

WARUM NEUE REAKTORKONZEPTE LEERE VERSPRECHEN SIND

Dieter Kuhn, Experimentalphysiker UZH, Stiftungsrat SES

Immer zahlreicher sind die Rufe nach «vorurteilsloser Beurteilung» der Frage, ob eine «neue Generation» von AKW uns die Probleme des Klimawandels vom Hals schaffen könne. Angeblich haben diese «neuen» AKW alle Nachteile der «alten» AKW (Risiko einer gigantischen Verstrahlung im Fall einer Panne, Endlagerung der Abfälle, Schutz des Kraftwerks vor Attentaten, usw.) nicht mehr und dafür den angeblichen Vorzug, sicher und zuverlässig CO₂-freien Bandstrom zu liefern. Wo also sind diese «unproblematischen» AKW, wegen denen man ein bereits erlassenes «Technologieverbot» zurücknehmen soll?



Schweizerische
Energie-Stiftung
Fondation Suisse
de l'Énergie

Sihlquai 67
8005 Zürich
Tel. 044 275 21 21

info@energiestiftung.ch
PC-Konto 80-3230-3

Was ist der aktuelle Stand der AKW-Technik?

In einem AKW werden Atomkerne gespalten. Dabei wird Energie in Form von Wärme freigesetzt, die für die Stromproduktion genutzt wird. Die Kernspaltung findet in einem Reaktor, dem Herzstück eines Atomkraftwerks, statt. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Reaktorkonzepte entworfen. Tatsächlich haben sich aber nur wenige davon durchgesetzt. Die überragende Mehrzahl aller AKW basieren auf sogenannten Druckwasserreaktoren.

Die heute genutzten Reaktorkonzepte unterscheiden sich vor allem durch:

- die Geschwindigkeit der vom Reaktor verwendeten Neutronen (schnelle bzw. thermische Reaktoren)
- den verwendeten Moderator (leichtes Wasser, schweres Wasser, Graphit oder kein Moderator) (Der Moderator ist diejenige Substanz, die dafür sorgt, dass die Neutronen die zum Spalten optimale Geschwindigkeit bzw. Energie haben. Diese liegt in der Regel in einem Bereich von weniger als 0.1 Elektronenvolt. In schnellen Reaktoren, die ohne Moderator arbeiten, liegt die Energie von Neutronen bei mindestens 10'000 Elektronenvolt)
- das verwendete Kühlmittel (leichtes Wasser, schweres Wasser, Gas, Natrium) (Das Kühlmittel des Primärkreislaufs überträgt die Wärmeenergie über den Wärmetauscher auf das Wasser des Sekundärkreislaufs, das dann als Dampf die Dampfturbine antreibt).

Daneben gibt es weitere wichtige Unterschiede, wie zum Beispiel Temperatur und Druck im Primärkreislauf, unterschiedliche Brennstoffarten (angereichertes Uran, Natururan, Mischoxid, usw), verschiedene Reaktoreinbauten, Steuer- und Sicherheitssysteme etc.

Betrachten wir den aktuellen Stand (25.07.2023) im Bereich der Leistungsreaktoren, also der AKW, die weltweit namhaft elektrische Energie produzieren. In Betrieb sind jetzt

- 301 leichtwassergekühlte und -moderierte Druckwasserreaktoren (PWR)
- 41 leichtwassergekühlte und -moderierte Siedewasserreaktoren (BWR)
- 46 schwerwassergekühlte und -moderierte Druckwasserreaktoren (PHWR)

- 11 leichtwassergekühlte, graphitmoderierte Reaktoren (LWGR)
- 8 gasgekühlte, graphitmoderierte Reaktoren (GCR)
- 2 Schnelle Brutreaktoren (FBR) sowie
- 1 gasgekühlter Hochtemperaturreaktor (HTGR)

Der PWR ist der weltweit mit Abstand am weitesten verbreitete Reaktortyp, gefolgt vom BWR. Bei beiden Reaktortypen handelt es sich um thermische Reaktoren, die dementsprechend einen Moderator zur Aufrechterhaltung einer Kettenreaktion nutzen und die im Reaktor freigesetzte Wärme über das Kühlmittel Wasser auf Dampfturbinen übertragen.

