

Kernkraftwerke – der Weg in die Energiezukunft. Horst-Joachim Lüdecke bei Kontrafunk

geschrieben von AR Göhring | 31. August 2026

- Kernkraftwerke sind eine unerlässliche Komponente einer zukünftigen naturschonenden Stromerzeugung.
- Sie sind optimal in Stromnetze integrierbar, grundlastfähig, und ihre Brennstoffe stehen so gut wie unendlich lange zur Verfügung.
- Sie produzieren langfristig preiswerten Strom, und sie erzeugen kein CO₂. Die von den Kernkraftgegnern behaupteten großen Risiken sind nicht real, die Probleme der Sicherheit sind technisch gelöst und beherrschbar.
- Kernkraftwerke stehen in der Sicherheit an zweiter Stelle aller Methoden der Stromerzeugung.

EIKes Pressesprecher Prof. Horst-Joachim Lüdecke hat am Max-Planck-Institut in Heidelberg zur Kernphysik promoviert und war Professor für Informatik und Physik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes. In seiner Vorlesung beleuchtet er die Funktionsweise und die Technik moderner Kernkraftwerke und setzt sich kritisch mit übertriebenen Bedrohungsszenarien auseinander. Hier die Vorlesung:

https://eike-klima-energie.eu/wp-content/uploads/2026/08/20260823_Audimax_Luedecke_Atomkraft_Final.mp3

Nachfolgend der Vorlesungstext von Prof. Lüdecke im Wortlaut, ausgenommen von geringen Erweiterungen, die infolge des engen Zeitrahmens beim gesprochenen Text fehlen. Ferner sind jetzt auch einige Internetlinks im Text enthalten.

Warum brauchen wir Kernkraftwerke?

Ohne billige Energie, die stets zur benötigten Zeit zur Verfügung stehen muss, ist ein Industrieland nicht mehr auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig, und sein Wohlstand nimmt ab. Dies erlebt zurzeit Deutschland als freien Fall seiner Industrie. Wind und Sonne zur Stromerzeugung haben viel zu kleine Leistungsdichten, sind wetterabhängig und daher insgesamt zu teuer (hier und hier). Bei Strommangel muss ein zweites System von fossilen Kraftwerken einspringen. Solch eine ungeeignete Energiepolitik lehnen 85% der Weltbevölkerung ab. Kohle, Öl und Gas sind immer noch die

Hauptlieferanten von Energie, auch in Deutschland. Für die **zukünftige** Stromerzeugung sind Kernkraftwerke zur wichtigsten Option geworden, auch eine Mehrheit der deutschen Bevölkerung will sie wieder zurückhaben. Als Vorteile gelten ihre optimale Integrationsfähigkeit in Stromnetze, ihre **langfristig** günstigsten Kosten, ihre Grundlastfähigkeit, ihre Umweltverträglichkeit, ihre fast unendliche Brennstoffreichweite und ihre hohe Sicherheit. Kernkraftwerke erzeugen zudem kein CO₂.

Kernkraftgegner, die überwiegend dem links-grünen Spektrum angehören, sehen dies völlig anders. Kernreaktoren seien zu teuer und grundsätzlich unbeherrschbar. Das Problem des radioaktiven Abfalls sei nicht gelöst, es drohe Proliferation radioaktiven Materials zum Bombenbau. Darüber hinaus wird die Strahlenbelastung bei Havarien von Kernreaktoren genannt. Belegte Fakten gibt es bei solchen Behauptungen fast nie, nur Ideologie zählt.

Freilich zeigt ein Blick auf die weltweite zivile Nutzung der Kernenergie, dass obwohl das erste stromerzeugende Kernkraftwerk bereits vor 75 Jahren in Betrieb genommen wurde, heute weltweit nur 10% der elektrischen Energie aus Kernkraftwerken kommen. Weil Strom **weltweit** und auch in Deutschland nur 15% der benötigten Gesamtenergie ausmacht, entsprechen 10% Strom nur 1,5% der Gesamtenergie. Das ist nicht viel. Im Vergleich dazu erzeugen allein Kohlekraftwerke 33% des weltweiten Stroms. Nur die EU, hier vorrangig Frankreich, die USA, Russland und Pakistan erzeugen um die 20% ihres Stroms aus Kernkraft. Einige Länder liegen noch weiter vorne wie die Ukraine mit 50% Kernenergiestrom. China mit 5% und Indien mit 3% gehören noch nicht zu den „Kernkraft-Riesen“, sind aber dabei es zu werden. **Deutschland hat die Kernkraft aufgegeben und setzt mit Windrädern auf Methoden des Mittelalters.**

Aktuell sind **weltweit** 415 Kernkraftwerke in Betrieb, weitere 190 werden gebaut. 70 davon sind in der Bauphase und 120 in konkreter Planung. Der wirtschaftlich bedingte Stillstand von Neubauten in den 1990er- und 2000er-Jahren ist beendet. Die bereits bestehenden Reaktoren, aber auch die zukünftigen 190 Reaktoren gehören fast alle zur Kernreaktor-Generation II bis III+ als Druckwasserreaktoren. Ihre Energieausbeute ist nur 2 bis 3 Mal besser als die von Kohlekraftwerken. Nur 14 der 190 kommenden Reaktoren sind Typen der neuen Generation-IV und nur unter diesen finden sich die wirklich fortgeschrittenen zukunftssträchtigen Anlagen mit 100-300-Mal mehr Energieausbeute als der von der Generation III.

