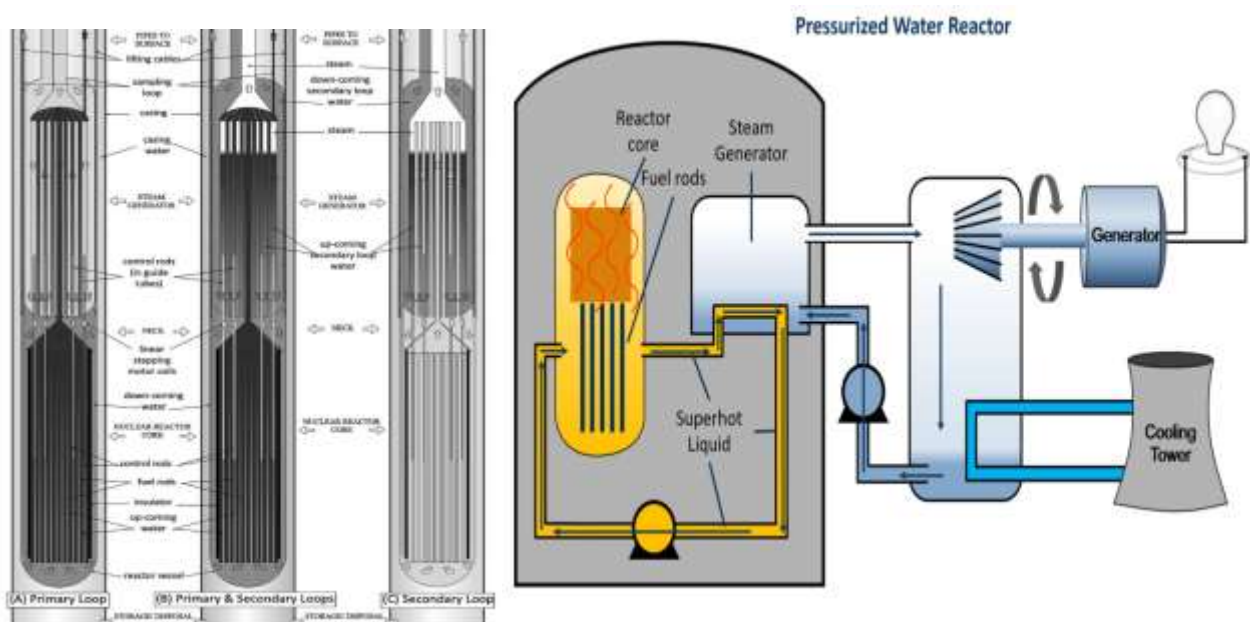
Zusammenfassung

Die Katastrophen von Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011) waren keine unvermeidlichen Folgen der Kernenergie, sondern das Ergebnis konkreter konstruktiver Mängel: ein positiver Dampfblasenkoeffizient (eine gefährliche Eigenschaft, bei der Kühlmittelverlust die Leistung weiter steigert statt sie zu bremsen), fehlende Containment-Hülle (schützende Stahl-Beton-Umhüllung des Reaktors) und im Keller untergebrachte Notstromaggregate.

Moderne Reaktordesigns der Generation III+ und IV (neueste Reaktorgeneration mit erhöhten Sicherheitsstandards) haben diese Schwachstellen durch passive und inhärente Sicherheitsmechanismen (Schutzsysteme, die ohne Strom oder menschliches Eingreifen funktionieren) physikalisch beseitigt.

Alle fünf in diesem Bericht verglichenen Reaktorkonzepte – Deep Fission (DB-PWR), VVER-1200/Akkuyu, RITM-200N (SMR), HTR-PM und AP1000 – verfügen über ausgeprägt negative Reaktivitätskoeffizienten (physikalische Selbstbremsung: bei Überhitzung drosselt sich die Reaktion automatisch), schwerkraftbetriebene Steuerstabsysteme (Abschaltstäbe, die allein durch die Schwerkraft in den Kern fallen), passive Nachwärme-Abfuhr (Kühlung der Restwärme ohne Pumpen oder Strom) für mindestens 72 Stunden sowie robuste Containment-Strukturen (schützende Hülle um den Reaktorkern). Der AP1000 ist dabei als erster Großreaktor weltweit ausschließlich auf Basis passiver Sicherheitssysteme von der US-NRC (US-amerikanische Atomaufsichtsbehörde) zertifiziert worden und demonstriert mit vier laufenden Einheiten in China die kommerzielle Reife dieses Ansatzes. Der HTR-PM (Hochtemperaturreaktor-Pebble-Bed-Modul, ein gasgekühlter Kugelhaufenreaktor) hat 2024 inhärente Sicherheit erstmals im kommerziellen Maßstab experimentell bewiesen. Der Deep-Fission-Reaktor geht durch seine 1.500-Meter-Tiefenlage und den passiven hydrostatischen Druck (Wasserdruck durch die Schwerkraft der Wassersäule) am weitesten in der geologischen und physikalischen Isolation.