In der Schweiz sind diese Typen auch vertreten: Gösgen und Beznau sind PWR, Leibstadt (und Mühleberg) sind BWR. Überhaupt sind die Leichtwasserreaktoren sehr verbreitet, weil das in ihnen eingesetzte Leichtwasser H₂O eine Doppelrolle spielt: Es ist zugleich Moderator und Kühlmittel. Das hat gewisse praktische Vorteile, z.B. verglichen mit dem gasgekühlten graphitmoderierten Reaktor (GCR), dem Tschernobyl-Reaktor, wo Graphit als Moderator dient und CO₂ die Wärme abführt.

Die Atomindustrie basiert heute auf einigen wenigen Reaktorkonzepten. Bisher konnte sich kein alternatives Konzept gegenüber den althergebrachten Siede- und Druckwasserreaktoren durchsetzen – auch wenn Durchbrüche immer wieder angekündigt wurden.

Was bleibt sich bei allen AKW gleich, egal von welcher Bauart sie sind?

Atomkraftwerke (AKW) sind thermische Kraftwerke (wie z.B. auch Kohle- oder Gaskraftwerke), die Wärme freisetzen. Mithilfe dieser Wärme wird Dampf erzeugt, der Turbinen und damit Generatoren antreibt. Der Dampf muss nach der Turbine wieder kondensiert und als Wasser an den Ausgangspunkt zurückgeführt werden. Jene Kreisläufe, die direkt mit dem Reaktor verbunden sind, sind in sich geschlossen. Damit der Dampf nach der Turbine gekühlt und verflüssigt werden kann, ist ein dritter, offener Kreislauf nötig. Die abgeführte Wärme wird entweder an einen Fluss abgegeben (z.B. in Beznau oder früher in Mühleberg) oder über einen Kühlturm (in Gösgen und Leibstadt) an die Luft weitergeleitet.

→ Fakt Nr. 1: Der grösste Teil der in AKW erzeugten Wärme geht verloren.

Von 100% bei der Kernspaltung freigesetzter Wärme gehen etwa 65 % an den Fluss oder an die Luft; nur aus 35 % der Wärmeenergie entsteht letztlich elektrische Energie. Ein AKW hat darum einen Wirkungsgrad von 30 bis 40%. Einige neue Reaktorkonzepte versprechen höhere Wirkungsgrade. Bis heute existieren entsprechende Konzepte aber nur auf dem Papier. Die Tatsache, dass ein grosser Teil der im AKW erzeugten Wärme verloren geht, bleibt ungeachtet des Reaktorkonzepts bestehen.

→ Fakt Nr. 2: Gewinnung und Aufbereitung von Uran belasten, unabhängig vom Bautyp des AKW, in dem es später eingesetzt wird, die Umwelt.

Ein AKW braucht als «Brennstoff» schwere Atomkerne, die gespalten werden können. In den meisten Fällen ist dies Uran-235. Dieses Uran muss bergmännisch abgebaut und in eine chemisch und physikalisch brauchbare Form gebracht werden. Entlang der Brennstoffkette fallen Umweltbelastungen an.

→ **Fakt Nr. 3: Viele Bauteile von AKW werden durch Neutronen bestrahlt, was mit der Zeit zur Materialversprödung führt und ein Sicherheitsproblem darstellt.**

Ein AKW nutzt die Wärme, die bei der Spaltung von Atomkernen freigesetzt wird. Bei jeder Spaltung werden 2 bis 3 *Neutronen* frei, von denen genau *ein* Neutron wieder einen Kern spalten muss. Die übrigen müssen (z.B. durch einen Absorber) aus dem Verkehr gezogen werden. Das nennt man kontrollierte *Kettenreaktion*.

Die Wahrscheinlichkeit, einen Kern zu spalten, hängt von der Geschwindigkeit des Neutrons ab. Ist es zu schnell, verlässt es den Bereich von zu spaltenden Kernen, ohne dass eine Spaltung stattfindet. Darum sorgt ein *Moderator*, also eine Substanz, die das Neutron durch Stösse abbremst, für die passende Geschwindigkeit. Man sieht sofort, dass wir es mit sehr vielen, tendenziell zu schnellen Neutronen zu tun haben. Dieser Neutronenfluss lässt alle Materialien, durch die er tritt, insbesondere auch die Bauteile des Reaktorkerns und des Reaktordruckgefässes, rasch altern.