Warum baut man dann nicht sofort und nur diese fortgeschrittenen Typen der Generation IV?

Zunächst dauert der Bau eines Kernkraftwerks 6 bis 10 Jahre, in westlichen Ländern oft länger. Ferner gibt es noch andere Hindernisse, die mit Technik, Sicherheit oder Endlagerfragen der neuen Kernreaktoren nichts zu tun haben. In der Stromstatistik werden sich die neuen 190

Reaktoren ohnehin erst in den späten 2030er-Jahren wirklich bemerkbar machen, und erst danach wiederum wird es mit dem Bau von Generation IV Kraftwerken in großem Maßstab wirklich losgehen. Das erscheint paradox, weil einige hocheffiziente Kernkraftwerke der Generation IV bereits im Pilotbetrieb teilweise schon sehr lange laufen. Manche unter ihnen haben sogar schon über Jahrzehnte Strom in Verbrauchsnetze ohne größere technische Probleme eingespeist. Kernkraftwerke sind aber unabdingbar ein **langfristiges** Projekt. Kohle und Gas können durch Kernenergie nicht zeitnah ersetzt werden.

Wie kam die Menschheit zur friedlichen Nutzung Kernenergie?

In der Zeit ab 1900 bis etwa 1935 haben Physiker und Physikerinnen herausgefunden, dass Atome einen positiv geladenen Kern von Nukleonen, bestehend aus positiv geladenen Protonen zusammen mit ungeladenen Neutronen haben. Jedes neutrale Atom besitzt eine Hülle aus negativen Elektronen, deren Anzahl mit der Protonenanzahl identisch ist. Der Atomkern macht zwar so gut wie die gesamte Atommasse aus, sein Durchmesser ist dagegen 20- bis 150-tausend Mal kleiner als der der Elektronenhülle. Gemäß klassischer Physik kann ein Atom gar nicht existieren. Erst die Quantenmechanik, die sich weitgehend der Anschauung entzieht, vermochte die Stabilität und den Aufbau von Atomen physikalisch zu erklären und genau zu berechnen.

Die starke Kernkraft hält die sich elektrisch gegenseitig abstoßenden Protonen und die zusätzlichen Neutronen im Atomkern zusammen. Die Anzahl der Protonen und damit der Elektronen bestimmt das Element. So besteht zum Beispiel der Kern von natürlichem Kohlenstoff aus 6 Protonen und 6 Neutronen und wird als C-12 abgekürzt. Isotope sind Variationen eines natürlichen Elements mit mehr oder weniger Neutronen und daher auch anderen Massen. So hat C-14 zwei Neutronen mehr als C-12, ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 5760 Jahren zu Stickstoff N-14, einem Elektron und einem Antineutrino. Zur Halbwertszeit hat sich jede Anfangsmenge eines zerfallenden Kerns halbiert. Der Kern des leichtesten Elements Wasserstoff H-1 ist nur ein Proton, sein Isotop Deuterium H-2 besitzt zusätzlich ein Neutron und sein Isotop Tritium H-3 bereits 2 Neutronen. Tritium zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Das schwerste stabile Element Blei-208 hat 82 Protonen und 126 Neutronen. Mit der Abweichung eines Isotops von der natürlichen Neutronenzahl steigt die Instabilität des Elements. Es kommen aber alle Variationen vor, stabile und instabile Elemente sowie stabile und instabile Isotope. In der Natur finden sich 91 Elemente, davon sind 11 instabil.

Alles, was wir spüren, sehen, riechen, hören und alle chemischen Reaktionen wie das Verbrennen von Kohle oder das Rosten von Metall wird von Energieänderungen in der Elektronenhülle verursacht. Die Atomkerne bleiben davon unberührt. Zu einem Atomkern können nur radioaktive Strahlung oder Neutronen vordringen. Die berühmte Formel $E = m \cdot c^2$ von

Albert Einstein besagt, dass Energie E und Masse m äquivalent sind und gegeneinander umgewandelt werden können. Die Energieänderungen der Elektronenhülle sind freilich so winzig, dass ihre Massenänderungen verschwindend sind.

Dies ändert sich dramatisch bei Umwandlungen von Atomkernen wie Kernspaltung oder Kernfusion. Die Massen- und Energie-Änderungen sind hier 100-millionenfach größer, als die der Elektronenhülle. Sie erreichen bereits den Prozentbereich. So kann Uran-235 in mehrere Bruchstücke zerfallen, die dann insgesamt 0,1 % weniger Masse haben. Dieser Massendefekt wird bei der Kernspaltung zur kinetischen Energie der Spaltprodukte und zu Strahlungsenergie. Die Entdeckung der Kernspaltung 1938 von Otto Hahn, Fritz Straßmann und Lise Meitner bedeutete zugleich die Entdeckung einer bisher unbekannten extrem hohen Energieerzeugung. Bei vollständiger Umwandlung von Masse zu Energie werden zum Beispiel aus nur 4 Millionstel Gramm Masse 100 kWh Energie. Davon sind allerdings die heutigen Kernreaktoren der Generation II bis IV um Lichtjahre entfernt. Eine konkrete Anwendung der Energie-Masse-Äquivalenz gibt es aber zum Beispiel schon in der medizinischen Positronen-Emissions-Tomographie (PET), wo Masse in Photonenenergie umgewandelt wird.