Passive Sicherheit ist heute keine optionale Zusatzleistung, sondern regulatorische Grundvoraussetzung und entscheidender Faktor für gesellschaftliche Akzeptanz sowie wirtschaftliche Versicherbarkeit neuer Kernkraftwerke. Die ingenieurtechnischen Lehren aus beiden Unfällen sind in Stahl, Beton und Physik gegossen – **und schließen Unfälle dieser Art konstruktiv aus.**



Deep-Fission-Schwerkraftreaktor in 3 Teilen dargestellt und PWR

1. Einleitung

Die Nuklearkatastrophen von Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011) haben der Welt vor Augen geführt, wie verheerend aktive Sicherheitssysteme versagen können, wenn Stromversorgung oder menschliches Urteilsvermögen ausfallen. Beide Ereignisse haben die Kerntechnik grundlegend verändert: **Reaktordesigns der Generation III+ (neueste Reaktorgeneration mit verbesserten Sicherheitsstandards seit den 1990er-Jahren) sowie Kleine Modulare Reaktoren (SMR – kompakte, fabrikmäßig vorgefertigte Reaktoren mit geringerer Leistung) setzen heute konsequent auf passive und inhärente Sicherheitsmechanismen (Schutzsysteme ohne externe Energie oder menschliche Eingriffe), die auf physikalischen Gesetzen beruhen – unabhängig von externer Energie oder menschlichen Eingriffen.**

Der Unfall in Tschernobyl wurde durch den positiven Dampfblasenkoeffizienten des RBMK-1000-Reaktors (sowjetischer Siedewasser-Druckröhrenreaktor mit graphitmoderiertem Kern) verursacht: Ein Kühlmittelverlust steigerte die Reaktivität (Intensität der Kettenreaktion), anstatt sie zu dämpfen. Während eines Niedrigleistungstests deaktivierten Operatoren Sicherheitssysteme, worauf ein unkontrollierter Leistungsanstieg auf ca. 30.000 MW thermisch zu einer Dampf- und Chemieexplosion führte. **Da keine Containment-Hülle (schützende Stahl-Beton-Umhüllung) vorhanden war**, gelangten rund 400 Tonnen radioaktiver Materialien direkt in die Atmosphäre. Mehr als 350.000 Menschen mussten dauerhaft evakuiert werden.

Fukushima hingegen war keine Folge eines Reaktorkonstruktionsfehlers, sondern unzureichender Katastrophenplanung: Der Tsunami vom 11. März 2011 überflutete die in den Kellern untergebrachten Notstromaggregate innerhalb weniger Minuten. Ohne Kühlung erzeugte die Nachzerfallswärme (Wärme durch radioaktiven Zerfall der Spaltprodukte nach der Abschaltung) Wasserstoffgas, das in den Reaktorgebäuden 1, 3 und 4 explodierte. Rund 154.000 Menschen wurden evakuiert; der Unfall erhielt die höchste INES-Stufe 7 (Internationale Nuklearer-Ereignis-Skala: Stufe 7 ist die schwerste Kategorie). Besonders gravierend: Der Betreiber TEPCO war in den Jahren vor dem Unfall mehrfach – u. a. durch die japanische Atomaufsichtsbehörde NISA sowie interne Gutachten – darauf hingewiesen worden, die Notstromaggregate aus den überflutungsgefährdeten Kellern in höhere Stockwerke zu verlagern. Diese Warnungen wurden ignoriert. Die entscheidende ingenieurtechnische Lehre lautet: Hätte ein passives Nachwärme-Abfuhrsystem (Kühlsystem ohne Strom oder Pumpen) sowie eine hochwassersichere Notstromanordnung bestanden, wäre der Unfall beherrschbar geblieben.

