# Wie funktionieren Reaktoren mit Salzschmelzen?

geschrieben von Admin | 6. Juli 2022

**Von Klaus-Dieter Humpich**

Wenn man Salze hoch genug erhitzt, schmelzen sie und werden dünnfüssig wie Wasser. Es besteht also die Möglichkeit auf dieser Basis Reaktoren mit flüssigem Brennstoff zu bauen. Die Handhabung und Messtechnik für Salzschmelzen wurde erst Anfang des 20. Jahrhunderts für die Aluminiumindustrie entwickelt. Bis heute handelt es sich um ein recht exotisches Teilgebiet der Technik. Bereits 1944 schlug L.W. Nordheim einen Brutzyklus zur Nutzung von Thorium ($Th^{232}$ –> $U^{233}$) als Brennstoff vor. Bereits 1949 schlug A.M. Weinberg einen Reaktor mit Uran und Thorium haltigen Salzen des Fluor als Betriebsmittel für Flugzeuge vor. Bis heute, ist der Name Weinberg mit einer kontroversen Philosophie über Kernreaktoren verbunden. In den USA gipfelte diese Entwicklung im MSRE (Molten Salt Reactor Experiment), der von 1965 bis 1969 in Betrieb war. Es ist also beileibe keine neue Erfindung, sondern eher die Wiederaufnahme einer alten Entwicklungsschiene, deren Vor- und Nachteile im weiteren etwas beleuchtet werden sollen.

## Die Neutronenfrage

Die Wahrscheinlichkeit für eine Kernspaltung hängt maßgeblich von der Geschwindigkeit der Neutronen im Reaktor ab: Je langsamer sie sind, um so größer ist bei Uran und Plutonium die Wahrscheinlichkeit einer Kernspaltung (Spaltungsquerschnitt in barn). Aber Vorsicht, dies gilt nur für die ungeraden Isotope ($U^{233}$, $U^{235}$, $Pu^{239}$ etc.). Will man auch die geraden Isotope spalten ($U^{238}$ etc.) geht das nur mit schnellen Neutronen. Man kann sogar mit Natururan (0,7% $U^{235}$) kommerzielle Reaktoren bauen (Deuterium oder Graphit als Moderator), aber schon bei Leichtwasser (Druckwasser- oder Siedewasserreaktor) muß man das Uran aufwendig anreichern (ca. 3–5% $U^{235}$). Will man auch das $U^{238}$ spalten, muß man zwingend schnelle Neutronen verwenden und braucht eine sehr viel höhere Anreicherung bzw. entsprechend viel Plutonium.

Warum diese Vorüberlegungen? Neutronen werden durch Zusammenstöße mit den Materialien des Reaktors zwangsweise abgebremst. Man ist also nicht mehr frei bei der Auswahl der Salze. Wählt man „leichte“ Salze aus Lithium und Beryllium ist die Abbremsung bereits so stark, daß man nicht mehr von schnellen Neutronen sprechen kann. Man baut automatisch einen Reaktor mit thermischem Neutronenspektrum. „Thermisch“ ist eine Geschwindigkeitsangabe über die Temperatur im Reaktor, da man wegen der Brownschen Molekularbewegung diese Geschwindigkeit nicht unterschreiten kann. Will man ein härteres (schnellere Neutronen) Spektrum, muß man

zwingend auf „schwere“ Salze aus z. B. Chlor übergehen.

## Die Salze

Standard ist immer noch das Molten Salt Reactor Experiment (MSRE). Der MSRE wurde 1960 geplant, wurde 1965 zum ersten Mal kritisch und lief bis 1969 mit verschiedenen Brennstoffen. Er hatte ein thermisches Neutronenspektrum und eine Leistung von 7,34 MW. Das Salz bestand aus 65% $Li^7$ F, 29,1% $BeF_2$, 5% $ZrF_4$ und 0,9% $UF_4$ (alles in Molenprozent). Man kann hier schon einige grundlegende Überlegungen ableiten:

- Um ein thermisches Spektrum zu erhalten muß das Salz überwiegend aus „leichten“ Kernen gebildet werden ($Li^7$, $F^{19}$, $Be^9$, $Zr^{90}$). Trotzdem war auch hier noch ein zusätzlicher Moderator aus Graphit erforderlich. Die Salze dürfen auch nicht parasitär gegenüber den Neutronen sein (zu große Einfangquerschnitte). Dies gilt besonders, wenn man aus dem Thorium Uran erbrüten will.
- Es handelt sich um eine Mischung aus Fluorsalzen. Fluor ist bei Raumtemperatur gasförmig. Es gehört zu den stärksten Oxidationsmitteln und reagiert mit fast allen Elementen sehr heftig. Dies ist wichtig, da ja bei jeder Kernreaktion auch die chemische Verbindung zerbricht und nahezu das gesamte Periodensystem neu entsteht. Die radioaktiven Spaltprodukte sollen auch im Salz gebunden (Sicherheit bei Störfällen) werden.
- Der Anteil an spaltbaren Atomen ist mit unter einem Prozent recht klein. Das Salz ist quasi nur mit Brennstoff – und später den Spaltprodukten – „verunreinigt“. Das ist wichtig, da die Salzmischung mit allen möglichen Bauteilen des Reaktor in Kontakt kommt und zu Korrosion führt – bis heute ein Problem dieses Reaktortyps.

Man hat den MSRE mit $U^{235}$ (Anreicherung 32%), $U^{233}$(≈91,5%) und $Pu^{239}$ $F_3$ erfolgreich betrieben. Das letzte Salz führt unmittelbar zum „Waste Burner“, in dem man Reaktorplutonium und Minore Aktinoide aus Leichtwasserreaktoren verwendet.

In der Natur kommen die beiden stabilen Isotope $Li^6$ (7,6 %) und $Li^7$ (92,4 %) vor. Für einen MSR ist nur $Li^7$ erwünscht, da aus $Li^6$ durch Neutroneneinfang (großer Querschnitt) radioaktives Tritium entsteht. Generell gilt, daß die Salze sehr rein sein müssen, was sie teuer macht.

Will man ein schnelles Neutronenspektrum, darf das Salz nur wenig leichte Kerne enthalten. Chlorsalze sind die Favoriten. Sie sind insbesondere für Uran-Plutonium-Kreisläufe das Salz der Wahl. Sie stehen damit in unmittelbarer Konkurrenz zu „schnellen Brütern“ mit Natrium oder Blei als Kühlmittel. Natürliches Chlor besteht zu 75,76% aus $Cl^{35}$ und 24,24% $Cl^{37}$. $Cl^{35}$ und $Cl^{36}$ haben sehr viel größere Einfangquerschnitte als $Cl^{37}$. Es empfiehlt sich daher, möglichst reine Chlorsalze aus nur dem Isotop $Cl^{37}$ zu verwenden. Diese sind aber sehr

teuer.

## Die Entfernung der Spaltprodukte

Durch Kernspaltung und Neutroneneinfang bildet sich mehr oder weniger das gesamte Periodensystem. Man kann lediglich Wahrscheinlichkeiten für die Zusammensetzung angeben:

- Die Spaltprodukte sind radioaktiv. Damit ergibt sich der simple aber durchschlagende Zusammenhang: Je mehr davon in einem Reaktor vorhanden sind, desto größer ist die (potentielle) Freisetzung bei einem Störfall.
- Die Art und Anzahl der Spaltprodukte bestimmt die Nachzerfallswärme nach Abschaltung des Reaktors und damit die erforderliche Notkühlung.
- Die Spaltprodukte gehen neue chemische Verbindungen ein. Dies macht den Korrosionsschutz so komplex. Die neu gebildeten Verbindungen haben aber auch andere physikalische Eigenschaften (Schmelztemperatur, Dampfdruck etc.). Dadurch kann es auch bei Zwangsumlauf zu Ablagerungen und Ausgasung kommen.
- Durch z. B. Gasblasen ändert sich der neutronenphysikalische Zustand im Reaktor. Deshalb sieht man mindestens eine kontinuierliche Gasabscheidung vor. Was alles gasförmig ist, hängt stark von der Betriebstemperatur ab. Beileibe treibt man durch das sog. Strippen mit Edelgas nicht nur die gewünschten, sondern auch andere Verbindungen aus, die sich dann in kalten Bereichen niederschlagen. So hat man z. B. beim Abbruch amerikanischer Salzbadreaktoren unerwartete Konzentrationen von Uranfluoriden in Abgasfiltern gefunden.
- Reaktoren werden über die verzögerten Neutronen geregelt. Das sind Neuronen, die erst beim Zerfall gewisser radioaktiver Elemente frei werden. Dies macht zumindest die Berechnung kompliziert, da sich nicht nur ein zeitliches, sondern auch ein örtliches Problem ergibt. Anders als bei Reaktoren mit Brennelementen, bewegen sich die Kerne mit der Strömung des Salzes weiter. Sie werden unter Umständen an Stellen frei, wo man sie nicht braucht oder gar nicht haben will.

## Verringerung des Inventars zur Sicherheit

Salzbadreaktoren sind nahezu drucklos. Dies ist gegenüber Leichtwasserreaktoren ein Vorteil. Platzt z.B. eine Rohrleitung, führt das nur zu einem Auslaufen und nicht zu einer „Explosion“. Hochdruckdampf hat enorme zerstörerische Kräfte. Es wird auch immer damit argumentiert, daß der geringe Druck zu dünnen Wänden und damit einer billigeren Konstruktion führt. Dies gilt es gegen die aggressive Chemie des heißen Salzes abzuwägen. Es wird wohl kaum gelingen, jemals 60+ Jahre Betrieb – wie bei modernen Leichtwasserreaktoren – zu erreichen.

Das Risiko eines Unfalls hängt immer von der Wahrscheinlichkeit (überwiegend eine Folge von Konstruktion und Betriebsumständen) und dem Schaden (überwiegend das Inventar an radioaktiven Stoffen zum Zeitpunkt des Unfalls) ab. Bei allen Reaktoren ergibt sich maßgeblich das radioaktive Inventar aus der (bis zum Unfall) produzierten Energie. Pauschale Urteile sind sinnlos. Werden unterschiedliche Reaktoren diesbezüglich verglichen, sind z.B. sehr genau die Wechselintervalle des Brennstoffs zu berücksichtigen. Bei heutigen Leichtwasserreaktoren wird jeweils ein Drittel des Brennstoffs jährlich entnommen. Demgegenüber gibt es bei Salzbadreaktoren Konzepte, bei denen diese zig Jahre laufen sollen und dann am Stück ausgetauscht werden.

Bei Salzbadreaktoren ist zumindest theoretisch eine kontinuierliche Wiederaufbereitung während des laufenden Betriebs möglich. Dies kann durch Abzweigen eines kleinen Teilstroms und Wiederaufbereitung in einem angeschlossenen chemischen Prozess geschehen. Andere Konzepte sehen ein Abscheiden durch Verdampfung im Vakuum vor. Man geht dabei von der Annahme aus, daß die Gase nur Spaltprodukte und keinen Brennstoff enthalten. Verbindliche Aussagen wird man erst nach vielen Betriebsjahren in vielen Reaktoren machen können. Leichtwasserreaktoren haben bezüglich der Genehmigung in diesem Sinne einen unschlagbaren Vorteil. Entscheidend ist nicht zuletzt die Frage ob der Kunde (meist gestandene Kraftwerker) sich mit soviel Chemie anfreunden kann.

## Sicherheit

Reaktoren mit Salzschmelze sind inhärent sicher: Meint, sie brauchen kein System zur Schnellabschaltung. Sie gehen von selbst aus, wenn die Temperatur ansteigt, weil dadurch die Kettenreaktion in sich zusammenbricht. Sie können darüberhinaus auch noch „walk away“ sicher gebaut werden. Durch die große Wärmespeicherkapazität und dem großen Abstand zum Siedepunkt (Druckanstieg) ist eine dauerhafte Kühlung für die Nachzerfallswärme ohne ein (aktives) Notkühlsystem möglich. Unfälle, wie z. B. in Fukushima, scheinen damit physikalisch ausgeschlossen.