Warum bisher nur Energieerzeugung durch Kernspaltung, wie steht es mit der Kernfusion?

Die Bindungsenergie pro Nukleon in einem Atomkern steigt vom Wasserstoff H-1 bis hin zu Eisen Fe-56 **steil** an und nimmt danach, wesentlich **flacher** verlaufend, bis zu Uran und Blei wieder ab (hier). Mehr Bindungsenergie entspricht gemäß der Energie-Masse-Äquivalenz weniger Kernmasse und umgekehrt. Fusioniert man Deuterium mit Tritium, erzeugt man einen Heliumkern höherer Bindungsenergie und ein Neutron. Der entstandene Massendefekt wird zu nutzbarer kinetischer Energie des Heliumkerns und des Neutrons. Im flacheren Bereich der Bindungsenergie-Kurve erzeugt umgekehrt **Kernspaltung** einen Massendefekt, weil zum Beispiel die leichteren Bruchstücke eines gespaltenen Urankerns dann insgesamt eine höhere Bindungsenergie aufweisen. Wegen der unsymmetrischen Bindungsenergiekurve ist der Energiegewinn pro Gramm Brennstoff aus Fusion größer als der aus Kernspaltung. Allerdings versucht man seit 75 Jahren die Kernfusion mit einem Reaktor zur Energieerzeugung – bisher ohne geringste realistische Aussicht auf Nutzung.

Ob Kernfusion wegen ihrer extremen technischen Komplexität jemals wirtschaftlicher sein kann als die erfolgreiche und inzwischen weit fortgeschrittene Kernspaltung, ist höchst unwahrscheinlich. Hätte man ausreichend lang das Lawson-Kriterium als einer komplexen physikalischen Bedingung für eine im Plasma von selbst ablaufende Kernfusion erreicht, fangen die wirklichen Probleme erst an. Hochenergetische Neutronen zerschießen die ein hochsensibles Plasma einschließenden Reaktorwände und machen sie radioaktiv. Bei der zweiten Fusionsmethode mit Lasern

wird das Hundertfache der theoretischen Fusionsenergie aus dem Stromnetz benötigt. Die Idee von einem in wenigen Jahren erreichbaren Kernfusion-Reaktor ist Zweckoptimismus zur Einwerbung von Hochrisiko-Kapital. Die deutsche Politik, die alle Kernkraftwerke verschrotten ließ, unterstützt nun die in den nächsten Jahrzehnten völlig unrealistische Nutzung der Kernfusion mit Steuergeldern, während sie den erfolgversprechenden Dual-Fluid Reaktor DFR komplett ignoriert. Diese Politik ist in Wirklichkeit der ideologische Ausschluss jeder Kernenergie. Gegen die interessante Fusionsforschung selber ist dagegen nichts einzuwenden.

Vor der Funktionsweise von Kernkraftwerken soll nun zuerst ihre Sicherheit und die Problematik der radioaktiven Strahlung näher betrachtet werden.

Wie sicher sind Kernkraftwerke?

Das Sicherheitskriterium bei der Stromerzeugung wird als **„Todesfälle pro Terawattstunde Strom“** definiert und ist im Allgemeinen aus Vergleichen der Gefährlichkeit von Autoreisen und Flugreisen bekannt. Die Irrationalität beim Thema Sicherheit von Kernkraftwerken zeigte sich hierzulande daran, dass selbst unbedeutendste Störungen in Kernkraftwerken von den deutschen Medien zu Ereignissen nahe einem „Gau“ erklärt wurden. Von herabstürzenden Windradmonteuren war dagegen noch nie etwas zu hören. In der Realität verursachte der größte Kernkraftwerksunfall in Tschernobyl 28 unmittelbare Todesopfer durch Strahlenkrankheit und 19 spätere Todesfälle, für die aber kein Zusammenhang mit Strahlung nachgewiesen werden konnte. In Fukushima gab es keinen einzigen Strahlentoten. All dies ist belegt vom **United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation** der vereinten Nationen. Die korrekte Sicherheitsreihenfolge von Todesfällen pro Terawattstunde Strom beginnt mit 0,02 Solarenergie, 0,03 Kernenergie, 0,04 Wind und endet mit 2,8 Erdgas, 18,4 Öl und 24,6 Kohle. Man findet diese Werte in Our world of data, der Fachzeitschrift The Lancet, beim Schweizer Paul Scherrer Institut und in Statista.

Wie gefährlich ist eigentlich radioaktive Strahlung?