2. Passive Sicherheitsmechanismen im Überblick

2.1 Negative Reaktivitätskoeffizienten – Inhärente Physik

Der negative Temperatur- und Dampfblasenkoeffizient (physikalische Kennzahl, die angibt, wie stark Temperatur oder Dampfblasen die Reaktionsintensität beeinflussen) ist die grundlegendste passive Sicherheitsmaßnahme: Überhitzt sich der Reaktorkern, dehnt sich das Kristallgitter des Brennstoffs aus, die Neutronenabsorption (Einfang der spaltungsauslösenden Teilchen) ändert sich, und die Spaltleistung sinkt automatisch innerhalb von Millisekunden – ganz ohne mechanische Teile oder elektrische Energie. Ebenso verlangsamt sich die Kernreaktion von selbst, sobald Dampfblasen im Kühlmittel entstehen, weil die Moderation (Verlangsamung der Neutronen zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion) abnimmt. Genau dieser Koeffizient war beim Tschernobyl RBMK-Reaktor (sowjetischer Reaktortyp ohne schützende Containment-Hülle) in Tschernobyl positiv – ein fataler Designfehler, der den Unfall physikalisch ermöglichte. Alle modernen Generation-III+-Designs und SMRs (Kleine Modulare Reaktoren) verfügen hingegen über ausgeprägt negative Koeffizienten.

2.2 Passive Nachwärme-Abfuhr und natürliche Zirkulation

Auch nach der Abschaltung eines Reaktors wird radioaktive Zerfallswärme über viele Stunden erzeugt. Passive Wärmeabfuhrsysteme (PHRS – Passive Heat Removal System; Kühlsystem ohne Pumpen oder externe Energie) nutzen Schwerkraft und Dichteunterschiede (wärmeres Wasser steigt auf, kühleres sinkt ab – natürliche Zirkulation), um diese Wärme ohne Pumpen abzuführen.

Der VVER-1200 (russischer Druckwasserreaktor der Generation III+, gebaut in Akkuyu/Türkei) gewährleistet durch sein luftgekühltes PHRS mindestens 72 Stunden autonome Kühlung ohne jeglichen Eingriff.

Der Deep-Fission-Schwerkraftreaktor profitiert zusätzlich von der enormen thermischen Trägheit (Fähigkeit, Wärme langsam abzugeben) einer 1.500 Meter hohen Wassersäule. Die Bedeutung dieser Systeme wurde im Juli 2024 eindrucksvoll unter Beweis gestellt:

Der chinesische Hochtemperaturreaktor HTR-PM (gasgekühlter Kugelhaufenreaktor, der inhärente Sicherheit durch das Brennstoffdesign erreicht) überstand erstmals im kommerziellen Maßstab einen vollständigen Kühlmittelverlust ohne jede Intervention – ein Meilenstein für inhärente Sicherheit (höchste Sicherheitsstufe durch reine Physik). **In Fukushima existierte kein vergleichbares System; als die Pumpen ausfielen, gab es keinen passiven Fallback (Rückfalloption ohne Strom).**

2.3 Schwerkraftgesteuerte Steuerstäbe, Containment und physikalische Isolation

In modernen Reaktoren fallen Steuerstäbe (neutronenabsorbierende Stäbe, die die Kettenreaktion bremsen oder stoppen) bei Stromausfall automatisch durch die Schwerkraft in den Kern und stoppen die Kettenreaktion innerhalb von Sekunden.

Im Tschernobyl Reaktor wurden sie elektrisch angetrieben; zudem verursachte ein Designfehler an den graphitierten Stabspitzen (Graphitspitzen verstärken kurzfristig die Reaktion statt sie zu hemmen) beim Einfahren kurzzeitig einen Leistungsanstieg. **Der schwerwiegendste konstruktive Mangel Tschernobyls war das vollständige Fehlen einer Stahl-Beton-Containment-Hülle** (druckfeste Umhüllung zum Einschluss radioaktiver Stoffe) – in westlichen Reaktoren seit Jahrzehnten Standard.

Der VVER-1200 Akkuyu TR Reaktor verfügt heute über eine doppelwandige Containment-Struktur (zwei übereinanderliegende Schutzhüllen für doppelten Schutz).

Der Deep-Fission-Reaktor geht noch weiter: Eingebettet in 1.500 Meter Tiefe bieten Milliarden Tonnen Gestein einen absolut passiven Schutz gegen Flugzeugabstürze, Erdbeben, Überflutungen und Terrorangriffe.