Die spaltbaren Atomkerne machen nur einen geringen Teil des Inventars im Reaktorkern aus. Dort gibt es viele nicht spaltbare Kerne, die sich durch Neutroneneinfang verändern können, aber auch Kernbruchstücke von gespaltenen Kernen. Beide, die veränderten Kerne und die Bruchstücke, sind mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht stabil, sondern zerfallsfähig bzw. radioaktiv. Deren Zerfall führt zu Strahlung.

→ **Fakt Nr. 4: Unabhängig vom Bautyp des AKW besteht das nicht vollends gelöste Problem der Langzeitlagerung der gefährlichen Abfälle.**

Sind Brennstäbe sogenannten «abgebrannt», so geben sie noch extrem lange Wärme und Strahlung ab. Abgebrannte Brennstäbe enthalten den mit Abstand grössten Teil der Radioaktivität aller radioaktiven Abfälle. Bisher hat sich kein Konzept durchgesetzt, das eine Alternative zur geologischen Tiefenlagerung für hochradioaktive Abfälle bieten könnte. Ein geologisches Tiefenlager muss die in abgebrannten Brennstäben enthaltenen Stoffe für bis zu eine Million Jahre von der Biosphäre fernhalten. Hochradioaktive Abfälle gelten als gefährlichste Abfälle der Welt. Unabhängig vom konkreten Bautyp des AKW ist mit dieser Technologie das Thema der Langzeitlagerung über unvorstellbare Zeiträume hinweg untrennbar verbunden.

Welche Nachteile haben die Standard-Leichtwasser-Reaktoren, sodass der Ruf nach neuen AKW laut wird?

Aktuell sind die allermeisten weltweit in Betrieb stehenden AKW vom Typ Leichtwasser-Reaktor. Dabei versteht man unter Leichtwasser das gewöhnliche H₂O, im Gegensatz zum Schweren Wasser D₂O (heavy water), wo statt einem Wasserstoffatom H (1 Proton, 1 Elektron) ein Deuteriumatom D (1 Proton, 1 Elektron, 1 Neutron) ins Molekül eingebaut ist. Sie haben den konstruktiven Vorteil, dass das leichte Wasser zugleich die

Funktion des Moderators (Abbremsung schneller Neutronen) und des Kühlmittels (Transport der Wärme im Primärkreislauf zum Wärmetauscher, wo sie an den Sekundärkreislauf abgegeben wird) übernimmt.

→ Fakt 1: Leichtwasserreaktoren sind wegen der Anreicherungstechnik untrennbar mit Atomwaffen verknüpft.

Dieser Vorteil wird teuer bezahlt: Die Uranoxid-Tabletten in den Brennstäben im LWR enthalten zwar zum grössten Teil nicht spaltbares Uran-238 und nur 3 bis 4% spaltbares Uran-235. Dieser Anteil ist dennoch deutlich höher als im natürlichen Uran, wo er nur 0,7 % beträgt. Das bedeutet, dass das Uran-235 angereichert werden muss. Diese sehr aufwändige und energieintensive Technologie ist grundsätzlich auch dazu geeignet, den Anreicherungsgrad noch höher zu treiben; bei 80 bis 90% ist das Uran waffenfähig, also zum Bau von Bomben geeignet.

Darum wurde neben dem LWR von Anfang an auch der Schwerwasserreaktor (HWR) entwickelt, der mit Natururan betrieben werden kann, wo also keine Anreicherung nötig ist. Er galt als Reaktor «des armen Mannes» und wurde in Länder wie Indien oder Pakistan exportiert.

Länder, die LWR betreiben, sind wegen der Anreicherungstechnik oft auch Länder mit nuklearer Bewaffnung (USA, Russland, China, usw.). Falls ein Land nicht über Möglichkeiten zur Anreicherung verfügt, muss es fertig angereicherte Brennstäbe beziehen und wird dadurch von Lieferanten abhängig.

→ Fakt 2: Die Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennstäbe aus LWR ist ein heikler Prozess, der sehr störungsanfällig und umweltbelastend ist.