Radioaktivität ist die Fähigkeit eines Atomkerns Strahlung zu emittieren. Dabei wird er zu einem anderen Kern, der seinerseits wieder radioaktiv sein kann, bis solche Zerfallsketten in einem stabilen Kern enden. Es gibt Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlung. Sie alle sind ionisierend und können Schäden an Organzellen bewirken. Dabei werden Elektronen aus Atomen oder Molekülresten herausgeschlagen, wobei organschädigende positiv geladene Ionen entstehen. Der Atomkern des bestrahlten Organismus wird nicht radioaktiv, Radioaktivität ist nicht ansteckend! Es gibt zudem keinen Unterschied zwischen der natürlichen Radioaktivität und der von abgebranntem Brennstoff eines Kernkraftwerks!

Alphastrahlung sind **positiv geladene** Heliumkerne, die bereits von Papier abgeschirmt werden. Sie ist nur gefährlich durch Einatmen von zu viel Umgebungs-Radon oder zum Beispiel durch kriminell manipulierte Nahrungsaufnahme eines Alpha-Strahlers (hier), ansonsten ist sie unbedenklich. **Betastrahlung** sind Elektronen hoher kinetischer Energie, die bereits ein dickes Buch abschirmt. Sie ist beim Einatmen von technisch verursachten hohen Konzentrationen des Betastrahlers Tritium in der Luft extrem gefährlich, wobei daran zu erinnern ist, dass Tritium als Brennstoff für Plasma-Fusionskraftwerke vorgesehen ist und das „handling“ großer Tritium-Mengen potentiell eine maßgebende Gefahr darstellt. Die natürliche Konzentration von Tritium in der Luft ist dagegen verschwindend und ungefährlich. **Gammastrahlung** ist elektromagnetische Strahlung wie Licht, wegen höchster Frequenz aber extrem energetisch und unsichtbar. Ihre aufwendige Abschirmung ist aus den bleigefütterten Schutzjacken beim Röntgen bekannt.

Eine aufgenommene Strahlungsdosis wird **in Milli-Sievert angegeben**. Entscheidend ist dabei die **Dosisrate** als Dosis pro Zeit. So beträgt die Dosisrate der natürlichen Umgebungsstrahlung in Deutschland gemittelte 2,1 Milli-Sievert **pro Jahr**. Das Strahlenschutzgesetz und die Strahlenschutzverordnung legen Dosisgrenzwerte pro Jahr fest. Die zusätzliche Jahresdosisrate sollte auf 1 Milli-Sievert beschränkt sein, in Forschung und Medizin werden 20 Milli-Sievert zugelassen. Einmal Zähne röntgen macht die Dosis 0,02 Milli-Sievert, ein Ganzkörper-CT-Scan die von 20 Milli-Sievert. Somit wird bei 50-Mal im Jahr Zähne röntgen oder einem einzigen Ganzkörper-CT die 20-MilliSievert-Jahresgrenze erreicht. Die Tschernobyl-Havarie erzeugte in der Bevölkerung außerhalb der 30-km Sperrzone 10-30 Milli-Sievert im ersten Jahr und im fernen Deutschland 1 Milli-Sievert.

Nun die gute Nachricht: Die **natürliche** Jahresdosisrate in Gegenden vieler Länder übersteigt bei weitem alle zuvor genannten Werte. Trotzdem gibt es dort keine höheren Krebsraten oder eine höhere Sterblichkeit. Spitzenreiter sind Ramsar im Iran mit 450 Milli-Sievert pro Jahr und der Strand von Guarapari in Brasilien mit 200 Milli-Sievert. Aber auch in Spanien, Frankreich und Finnland kommen Gegenden mit 100 Millisievert pro Jahr vor. Aus Hiroshima und Nagasaki weiß man, dass 1 Sievert in wenigen Minuten bis etwa einer Stunde gefährlich ist, mehrere Sievert über so kurze Zeiten sogar lebensgefährlich. Unterhalb von 1 Sievert ist dagegen so gut wie nichts bekannt. Unser Körper ist durch natürliche Radioaktivität aus Einatmung und Nahrung selber radioaktiv. Überhaupt keine Radioaktivität ist daher nicht der Naturzustand. Ohne Radioaktivität, die unsere Vererbungsmoleküle verändern, gäbe es keine Evolution und damit auch keine Menschen. Radioaktive Strahlung scheint bei kleiner Dosis die Reparaturmechanismen der Zellen anzuregen und unser Immunsystem zu trainieren, so wie es moderate Sonnenstrahlung und nicht zu gefährliche Bakterien und Viren auch machen. Dieser noch weitgehend unerforschte benigne Effekt ist als Hormesis (hier) bekannt.

Die Hormesis hat allerdings keine Konsequenzen, denn die

Widerstandsfähigkeit gegen extreme natürliche Radioaktivität kann auch auf hunderttausenden Jahren langer Genanpassung der dortigen Bevölkerung beruhen und darf nicht einfach auf jeden Menschen übertragen werden. Eine wissenschaftliche Klärung der Hormesis wird es vermutlich nie geben, weil wohl niemand die extremen Kosten für ihre umfangreiche und teure Erforschung aufbringen wird. An den offiziellen Dosisgrenzen wird sich allein schon aus Sicherheitsgründen nichts ändern. Allerdings gibt es seit 2025 vom „break through institute der USA“ Bestrebungen den Strahlenschutz evidenzbasierter zu gestalten. Infolgedessen muss jeder für sich selbst die Strahlenbelastung eines CT gegen das Risiko abwägen, dass ohne CT vielleicht eine schwerwiegende Krankheit nicht ausreichend früh entdeckt werden konnte.