Beim RITM-200N SMR (kompakter russischer Schiffsreaktor, der auch für Landanwendungen adaptiert wurde) und HTR-PM übernehmen mehrschichtige TRISO-Brennstoffpartikel (triply coated isotropic particles – dreifach ummantelte Brennstoffkugeln, **die jeweils eine eigene Miniatur-Containment-Hülle bilden**) **die Rolle der ersten Einschlussbarriere.**

2.4 Hydrostatischer Druck – Der einzigartige Beitrag des Tiefbohr-Reaktors

Herkömmliche Druckwasserreaktoren (Reaktortyp, bei dem Wasser unter hohem Druck als Kühlmittel dient) benötigen aktive Druckhalter (technische Geräte zur Aufrechterhaltung des Betriebsdrucks), um den Betriebsdruck von ca. 155 bar aufrechtzuerhalten.

Der Deep-Fission-Reaktor erzeugt durch die 1.500-Meter-Wassersäule passiv rund 160 bar hydrostatischen Druck ($P = pgh$, d. h. Druck = Dichte $\times$ Erdbeschleunigung $\times$ Höhe der Wassersäule) – **selbst wenn alle aktiven Komponenten versagen, bleibt der Druck physikalisch bestehen.** Dieser erhöhte Druck hebt zudem den Siedepunkt des Kühlwassers auf ca. 345 °C und verstärkt dadurch den negativen Dampfblasenkoeffizienten (physikalische Selbstbremsung der Reaktion) erheblich.

AP1000 belegt mit vier in Betrieb befindlichen Einheiten in China (Sanmen, Haiyang) und weiteren im Bau, dass passiv-gesicherte Großreaktoren kommerzielle Realität sind.

3. Schlussfolgerung

Tschernobyl und Fukushima haben mit unterschiedlichen physikalischen Ursachen begonnen, aber denselben katastrophalen Verlauf genommen, weil letzte Sicherheitsbarrieren entweder konstruktiv schwach oder falsch positioniert waren. Die Nukleartechnik hat diese Lektionen konsequent in konkrete Ingenieurösungen umgesetzt: Negative Reaktivitätskoeffizienten (physikalische Selbstbremsung der Kettenreaktion), passive Nachwärme-Abfuhr (Kühlung der Restwärme ohne Pumpen), schwerkraftbetriebene Steuerstäbe (fallen bei Stromausfall automatisch in den Kern), robuste Containment-Strukturen (druckfeste Schutzhüllen um den Reaktor) und eine durchdachte physikalische Anordnung der Notfallsysteme bilden zusammen eine lückenlose passive Verteidigungsstrategie, die die spezifischen Ursachen beider Unfälle physikalisch ausschließt.

Die Zukunft der nuklearen Sicherheit liegt in der synergetischen Integration mehrerer Schutzebenen: inhärente Physik (Sicherheit durch Materialeigenschaften selbst), passive Mechanik (Schutzmechanismen ohne Strom oder Pumpen), passive Thermohydraulik (Wärmetransport durch natürliche Strömung), physikalische Isolation (Schutz durch geologische Lage) und chemische Passivabschaltung (automatisches Einleiten von Neutronenabsorbern wie Borsäure). **Diese Ebenen beruhen ausschließlich auf den Gesetzen der Physik – sie wirken unabhängig von Strom, Operatoreingriffen oder äußeren Umständen. Unfälle vom Ausmaß Tschernobyls oder Fukushimas sind durch die konstruktiven Merkmale moderner Reaktoren der Generation III+ und IV (neueste Reaktorgenerationen) physikalisch ausgeschlossen.**

4. Detailvergleich: Passive Sicherheitsmerkmale im Überblick

Die nachfolgende Tabelle fasst die sechs zentralen passiven Sicherheitsmechanismen für alle fünf verglichenen Reaktorkonzepte zusammen und stellt diese den historischen Mängeln von Tschernobyl und Fukushima gegenüber. Die Bewertungsskala reicht von einer herausragenden passiven Eigenschaft (✓✓✓) über eine starke (✓✓) und vorhandene (✓) Ausprägung bis hin zu einer nur teilweise passiven Lösung (△) und einem sicherheitskritischen Fehlen (X).