Schnell war klar, dass es (zumindest theoretisch) logisch wäre, abgebrannte Brennstäbe zu rezyklieren, denn nur ein relativ geringer Anteil von deren Inhalt ist wirklich «verbraucht». Diese sogenannte Wiederaufarbeitung erwies sich aber als heikel. Einerseits erhöht die Wiederaufbereitung die Proliferationsgefahr, andererseits führten Ableitungen radioaktiver Stoffe aus Wiederaufbereitungsanlagen zu massiven Umweltschäden. Letztlich bleibt ein grosser Teil der radioaktiven Stoffe auch nach der Wiederaufbereitung in den abgebrannten Brennelementen. Diese müssen trotzdem für hunderttausende Jahre gelagert werden. Mehrere Länder, die Wiederaufbereitungsanlagen betrieben haben, haben diese mittlerweile wieder geschlossen (z.B. Belgien oder Deutschland).

→ Fakt 3: Ist schon die Anreicherung eine problematische Technik, da sie für Atomwaffen verwendet werden kann, dann ist es die Brütertechnologie erst recht, denn der Brutreaktor erzeugt mehr spaltbares Material, als er selbst verbraucht.

Da der LWR das Uran-235 spaltet und damit verbraucht, suchte man aus Sorge vor Mangel an spaltbarem Material schon früh nach Techniken, um nicht spaltbare Kerne in spaltbare zu verwandeln: Das macht der Schnelle Brutreaktor (FBR = fast breeding reactor), der aus nicht spaltbarem Uran-238 das spaltbare Plutonium-239 erzeugt. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für die Erzeugung von hochangereichertem, spaltbarem Material für militärische Zwecke gegeben. Zudem arbeitet der «schnelle» Brutreaktor mit

«schnellen» Neutronen, was höhere Temperaturen, höheren Druck und heiklere Kühlmittel (z.B. flüssiges Natrium) bedingt.

Welche Vor- und Nachteile haben neue Reaktorkonzepte?

Wir betrachten hier sechs Reaktorkonzepte etwas genauer. Zwei weitere werden andernorts diskutiert: Im letzten Abschnitt geht es um Reaktoren, die angeblich mit Abfall klarkommen. In einem separaten Beitrag gehe ich auf kleine modulare Reaktoren (SMR = small modular reactors) ein.

4.1 Natriumgekühlte Schnelle Reaktoren (Sodium-cooled Fast Reactors, SFR)

Konzepte für natriumgekühlte Schnelle Reaktoren (SFR) werden seit Beginn der Nutzung der Kernenergie, also seit etwa 1950, diskutiert. Ziel ist die Erzeugung von Plutonium aus dem eingesetzten Uranbrennstoff.

Vorteile:

- bessere Ausbeute der Uranressourcen durch Erzeugung von Plutonium
- Potential zur Transmutation («Unschädlichmachung») radioaktiver Abfälle. (Dieser Einsatzzweck erfordert allerdings erhebliche Modifikationen der Wiederaufbereitungsverfahren, der Brennstofffertigung und des Reaktorkerns, da ein Transmutationsreaktor Plutonium und weitere Kerne verbrennen statt erbrüten soll.)
- gute Wärmeleitungseigenschaften von Natrium
- Drucklosigkeit des primären Kühlkreislaufs

Nachteile:

- chemische Reaktivität von Natrium (Natrium reagiert spontan u.a. mit Luftsauerstoff und Wasser.)
- höhere Anforderungen an die Reaktivitätskontrolle

4.2 Bleiegekühlte Schnelle Reaktoren (Lead-cooled Fast Reactors, LFR)

Ebenso wie beim SFR ist für den LFR ein Betrieb mit einem geschlossenen Brennstoffkreislauf vorgesehen.

Vorteile:

- Plutonium und Mischoxid können genutzt werden, sodass weniger Natururan verbraucht wird
- das Kühlmittel ist (im Gegensatz zu Natrium) chemisch nicht reaktiv
- Es wird bei niedrigerem Druck gearbeitet, was tendenziell sicherer ist.
- Transmutation ist möglich
- Es wird wegen der Betriebstemperatur von 400 bis 620°C die Nutzung von Prozesswärme und ein Standort in der Nähe von Siedlungen in Betracht gezogen.

Nachteile:

- sehr hohe Dichte des Kühlmittels

- es liegt praktisch keine Betriebserfahrung vor. Bisher gibt es nur (kleine) bleigekühlte Schiffsreaktoren sowjetischer Bauweise.