Wie funktionieren Kernkraftwerke der Generation II und III?

Es ist noch einmal zu betonen, dass die heutigen Kernkraftwerke **fast alle** vom **Druckwassertyp** (hier) Generation II und später der Generation III sind. Auf der anderen Seite ist die Anzahl anderer Reaktorkonfigurationen unübersichtlich groß. Die Vorlesung muss sich daher auf die Generation II und III und danach nur auf diejenigen neuen Kraftwerks-Typen der Generation IV beschränken, die einen **maßgebenden Effizienz-Fortschritt** bieten.

Der Trick von Kernkraftwerken ist die Kettenreaktion. Die Spaltung eines Atomkerns wird durch ein einfliegendes Neutron ausgelöst, das den Kern in zwei Fragmente höherer Bindungsenergie zerteilt, die zu nuklearem Abfall werden. Dabei werden Wärme und neue Spaltneutronen freigesetzt, die den Reaktor am Laufen halten. Das funktioniert nicht gleich mit Natururan als einer Mischung von mehreren Uranisotopen. In dieser Mischung ist nur das U-235 gut spaltbar, nicht aber U-238, das mit 99,27 % den Löwenanteil im Natururan ausmacht. U-235 zerfällt mit einer Halbwertszeit von 700 Millionen Jahren, so dass U-235 heute nur noch 0,7% Anteil im Natururan einnimmt – in der Erdvergangenheit war dieser Prozentsatz deutlich höher. Der Brennstoff des Reaktors muss daher mit dem gut spaltbaren U-235 angereichert werden, was heute einen Großteil der Kosten des Stroms aus Kernenergie ausmacht.

Weil langsame Neutronen einen höheren Wirkungsquerschnitt beim Spalten aufweisen als schnelle Neutronen, wird die Kernspaltung mit Neutronen-Moderatoren wesentlich besser. Solche Moderatoren sind bei fast allen heutigen Reaktoren der Generation II und III gewöhnliches Wasser von etwa 320 Grad Celsius und hohem Druck von ca. 160 bar, um sieden zu verhindern. Es füllt den Raum zwischen den Uranstäben aus. Das Wasser im Sekundärkreislauf hat dagegen nur noch 60 bar, siedet deswegen, und der Dampf treibt die Stromturbinen genauso an wie in jedem klassischen Kohle- oder Gaskraftwerk. Die Trennung von Haupt- und Sekundärkreislauf verhindert, dass radioaktive Stoffe den Primärkreislauf verlassen könnten. Solche Druckwasser-Reaktoren werden als **thermische** Reaktoren

bezeichnet, wobei mit „thermisch“ die Neutronengeschwindigkeit wie etwa die der Luftmoleküle eines Wohnzimmers gemeint ist.

Reaktoren, die keine Moderatoren verwenden und mit schnellen Neutronen spalten, werden „**schnelle** Reaktoren“ genannt. Sie können nicht mit Wasser als Moderatoren betrieben werden. Die fortgeschrittene Generation IV besteht überwiegend aus schnellen Reaktoren.

Wenn von den frischen Spaltungsneutronen im Durchschnitt immer genau ein Neutron überlebt, das wieder einen weiteren Kern spaltet, bleibt die Kettenreaktion aufrechterhalten. Diesen Zustand nennt man „kritisch“. Überlebt im Schnitt weniger als ein Neutron, ist der Reaktor unterkritisch und kann nicht selbständig laufen. Überlebt mehr als ein Neutron, steigt die Leistung zu stark an, und der Reaktor ist überkritisch. Durch Einfügen von Regelstäben in die Brennstäbe und durch Zusetzen von Bor zum Kühlwasser, die Neutronen absorbieren, hält man den Reaktor im kritischen Bereich.

Kaum bekannt ist, dass die Natur von sich aus Kernreaktoren erzeugen konnte (hier). Es waren Naturreaktoren vor 1,5 Milliarden Jahren, Menschen gab es damals noch nicht. Zufällige Umstände im afrikanischen Gabun ließen aus U-235 mit damals noch 3% im Natururan und aus Umgebungswasser als Moderator natürliche Reaktoren entstehen, die von selbst schwach liefen. 15 solcher Reaktoren hat man entdeckt. Sie waren um eine halbe Millionen Jahre aktiv. Falls man Kernreaktoren als die Ausgeburt des Leibhaftigen ansieht, können diese Naturreaktoren vielleicht einem Irrtum abhelfen.

