

News | 27.12.2017

## VON WEGEN ATOMAUSSTIEG

# Kernkraftwerke der Zukunft

Deutschlands nichtnuklearen Sonderweg gehen wohl nur die wenigsten Länder mit. Im Gegenteil, anderswo entwickelt man mit Hochdruck die Atomkraft der nächsten Generation.

<http://www.spektrum.de/news/kernkraftwerke-der-zukunft/1527265>

von [Philipp Hummel](#)



© pwmotion / stock.adobe.com  
(Ausschnitt)

An einem idyllischen Fleckchen Erde, zwischen Seen, Flüssen und Wäldern, soll das erste Kernkraftwerk eines neuen Typs entstehen. Je 400 Kilometer von Toronto und Montreal entfernt, nahe den Canadian Nuclear Laboratories, [will die Firma Terrestrial Energy einen Prototyp ihres "Integral Molten Salt Reactor", kurz IMSR, errichten](#). Der Reaktor, der flüssiges Salz als Kühlmittel verwendet, soll wirtschaftlicher und sicherer arbeiten als heutige Anlagen, verspricht das Start-up. [Im November 2017 hat es die erste Hürde im Prüfprozess der kanadischen Behörden genommen](#).

[Weltweit befinden sich derzeit 448 Kernreaktoren in Betrieb](#). In Deutschland laufen noch acht davon, sie sollen spätestens 2022 abgeschaltet werden. Mit dem Atomausstieg hat die Bundesrepublik allerdings einen Sonderweg in der Energiepolitik eingeschlagen. Denn nicht nur in Kanada sieht es nach einer strahlenden Zukunft für neue Kernkraftwerke aus. Weltweit werden gerade 58 Reaktoren errichtet. 39 davon entstehen in Asien. [Luftverschmutzung und Smog in Indien und China](#) gehören zu den Gründen dafür. 70 Prozent des chinesischen Stroms werden aus Kohle erzeugt. Das erste Kernkraftwerk dort wurde erst 1991 in Betrieb genommen. Um das starke Wirtschaftswachstum aufrechtzuerhalten, braucht es neue Stromquellen, die die Luft weniger verschmutzen. [Organisationen wie der Weltklimarat IPCC](#) oder die Internationale Energieagentur IEA sehen Kernenergie sogar als möglichen Bestandteil einer globalen Strategie, um die Klimaerwärmung unter das Zwei-Grad-Ziel zu drücken. Denn nachdem sie einmal ans Netz gegangen sind, erzeugen Kernkraftwerke relativ

wenig Kohlendioxid, das zum menschengemachten Klimawandel beiträgt.

In Kernreaktoren wird durch die kontrollierte Spaltung schwerer instabiler Atomkerne in einer Kettenreaktion Energie freigesetzt. Die erste kontrollierte Kettenreaktion [fand vor 75 Jahren in Chicago in einem Forschungsreaktor statt](#), den der Physik-Nobelpreisträger Enrico Fermi entwickelt hatte. In den heute am weitesten verbreiteten Leichtwasserreaktoren werden die schnellen Neutronen, die beim radioaktiven Zerfall des Kernbrennstoffs – meist angereichertes Uran – entstehen, zunächst abgebremst. Das erledigt ein Moderator, beispielsweise Wasser oder Graphit. Die abgebremsten Neutronen haben eine höhere Wahrscheinlichkeit, von einem der schweren Atomkerne eingefangen zu werden und ihn zu spalten. Die dabei entstehenden leichteren Atomkerne tragen die frei werdende Bindungsenergie in Form von Bewegungsenergie davon. Zudem entstehen freie Neutronen, die ihrerseits wieder Kerne spalten, so dass eine Kettenreaktion abläuft, die sich selbst aufrechterhält. Durch die Bewegungsenergie der Spaltprodukte erhitzt sich das Material im Reaktor. Die entstehende Wärme wird durch ein Kühlmittel – häufig Wasser – abgeführt und treibt Turbinen an.



Das könnte Sie auch interessieren:  
[Spektrum der Wissenschaft Digitalpaket: Spektrum der Wissenschaft Jahrgang 2017](#)

## Zukunftskraftwerke auf dem Reißbrett

Man ordnet die Kernreaktionen verschiedenen Generationen zu, an denen man nachvollziehen kann, wie sich die Technik weiterentwickelt hat. Zur Generation I gehören die ersten experimentellen Reaktoren der 1950er und 1960er Jahre. Ab Generation II gelang es ab etwa Mitte der 1960er Jahre, die Anlagen wirtschaftlich als Kraftwerke zu betreiben. Viele der heute in Betrieb befindlichen Anlagen gehören zu dieser zweiten Generation von Kernreaktoren; auch die havarierten Kraftwerke in Tschernobyl und Fukushima entstammten ihr. Die meisten der heute in Bau befindlichen Kernreaktoren werden als Anlagen der Generation III oder III+ bezeichnet. Generation III beschreibt verbesserte fortschrittliche Leichtwasserreaktoren; Generation III+ basiert auf einem "evolutionären" Sicherheitskonzept, das die Erkenntnisse aus den Stör- und Unfällen der letzten Jahrzehnte in die Nachrüstung bestehender Anlagen und den Bau neuer Reaktoren einfließen lässt.