Ob allerdings MSR vollkommen ohne Regelstäbe etc. auskommen können, wird der Genehmigungsprozess zeigen. In der Öffentlichkeit geistert immer ein Pfropfen umher, der eine Rohrleitung verschließt und bei zu hoher Temperatur aufschmilzt und den Weg in einen Sicherheitstank frei gibt. Diese Vorstellung ist sehr laienhaft. Um einen solchen gefrorenen Pfropfen zu erzeugen, muß dieser im Betrieb dauerhaft aktiv gekühlt werden. Das ist gar nicht so einfach und es ergibt sich ein recht komplexes Bauteil. Trotzdem sind bei den Versuchsständen immer Undichtigkeiten aufgetreten. Im Ernstfall muß diese Verstopfung – auch nach jahrelangem Betrieb – sicher und schnell aufschmelzen. Auch das keine einfache Aufgabe. Es handelt sich nach längerer Zeit nicht mehr um das ursprünglich eingefrorene Salz. Es ergeben sich Schichtungen, Kristallisation usw. Jedenfalls hat die Praxis gezeigt, daß solche Pfropfen 10 bis 15 Minuten brauchen, bis sie den Weg in den Tank freigeben. Etliche Entwürfe sehen deshalb zusätzlich aktive Ventile vor.

## Wertung

Es gibt nicht den einzig selig machenden Reaktortyp. Jedes Prinzip hat ganz spezifische Vor- und Nachteile. Es hängt alles vom Anwendungsfall ab:

- Will man nur elektrische Energie erzeugen, wird der MSR genauso wenig die Leichtwasserreaktoren verdrängen, wie die Wärmepumpe den Heizkessel.
- Braucht man sehr hohe Temperaturen, sind die gasgekühlten Hochtemperaturreaktoren die Wahl.
- Will man auch das $U^{238}$ nutzen, sind mit Natrium oder Blei gekühlte schnelle Reaktoren zumindest bisher unübertroffen. Sie sind auch hervorragend geeignet um die Minoren Aktinoide zu beseitigen und die Entsorgungsfrage ganz neu zu stellen.
- Will man auch Thorium als zusätzliche Energiequelle nutzen, sind die Schwerwasserreaktoren eine echte Alternative.
- Braucht man einen nuklearen Schiffsantrieb, bleiben (wahrscheinlich) nur Druckwasserreaktoren und MSR. Sie sind die einzig kompakten Reaktoren ohne freie Oberflächen.
- MSR sind von Natur aus für „nicht ganz so hohe Temperaturen“ (<600°C) hervorragend geeignet. Spätestens nach dem Krieg gegen die Ukraine ist klar geworden, wie wichtig Wärme für die Industrie ist.

Gleichwohl ist es dringend nötig, endlich mal einen SMR zu bauen. Es macht einfach keinen Sinn, ewig nur über Vor- und Nachteile zu philosophieren. Man muß in der Technik praktische Erfahrungen sammeln. Schließlich sehen die heutigen Leichtwasserreaktoren der Generation III+ auch anders aus, als deren erste Generation. Am Ende entscheidet immer der Markt. Wir haben doch bei unseren Autos auch eine ganze Palette unterschiedlicher Antriebssysteme zur Auswahl.

Der Beitrag erschien zuerst auf dem Blog des Autors hier

---

# In eigner Sache – zur Erhöhung der Sicherheit neues Captcha eingebaut

geschrieben von Admin | 6. Juli 2022

von Michael Limburg
Gestern wurde unsere Website wegen Überlastung vorübergehend gesperrt.

Eine drastische Zunahme von identifizierbaren Seitenaufrufen konnten wir nicht feststellen, trotzdem gab es ein Überlastung.