Zurück zur Kettenreaktion! Kann der überkritische Zustand nicht durch Regelungsfehler entstehen und dann die Leistung des Reaktors ins Unermessliche ansteigen? Dies ist unmöglich, denn beim Druckwasserreaktor fängt in solch einem Störfall das Wasser sofort zu verdampfen an. Die Neutronen werden dann nicht mehr moderiert, spalten schlechter, und der Reaktor geht von selbst aus. Nur Reaktoren mit einem solchen Regelungsverhalten (Fachbegriff negativer Reaktivitätskoeffizient) sind in der westlichen Welt genehmigungsfähig, was Leistungsexkursionen explosiven Charakters ausschließt. Eine Leistungsexkursion ist dennoch nicht harmlos, weil dabei radioaktives Material austreten kann. Da sich durch die große Hitze und die entstandenen Kräfte sofort die Reaktorform verändert, kann der Reaktor danach nicht mehr kritisch werden und ist irreparabel zerstört. Solch eine Leistungsexkursion gab es 1986 in Tschernobyl, einem Siedewasser-Reaktor mit Graphitmoderator, der im Westen nie eine Betriebsgenehmigung erhalten hätte.

Doch selbst bei negativem Reaktivitätskoeffizienten kann eine andere Gefahr entstehen, die Kernschmelze (hier). Sie kann auftreten, wenn die Kühlung ausfällt, nachdem der Reaktor schon eine Weile lief und Brennelemente mit hochradioaktiven Spaltprodukten angereichert sind. Diese produzieren selbst Wärme, auch wenn der Reaktor abgeschaltet ist.

Die Notabschaltung hat man gut im Griff, aber der Umgang mit dieser sogenannten Restzerfallswärme ist Gegenstand der Weiterentwicklung in der Sicherheit. Kernschmelzen sind beim Reaktorunfall in Harrisburg und in Fukushima passiert, beide von der Generation II.

An diese Stelle passt nun die Erklärung, was das „+“ in Generation III+ meint. Es bezeichnet eine Weiterentwicklung der Generation III hin zu mehr Sicherheit gegen Kernschmelze durch aufwendigere Bauweisen wie unter anderem einem sogenannten Core Catcher, der im schlimmsten Fall den extrem heißen Brennstoff auffängt. Grundsätzliches an der Betriebsweise hat sich nicht geändert, die Effizienz dieser Reaktoren ist durch das „Plus“ nicht besser geworden. Da Sicherheit ihren Preis hat, stiegen Baukosten, Bauzeiten, Bürokratie und Prüfungsvorschriften stark an. Der finnische Reaktor Olkiluoto benötigte zur Fertigstellung 18 an Stelle der 4 geplanten Jahre, und seine Kosten machten das Vierfache der Planung aus. Weil es keine Abstriche in der Betriebssicherheit geben darf, begann sich das Eingeständnis durchzusetzen, dass die Generation III+ Reaktoren in Effizienz und Kosten grenzwertig sind. Die Lösung kann nur im zügigen Übergang zu denjenigen Reaktoren der Generation IV liegen, die als Kerneigenschaft eine ungleich höhere Energieeffizienz als alles bisher Dagewesene aufweisen.

Was hat es nun mit dieser Generation IV auf sich, und warum wurde dieser Weg nicht längst beschritten?

Ein Reaktor, der keinen neutronenabbremsenden Moderator verwendet, nennt man wie schon erwähnt einen *schnellen* Reaktor, manchmal auch *Schnellspaltreaktor*. Hier behalten die Neutronen ihre ursprüngliche Geschwindigkeit bei. In den 1990-er und 2000-er Jahren wirtschaftlicher Flaute der Kernenergie wurde die Entwicklung solcher neuen Kernkraftwerke weitgehend eingestellt, weil sie zur wirtschaftlich ungünstigsten Zeit kamen. Um die Ergebnisse früherer Forschungsarbeiten nicht zu verlieren, wurde wenigstens das „Generation IV International Forum (GIF)“ gegründet, dem inzwischen die meisten Industrieländer angehören. Einige Länder sind aus unterschiedlichen Gründen nicht dabei wie zum Beispiel Taiwan, Indien und Deutschland.

Wie schon betont, ist der entscheidende Nachteil der heutigen Generation III Reaktoren ihre unzureichende Effizienz der Energieerzeugung. Dieser Mangel verringert sich mit schnellen anstelle von langsamen Neutronen, kurz mit schnellen Reaktoren. Der Grund dafür ist das sogenannte **Brüten**. Mit Brüten ist gemeint, dass in **jedem** Reaktor, also auch in thermischen Reaktoren, aber insbesondere in denen der Generation IV unvermeidbar Neutronen der Kettenreaktion vom schlecht spaltbaren U-238 eingefangen werden, das wie bereits erwähnt fast das gesamte Natururan ausmacht. Dadurch wird U-238 zuerst zu U-239 und über zwei weitere Zwischenschritte zum sehr gut spaltbaren Plutonium-239.

Dieser Prozess wird „brüten“ genannt, weil sich mit jedem neu gebildeten Plutonium-239 Kern die Menge des spaltbaren Materials im Brennstoff erhöht. Das Verhältnis von erbrüteten und gespaltenen Kernen wird als Brutfaktor oder Konversionsfaktor bezeichnet. Ein Brutfaktor von 1 bedeutet, dass für jeden gespaltenen Kern ein neuer spaltbarer Kern nachgebrütet wird. Damit kann der Reaktor so lange unbegrenzt weiterlaufen, bis das **gesamte** Natururan und nicht nur ein winziger Anteil des Brennstoffs wie bei den thermischen Reaktoren verbraucht wird. Ist der Brutfaktor größer als 1, kann sogar noch zusätzliches Spaltmaterial erzeugt werden, um weitere Reaktoren zu versorgen.