Um die vierte Generation der Kernreaktoren zu entwickeln und marktreif zu machen, schlossen sich im Jahr 2001 neun Staaten und Institutionen zum Generation IV International Forum (GIF) zusammen: Argentinien, Brasilien, das Vereinigte Königreich, Frankreich, Japan, Kanada, Südafrika, Südkorea und die USA. Mittlerweile sind auch die Schweiz, Russland, China und Australien mit an Bord. Deutschland ist indirekt als Teil der Europäischen Atomgemeinschaft vertreten, die ebenfalls Mitglied des GIF ist.



© euregiocontent / stock.adobe.com  
(Ausschnitt)

© euregiocontent /  
stock.adobe.com  
(Ausschnitt)

## Atomreaktor der Generation II

Das 1975 in Betrieb genommene belgische Atomkraftwerk Tihange gehört zur Generation II der Kernkraft. Störfälle und rissige Anlagenteile führten dazu, dass das Kraftwerk heutzutage weithin als nicht mehr sicher gilt.

Nach der Vorstellung des Forums sollen die Anlagen der Generation IV den Brennstoff effizienter nutzen, weniger Atommüll produzieren, wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein und strenge Standards bezüglich Sicherheit und Verbreitung von waffenfähigem radioaktivem Material erfüllen. Man zielt auf "inhärent sichere" Systeme, die allein durch die Naturgesetze eine Kernschmelze oder andere Störungen und Unfälle passiv vermeiden und nicht auf den aktiven Eingriff durch Mensch oder Technik angewiesen sind. Das GIF hat dafür sechs verschiedene Reaktortypen ins Spiel gebracht, darunter so genannte Brutreaktoren, die mehr Kernbrennstoff produzieren, als sie verbrauchen, und "schnelle Reaktoren", die keinen Moderator benötigen, um schnelle Neutronen für die Kettenreaktion zu verwenden.

## Vier Kandidaten für Generation IV

Vier der Konzepte haben in den letzten Jahren besonders viel Aufmerksamkeit erfahren, sagt Björn Becker, Ingenieur für Kerntechnik bei der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), die den Bund und die Länder berät:

### **SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor)**

Beim "schnellen natriumgekühlten Reaktor" [befindet sich der Reaktorkern in einem Becken aus flüssigem Natrium](#). Er arbeitet ohne Moderator. Natrium hat verglichen mit Wasser bessere thermodynamische Eigenschaften, weshalb der Reaktor bei höheren Temperaturen und damit höheren Wirkungsgraden betrieben werden kann. Zudem läuft der Reaktorkern

bei Atmosphärendruck. Das verspricht theoretisch ein geringeres Unfallrisiko als bei den unter Druck stehenden Leichtwasserreaktoren. Allerdings ist Natrium ein sehr reaktionsfreudiges Element. Die entstehende Wärme wird deshalb in einem Wärmetauscher an einen zweiten Natriumkreislauf abgegeben. So soll bei Lecks kein radioaktives Kühlmittel frei werden. In einem dritten Kreislauf wird dann Wasser verdampft, um eine Dampfturbine anzutreiben. Der SFR könnte als Brutreaktor arbeiten. Dazu könnte auch wiederaufbereiteter Brennstoff aus konventionellen Leichtwasserreaktoren verwendet werden. Der SFR würde dann wie eine Müllverbrennungsanlage funktionieren, die noch dazu neuen Brennstoff erbrütet.

### **VHTR (Very High Temperature Reactor)**

Beim "Höchsttemperaturreaktor" besteht der Kern aus Graphitkugeln, die im Inneren als Brennstoff kleine Körner aus Uran- oder Thoriumkeramik enthalten. Das Graphit wirkt als Moderator. Heliumgas führt die entstehende Wärme ab. Es erhitzt sich dabei auf mehr als 1000 Grad Celsius und treibt eine Turbine zur Stromerzeugung an. Das Konzept besitzt einen besonders hohen Wirkungsgrad. Mit zunehmender Temperatur des Reaktors sinkt die Wahrscheinlichkeit der Spaltung der Urankerne. Das führt zu einer bauartbedingten theoretischen Maximaltemperatur des Reaktors. Wenn diese unterhalb des Schmelzpunkts des Reaktormaterials liegt, kann keine Kernschmelze stattfinden. Die große Wärmemenge kann zudem als Prozesswärme verwendet werden, um Wasserstoff herzustellen oder Kohle zu veredeln.

### **LFR (Lead-Cooled Fast Reactor)**

Der "schnelle bleigekühlte Reaktor" wird auch als "nukleare Batterie" bezeichnet. Er verwendet schnelle Neutronen, eine Blei-Bismut-Legierung zur Wärmeabfuhr und kann 15 bis 20 Jahre ohne neuen Brennstoff auskommen. Gekühlt wird der LFR durch natürliche Konvektion. Weil die Brennelemente lange im Reaktor bleiben, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer Kernspaltung für jedes einzelne Atom. Als Arbeitsgas zur Stromerzeugung kommt Kohlendioxid zum Einsatz. Blei und Bismut sind sehr dicht; das höhere Gewicht erfordert stärkere Strukturen, um erdbebensicher zu sein. Die Baukosten sind daher relativ hoch. Wenn die Legierung austritt oder nicht warm genug gehalten wird, verfestigt sie sich, und der Reaktor wird unbrauchbar.