4.3 Gasgekühlte Schnelle Reaktoren (Gas-cooled Fast Reactors, GFR)

Die gasgekühlten Schnellen Reaktoren (GFR) unterscheiden sich von SFR und LFR durch die anderen Eigenschaften des Kühlmittels, wobei heute vor allem das Edelgas Helium als Kühlmittel diskutiert wird.

Vorteile:

- die hohe Betriebstemperatur von 800 bis 850°C lässt einen besseren Wirkungsgrad erwarten.
- Bei diesen Temperaturen kann Brennstoff erbrütet werden.

Nachteile:

- Die hohen Betriebstemperaturen haben erhöhte Anforderungen im Bereich der Materialien zur Folge.

4.4 Salzschnmelzereaktoren (Molten Salt Reactors, MSR)

Die ursprüngliche Idee eines Salzschnmelzereaktors besteht darin, spaltbare und zum Brüten geeignete Stoffe in flüssigem Fluorid- oder Chloridsalz aufzulösen, so dass die Spaltung und das Brüten von neuem Spaltmaterial im geschmolzenen Salz erfolgt.

Vorteile:

- Da der Brennstoff in flüssiger Form vorliegt, ist er flexibler handhabbar. Insbesondere muss der Reaktor zur Be- und Entladung nicht abgeschaltet werden.
- Dadurch fallen lange Stillstandszeiten weg.

Nachteile:

- Fluorid- und Chloridsalze sind chemisch sehr reaktiv. Das führt im Prinzip zu Korrosionsproblemen.

4.5 Mit superkritischem Wasser gekühlte Reaktoren (Supercritical Water-cooled Reactors, SCWR)

Hier muss ein Begriff geklärt werden: Superkritisches Wasser ist Wasser in einem fluiden Zustand über seiner «kritischen Temperatur» und seinem «kritischen Druck». Um in den überkritischen Zustand (wo nicht mehr unterschieden werden kann, ob das Wasser flüssig oder gasförmig ist) zu gelangen, muss das Wasser mindestens eine Temperatur von 374,12 °C und einen Druck von mindestens 22,1 MPa (221 bar) haben. Die Grundidee eines mit superkritischem Wasser gekühlten Reaktors (SCWR) ist es, eine gegenüber heutigen Leicht- und Schwerwasserreaktoren höhere Dampftemperatur (bei gleichzeitig höherem Dampfdruck) des Frischdampfs zu erreichen und dadurch den Wirkungsgrad des Reaktorsystems zu erhöhen.

Die Idee geht zurück auf Verbesserungen bei modernen Kohlekraftwerken, bei denen in den letzten Jahrzehnten die Dampftemperatur in den Bereich von superkritischem Wasser angehoben wurde, so dass sie mittlerweile einen Wirkungsgrad im Bereich von bis zu 45% aufweisen. Dazu wird das Wasser in Kohlekraftwerken zunächst erhitzt und

das im kritischen Zustand befindliche Wasser danach in Überhitzern weiter auf Temperaturen bis ca. 600°C aufgeheizt. Möglich wurde dies vor allem durch verbesserte Materialien.

Demgegenüber liegt der Wirkungsgrad der heutigen Leicht- und Schwerwasserreaktoren weiterhin im Bereich von ca. 35%, da hier Druck und Temperatur des Frischdampfs im Bereich von 7 MPa und 290°C liegen.

Vorteil:

- höherer Wirkungsgrad von 45% statt bloss 35%

Nachteil:

- höherer Druck und höhere Temperatur beanspruchen alle Materialien stärker

4.6 Hochtemperaturreaktoren (Very High Temperature Reactor, VHTR)

Die Grundidee des Hochtemperaturreaktors (VHTR) ist, als Folge der hohen Temperaturen (angestrebt werden 950 bis 1000°C) entsprechend bessere Wirkungsgrade zur Stromproduktion zu erzielen und/oder Prozesswärme zu nutzen. Um den hohen Temperaturen Stand zu halten, wird Graphit sowohl als Strukturmaterial als auch zum Einschluss des Brennstoffs in Kugeln oder Stäben verwendet.