Da der Mechanismus des Brütens auch in den Generation III Reaktoren stattfindet, nur eben mit einem Brutfaktor kleiner als 1, erhöht sich dort leicht der Anteil des spaltbaren Brennstoffs, er wird etwas gestreckt. Insbesondere gegen Ende eines Brennstoffzyklus nach 3 bis 4 Jahren ist das U-235 weitgehend abgebrannt und die gesamte Reaktorleistung kommt dann nur noch aus der Spaltung des erbrüteten Plutonium-239, insgesamt sind das ca. 30% mehr. Generation II oder III Reaktoren nutzen insgesamt nur etwa **1% bis 1,2%** des Uranbrennstoffs aus. Neben dieser schlechten Energie-Effizienz ist der zweite Nachteil der Generation III, dass sie grundsätzlich nur einen maximalen Brutfaktor um 0,5 bis 0,6 haben kann. Schnelle Reaktoren haben dagegen prinzipiell einen Brutfaktor von mindestens 1 und meist höher.

Warum dann nicht sofort ausschließlich diese schnellen Reaktoren bauen? Man errät es bereits: weil auch schnelle Reaktoren ihre Nachteile haben. Sie brauchen eine deutlich höhere Anreicherung mit U-235, um zu zünden. Laufen sie aber erst einmal, können sie das übrige Uran-238 viel besser nutzen und gehen dramatisch effizienter mit dem Brennstoff um. Die ernsthaften Probleme schneller Reaktoren sind erstaunlicherweise nicht technisch, sondern liegen ganz woanders. Darauf wird hier später noch kurz eingegangen. Sie wären behebbar, falls man nur will.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass schnelle Reaktoren auch dazu verwendet werden können, Abfallmengen der Generation III Reaktoren zu beseitigen. Dies wird als **Transmutation** (hier) bezeichnet. Bei den Generation III Reaktoren besteht das Hauptproblem des Atommülls in kleineren Mengen der Minoren Aktinoide Plutonium, Americium, Neptunium und Curium. Sie weisen eine ungünstige Kombination von gefährlicher Strahlungsstärke und langer Lebensdauer auf und benötigen daher eine sichere Endlagerung. Erst ein schneller Reaktor kann diesen Problem-Müll in leichtere Spaltprodukte mit weitgehend unbedenklicher Radioaktivität aufteilen. Die Zeitspanne, in der der verbleibende Atommüll sicher eingeschlossen werden muss, reduziert sich dann von rund 300.000 Jahren auf etwa 300 bis 1.000 Jahre. Auch das benötigte Volumen des Endlagers sinkt durch Transmutation. Die Transmutation hat allerdings den Nachteil hoher Kosten, die heute noch die der einfachen Endlagerung übersteigen. Dies kann sich aber mit mehr schnellen Reaktoren auch schnell ändern.

Wieder zurück zur Generation IV: zu ihr gehören drei schnelle

Reaktortypen, der natriumgekühlte, der bleigekühlte und der gasgekühlte Typ. Aus dem englischen Anfangsbuchstaben des Kühlmediums (sodium als Natrium und lead als Blei) vor dem FR als „fast reactor“ ergeben sich die englischen Abkürzungen SFR, LFR und GFR (G wie gas). Es gibt in der Generation IV auch noch zwei thermische Relikte, den Hochtemperaturreaktor und den Reaktor mit überkritischem Wasser, die hier nicht weiter besprochen werden. Zur Generation IV gehört auch der Flüssigsalzreaktor, der ohne feste Brennstoffelement auskommt und thermisch oder schnell sein kann. Er heißt MSR wie „molten salt reactor“.

Schlussendlich gibt es noch eine Erfindung aus jüngster Zeit, die deswegen nicht Teil der Generation IV wurde. Es handelt sich um den Dual Fluid Reaktor (DFR). Er wurde 2013 von fünf meist deutschen Erfindern vorgestellt. Auch beim DFR ist der Brennstoff flüssig und kann wie beim MSR zirkulieren, aber er kombiniert die positiven Eigenschaften des MSR mit denen mehrerer anderer Konzepte der Generation IV.

Alle Konzepte außer dem DFR werden vom Generation-IV-Forum unterstützt, oft mit Hilfe von staatlichen Forschungsgeldern. Von konsequenter Entwicklung kann dabei aber keine Rede sein. Es handelt sich eher um Aufrechterhaltung der Kompetenz, denn die Forschungsgelder bewegen sich im Millionen-Euro-Bereich. Für eine tatsächliche Prototypentwicklung braucht die Entwicklung jedoch Milliarden Euro. Lediglich der natriumgekühlte Reaktor SFR als erster stromerzeugender Reaktor in den 1950er Jahren wurde in verschiedenen Ländern weiterentwickelt. Da der Umgang mit hoch radioaktivem flüssigem Natrium nicht einfach ist, hat der SFR den Nachteil hoher Kosten, und es ist keineswegs klar, ob seine zukünftige Weiterentwicklung nicht sogar zu Gunsten eines anderen Typs aufgegeben wird.