### **MSR (Molten Salt Reactor)**

Flüssigsalzreaktoren lassen sich bei hohen Temperaturen und atmosphärischem Druck betreiben. Das soll sie gegenüber konventionellen Reaktoren sowohl effizienter als auch sicherer bei der Stromerzeugung machen. Die ersten Experimente fanden bereits in den 1950er Jahren im Oak Ridge National Laboratory im US-Bundesstaat Tennessee statt. Doch bis heute ist kein Reaktor dieses Typs ans Netz gebracht worden. Ein Flüssigsalzreaktor besitzt drei Kreisläufe. Im ersten dient eine Salzschnmelze als Kühlmittel. Darin ist der Brennstoff gelöst, der ebenfalls als Salz vorliegt, beispielsweise Uranfluorid. Das flüssige Salz wird durch einen Reaktorkern aus Graphit gepumpt, das als Moderator wirkt. Es



Das könnte Sie auch interessieren:

[Spektrum Kompakt: Radioaktivität – die Schattenseiten der Strahlung](#)

kommt zu einer Kettenreaktion, und das Salz erhitzt sich auf fast 800 Grad Celsius. Anschließend fließt das Salz zum ersten Wärmetauscher, der die Wärme an einen zweiten Flüssigsalzkreislauf ohne Brennstoff abgibt. Das soll – wie beim SFR – Gefahren bei Lecks vorbeugen. Es folgt ein dritter Kreislauf, der eine Turbine antreibt. Als inhärente Sicherung befindet sich unter dem Graphitkern ein Ventil, das durchschmilzt, falls das System nicht mehr ausreichend gekühlt wird. Das Salz fließt dann in passiv gekühlte Tanks. Die Flüssigsalze sind erheblich korrosiv, so dass spezielle Metalllegierungen für den Bau der MSR verwendet werden müssen.

Bei den beiden verbleibenden der sechs Konzepte des GIF handelt es sich um den "[schnellen gasgekühlten Reaktor](#)" **GFR (Gas-Cooled Fast Reactor)**, der schnelle Neutronen und Helium als Kühlmittel verwendet und bei sehr hohen Temperaturen arbeitet, und den "[überkritischen Leichtwasserreaktor](#)" **SCWR (Super-Critical Water-Cooled Reactor)**, der als Kühlmittel und Moderator Wasser unter hohem Druck verwendet, so dass keine Phasenübergänge stattfinden, und der günstig und einfach zu bauen ist. Der GFR und der SCWR sind laut Björn Becker von der GRS in den letzten Jahren ins Hintertreffen geraten. Grundsätzlich sei der Begriff Zukunftstechnologie für die Ideen des GIF mit Vorsicht zu verwenden, erklärt er. Die Konzepte gebe es zum Teil schon seit Jahrzehnten. Ob und welches sich durchsetzen wird und welches am sichersten wäre, lässt sich laut Becker nicht pauschal sagen.

## Kleine Reaktoren, schlüsselfertig

Die meisten der in Bau befindlichen Reaktoren erzeugen hohe Leistungen von mehr als einem Gigawatt – genug, um eine Großstadt mit Strom zu versorgen. In den kommenden Jahrzehnten aber könnten kleinere, dezentrale Anlagen an Bedeutung gewinnen, so genannte "Small Modular Reactors" (SMR). SMRs liegen in ihrer Leistung bei unter 500 Megawatt. Sie würden in Fabriken als Module in Masse produziert und dann vor Ort zu größeren Kraftwerkseinheiten zusammengesetzt werden. Manche Experten erhoffen sich von dieser Fertigungs- und Betriebsweise eine höhere Sicherheit. Außerdem soll sie die Kraftwerke in der Investition günstiger machen als die mächtigen Anlagen, die derzeit existieren oder gebaut werden.



Das könnte Sie auch interessieren:  
[Spektrum Kompakt:](#)

Auch einige der Generation-IV-Konzepte des GIF lassen sich in modularer Form verwirklichen. So wäre [der Flüssigsalz-Reaktor von Terrestrial Energy mit seinen anvisierten 400 Megawatt Leistung](#) und einer modularen Bauweise ein SMR. Die Anlage könnte auch in entlegenen Gegenden errichtet werden, beispielsweise um mit ihrem Strom und ihrer Prozesswärme Bodenschätze zu erschließen. Wenn die weiteren Hürden im Genehmigungsverfahren genommen und die technischen Herausforderungen gelöst sind, könnte Ende der 2020er Jahre solch ein [Reaktor der Zukunft in Kanada in Betrieb gehen](#), an einem idyllisch grünen Fleckchen Erde zwischen Seen, Flüssen und Wäldern.

Nachhaltigkeit –  
Nahrung und Energie  
für die Zukunft

© Spektrum.de