Mechanismus	Deep Fission	VVER-1200	RITM-200N / HTR-PM	AP1000	Tschernobyl & Fukushima	Erläuterung
Negativer Reaktivitätskoeffizient	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	X Tschernobyl: POSITIV	Physikalischer Selbstschutz; kein Strom nötig
Passive Nachwärme-Abfuhr (PHRS)	✓✓✓	✓✓ ≥72h	✓✓	✓✓ ≥72 h	X Fukushima: FEHLTE	Schwerkraft/Konvektion ohne Pumpe
Schwerkraft-SCRAM (Steuerstäbe)	✓✓	✓✓ + Bor	✓✓	✓✓ + Bor	X Tschernobyl: el. Antrieb	Abschaltung in Sekunden ohne Strom
Containment-Hülle	✓✓✓ Fels	✓✓✓ Doppel	✓ TRISO	✓✓ Stahl	X Tschernobyl: FEHLTE	Einschluss radioaktiver Stoffe
Notfall-Systemposition	✓✓✓ Unterirdisch	✓✓ Erhöht	✓	✓✓ Erhöht	X Fukushima: KELLER	Schutz vor Überflutung & Katastrophen
Hydrostatischer Passifdruck	✓✓✓ ~160 bar	△ Aktiv	△ Gemischt	– (kein Faktor)	Einzigartig bei Deep Fission (P = pgh)	

Legende: ✓✓✓ = Herausragende Passiveigenschaft | ✓✓ = Stark | ✓ = Vorhanden | △ = Teilweise passiv | X = Fehlte / trug zum Unfall bei

5. Bewertung und Ausblick

Die Tabelle macht deutlich, dass kein Reaktortyp in allen Kategorien gleichermaßen brilliert – jedes Konzept hat seinen spezifischen Schwerpunkt. Der Deep-Fission-Reaktor sticht durch den einzigartigen hydrostatischen Passifdruck (durch Wassersäule erzeugter Druck ohne Technik) und seine vollständige Untergrundlage hervor, während der VVER-1200/Akkuyu mit seiner doppelten Containment-Hülle (zwei übereinanderliegende Schutzhüllen) und dem erprobten PHRS (passives Wärmeabfuhrsystem ohne Strom) das reifste Gesamtpaket für großtechnische Anlagen bietet. HTR-PM und RITM-200N ergänzen das Spektrum mit inhärent sicheren Brennstoffkonzepten (TRISO – mehrfach ummantelte Brennstoffkugeln mit eingebauter Schutzfunktion) und kompakter Bauweise. Der AP1000 (Westinghouse) nimmt als einziger Reaktor in dieser Vergleichsgruppe eine besondere Stellung ein: Er ist der erste und bisher einzige Großreaktor, der von der US-NRC (US-amerikanische Atomaufsichtsbehörde) ausschließlich auf Basis passiver Sicherheitssysteme zertifiziert wurde, und belegt mit vier kommerziell betriebenen Einheiten in China, dass diese Philosophie praxistauglich ist. Sein passives Containment-Kühlsystem (PCS – Passive Containment Cooling System; kühlt die Schutzhülle ohne Pumpen) und das passive Kernnotkühlsystem (PCCS – Passive Core Cooling System; kühlt den Reaktorkern ohne externe Energie) liefern mindestens 72 Stunden Sicherheitsmarge ohne Fremdenergie – vergleichbar mit dem VVER-1200, jedoch ohne dessen doppelte Containment-Hülle.

Regulatorisch betrachtet spiegelt sich dieser Fortschritt in den aktuellen IAEA-Sicherheitsstandards (IAEA – Internationale Atomenergiebehörde; Weltorganisation zur Förderung sicherer Kernenergienutzung) wider: Die Anforderungen der Safety Standards Series SSR-2/1 (Rev. 1, 2016) (internationale Normenreihe für die Sicherheit neuer Kernkraftwerke) verlangen für neue Reaktordesigns explizit passiv wirkende Sicherheitsfunktionen als Kernelement der Verteidigung in der Tiefe (Defence in Depth – mehrstufiges Sicherheitskonzept, das mehrere unabhängige Schutzbarrieren übereinanderstapelt). Die Europäische Union und die USA haben diese Vorgaben in ihre nationalen Genehmigungsrahmen integriert, was erklärt, warum alle nach 2010 lizenzierten Reaktordesigns mindestens 72-Stunden-Passivkühlung ohne Fremdenergie nachweisen müssen.