Vorteile:

- höherer Abbrand, das heisst bessere Ausbeute des Brennstoffs
- angebliche Sicherheitsvorteile im Vergleich mit dem LWR
- Das chemisch inerte Kühlmittel Helium hat zweifellos Vorteile im Vergleich mit dem Kühlmittel flüssiges Natrium, das sehr reaktionsfreudig ist.

Nachteile:

- Besondere Herausforderungen für das Material wegen der extrem hohen Temperatur und Helium (kleines Molekül) als Kühlmittel.
- Erhöhte Störungsanfälligkeit wegen Gaskühlung
- Entsorgungskosten besonders hoch wegen dem radioaktiven Graphit

Fakt ist: Der Entwicklungsstand aller sechs Reaktorkonzepte ist sehr weit von einer Nutzung im Bereich von Leistungsreaktoren entfernt! Die Konzepte konkurrieren sich teilweise, benötigen Forschungs- und Entwicklungsaufwand, usw. Bildlich gesprochen: Wenn die LWR die Spatzen in der Hand sind, dann handelt es sich hier um die Tauben auf einem sehr weit entfernten Dach.

Gibt es Reaktoren, die mit «Abfall»,¹ also alten Brennstäben von LWR, betrieben werden können?

Die Grundidee beschleunigergetriebener, unterkritischer Reaktoren ist es, einen Schnellen Reaktor mit unterkritischem Reaktorkern zu betreiben. Da ein solcher Reaktor von selbst keine zeitlich konstante Neutronenpopulation aufrechterhalten kann, ist er auf eine „externe“ Neutronenquelle angewiesen. Der Reaktorteil des Systems ist unterkritisch und produziert keine Energie, wenn die externe Neutronenquelle abgeschaltet ist. Diese Anordnung wird auch als Accelerator-Driven System (ADS) bezeichnet.

In der Debatte um die Atomenergie wird zuweilen suggeriert, dass neue Reaktoren mit dem Abfall unserer heutigen AKW betrieben werden könnten.

Dieses Konzept basiert auf der Idee, Neutronen im Inneren des Reaktors freizusetzen, indem mit einem Teilchenbeschleuniger Protonen auf ein Stück Schwermetall geschossen werden. Ein Teilchenbeschleuniger kann nur elektrisch geladene Teilchen beschleunigen; er beschleunigt also Protonen.

Allerdings ist die Vorstellung, dass ein solcher Reaktor einfach mit abgebrannten Brennelementen aus herkömmlichen AKW betrieben werden könnte, falsch. Das Konzept gilt als besonders geeignet für die Transmutation – also die Umwandlung von langlebigen in weniger langlebige Abfallprodukte. Dafür müsste aber eine komplett neue Brennstoff- und Entsorgungskette aufgebaut werden.

Vorteile:

- Kettenreaktion endet sofort, wenn der Beschleuniger abgeschaltet wird
- Gilt als besonders geeignet für die Transmutation
- Abfall ist kurzlebiger als bei herkömmlichen Reaktoren

Nachteile:

- sehr aufwändig / teuer wegen des Beschleunigers, der extrem viel Energie benötigt
- Kommt wegen der Nachzerfallswärme trotz unterkritischem Reaktorkern nicht ohne Notkühlsysteme aus
- Sehr weit von Marktfähigkeit entfernt. Existiert bisher nur in Form von Forschungsprojekten; eine erste Demonstrationsanlage soll frühestens in den 2030er Jahren in Betrieb gehen

Fakt ist: Dieser Reaktortyp ist noch weit davon entfernt, das Problem der Endlagerung des radioaktiven Abfalls zu lösen. (Immerhin ist er ein Grund, warum Abfall unbedingt *rückholbar gelagert* werden sollte.) Die Aussage, der Reaktor könne «mit der Energie des Abfalls betrieben werden»,² ist schlicht falsch, da der Brennstoff nicht einfach aus alten Brennelementen zusammengebastelt werden kann, sondern eine komplexe Angelegenheit ohne Aussicht auf wirtschaftlichen Erfolg darstellen würde.

¹ <https://cordis.europa.eu/article/id/90546-radioactive-waste-fuels-nextgeneration-reactors/de>

² <https://www.tagesschau.de/wissen/forschung/belgien-forschungsreaktor-myrrrha-101.html>