Der globale Trend zur Dekarbonisierung (Umstieg auf CO₂-arme Energieträger) verleiht der Kerntechnik neuen Auftrieb: **Laut IAEA-Prognosen (2024) könnten bis 2050 weltweit bis zu 1.000 GW (Gigawatt; entspricht ca. 1.000 großen Kraftwerksblöcken) neue Kernkraftkapazität errichtet werden, wobei SMRs (Kleine Modulare Reaktoren) einen wachsenden Marktanteil einnehmen.** Passive Sicherheit ist dabei kein Luxusmerkmal, sondern eine Grundvoraussetzung für gesellschaftliche Akzeptanz, wirtschaftliche Versicherbarkeit und regulatorische Zulassung. **Die ingenieurtechnischen Lehren aus Tschernobyl und Fukushima sind heute fest in Stahl, Beton und Physik gegossen – und bilden das solide Fundament für eine sichere nukleare Zukunft.**

Erstellt von Yüksel Atakan Dr. Radiation Physiker, ybatakan4@gmail.com, April 2025 in Unterstützung von KI

Glossar: Wichtige Fachbegriffe

Reaktivität: Maß dafür, wie stark eine Kernspaltungsreaktion von dem Gleichgewichtszustand abweicht. Positive Reaktivität bedeutet ansteigende Kettenreaktion, negative Reaktivität bedeutet abklingende Kettenreaktion.

Positiver Dampfblasenkoeffizient: Gefährliche Eigenschaft eines Reaktors, bei der die Bildung von Dampfblasen im Kühlmittel die Leistung weiter steigert statt sie zu dämpfen – ein selbstverstärkender Effekt, der den Tschernobyl-Unfall physikalisch ermöglichte.

Negativer Reaktivitätskoeffizient: Sicherheitsfördernde Eigenschaft, bei der ein Temperatur- oder Druckanstieg die Reaktivität automatisch senkt und die Kernreaktion von selbst verlangsamt – ohne Strom oder menschliche Eingriffe.

Nachzerfallswärme: Wärme, die ein Reaktorkern auch nach der Abschaltung noch stundenlang durch den radioaktiven Zerfall von Spaltprodukten erzeugt. Sie muss aktiv oder passiv abgeführt werden, da sonst Überhitzung und Kernschäden drohen.

Passives Sicherheitssystem (PHRS): Sicherheitssystem, das ausschließlich auf physikalischen Kräften wie Schwerkraft, natürlicher Konvektion oder Dichteunterschieden beruht – ohne Pumpen, Ventile oder externe Stromversorgung.

Containment-Hülle: Druckfeste Stahl- und Betonkonstruktion, die den Reaktorkern umschließt und im Störfall die Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt verhindert. Beim RBMK-Reaktor in Tschernobyl fehlte sie vollständig.

SCRAM (Notabschaltung): Schnelle Notabschaltung eines Reaktors durch das sofortige Einfahren aller Steuerstäbe in den Kern. **In modernen Reaktoren erfolgt dies schwerkraftgestützt passiv, unabhängig von externer Stromversorgung.**

TRISO-Brennstoffpartikel: Mehrfach ummantelte kugelförmige Brennstoffpartikel, bei denen jede Kugel ihre eigene miniaturisierte Containment-Hülle bildet. Selbst bei extremen Temperaturen behalten sie ihre Integrität und verhindern die Freisetzung von Spaltprodukten.

Inhärente Sicherheit: Höchste Stufe passiver Sicherheit: Der Reaktor hält sich aufgrund seiner physikalischen Materialeigenschaften und Geometrie selbst sicher – ohne jegliche aktive oder passive Eingriffe. Ein Überhitzen oder unkontrolliertes Durchgehen ist physikalisch unmöglich.

Literatur

- 1- IAEA (2006). Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts. Chernobyl Forum Report. Internationale Atomenergiebehörde, Wien. Verfügbar unter: iaea.org/publications/7382
- 2- IAEA (2015). The Fukushima Daiichi Accident – Report by the Director General. Bände I–V. Internationale Atomenergiebehörde, Wien. Verfügbar unter: iaea.org/publications/10962

- 3- *Nature Communications* (2025). Testing multi-modular design feasibility in the HTR-PM high-temperature gas-cooled reactor. doi.org/10.1038/s41467-025-58194-7
- 4- Deep Fission Inc. (2024). *Technology Overview — Deep PWR, Deep Geo Vault, Deep Geothermal Steam Generator*. <https://www.deepfission.com/technology>
- 5- Deep Fission Inc. (2024). *Regulatory Engagement Plan (REP) — DFBR-1 Standard Design Approval*. U.S. NRC, ML24135A163
- 6- Redondo-Valero, E. et al. (2025). Safety margins improvement by means of the passive heat removal system and the HA-2 in VVER-1000/V320 reactors. *ScienceDirect — Nuclear Engineering and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.nucene.2025.105682>
- 7- Nuclear Engineering International (2024). The RITM-200N reactor as a terrestrial unit.: <https://www.neimagazine.com/analysis/the-ritm-200n-as-a-terrestrial-unit/>