Bei der Generation IV spielt das Kühlmittel die zentrale Rolle. Es führt die durch Kernspaltung erzeugte Wärme aus dem Reaktorkern ab, um außerhalb Turbinen zur Elektrizitätserzeugung anzutreiben. Das beliebteste Kühlmittel aller Kraftwerke, nicht nur von Kernkraftwerken, ist billiges Wasser. Wasser nimmt gut Wärme auf, kann sie speichern und wieder abgeben. Dampfförmig verhält es sich wie ein Gas, kann sich ausdehnen und somit Arbeit leisten, indem es Turbinen antreibt. Bei Kernkraftwerken zählen aber insbesondere auch die nuklearen Eigenschaften des Kühlmittels. Das zwangsweise durch den Reaktorkern laufende Kühlmittel beeinflusst die Neutronenbilanz. Es kann Neutronen absorbieren, so dass sich die Effizienz des Reaktors verschlechtert. Es kann sie auch abbremsen, was bei thermischen Reaktoren erwünscht ist, bei schnellen Reaktoren aber nicht.

Wasser als Kühlmittel ist für schnelle Reaktoren prinzipiell ungeeignet. Es würde die Neutronen zu stark abbremsen. Daher verbleiben nur flüssige Metalle und Gase. Ein Sonderfall ist der Flüssigsalzreaktor MSR, bei dem der Brennstoff selbst das Kühlmittel ist. Entsprechend sind die schnellen Reaktortypen metall- oder gasgekühlt. Als Gas kommt nur das

inerte Edelgas Helium infrage, weil es kaum Neutronen absorbiert und sich als Gas bei Erwärmung stark ausdehnt. Mit ihm können direkt Turbinen angetrieben werden, weil kostengünstig kein weiterer Wärmetauscher benötigt wird. Der Hauptnachteil ist die geringe Wärmeleit- und -Speicherfähigkeit von Helium, wodurch der Reaktor riesige Dimensionen im Vergleich von metallgekühlten Reaktoren gleicher Leistung aufweisen muss. Von den Vorteilen des GFR bleibt somit nur noch die hohe Temperatur übrig, kostengünstig ist er nicht mehr.

Die beiden anderen schnellen Varianten SFR und LFR arbeiten mit flüssigen Metallen als Kühlmittel. Mit „Kühlen“ ist hier allerdings gemeint, den Reaktor auf einige Hunderte bis über tausend Grad Celsius herunterzukühlen. Flüssige Metalle sind ideale Wärmeleiter und können sehr große Mengen an Wärme aufnehmen. Doch gibt es an anderer Stelle wieder einen Nachteil. Gerade weil Metalle so viel Wärme aufnehmen können, dehnen sie sich dabei kaum aus und sind deshalb für den direkten Antrieb von Turbinen ungeeignet. Es wird immer ein kostspieliger zweiter Wärmetauscher aus Gas oder Wasser benötigt.

Von den metallgekühlten Varianten ist nur aus historischen Gründen der natriumgekühlte SFR in der Entwicklung weit fortgeschritten. Natrium ist eines der leichtesten Metalle. Auch Deutschland stieg in den 70er Jahren in diese Technologie ein und baute den „schnellen Brüter“ in Kalkar. Er ging aus politischen Gründen nicht in Betrieb, technisch gab es damals keine ernsthaften Einwände. Frankreich baute fast zeitgleich den Phénix, später den Superphénix. Es arbeitete weiter am ASTRID, dem „Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration“. Russland schließlich baute ebenfalls SFRs mit immer größerer Leistung, die alle die Bezeichnung BN haben, wie zum Beispiel der BN-600.

Die zweite metallgekühlte Variante, der LFR mit flüssigem Blei als Kühlmittel, ist vom Konzept her eigentlich besser geeignet als der SFR, in der Kommerzialisierung liegt er jedoch weit hinter dem SFR. Auch sein Konzept ist nicht neu und hat wie viele Reaktortypen bereits zuvor einen militärischen Ursprung. Im Gegensatz zu den US-Amerikanern mit ihren wassergekühlten thermischen U-Boot-Reaktoren bevorzugte die Sowjetunion den schnellen bleigekühlten LFR und entwickelte ihn in den 60er Jahren. Im Gegensatz zu Natrium ist Blei ein sehr schweres Metall, das daher insbesondere für U-Boote gut geeignet ist. Blei wird aber erst bei 327 Grad Celsius flüssig. Infolgedessen muss sogar in ausgeschaltetem Zustand der Reaktor ständig auf mindestens dieser Temperatur gehalten werden, anderenfalls bleiben die Regelstäbe im „gefrorenen“ Blei stecken – und das Ergebnis ist Totalschaden des Reaktors. Durch den Trick Bismut im richtigen Verhältnis mit Blei zu mischen entsteht ein sogenanntes Eutektikum mit einem Schmelzpunkt bei 124 Grad Celsius. Diese Temperatur kann mit vernünftigem Aufwand auch im ausgeschalteten Zustand durch externes Heizen aufrechterhalten werden. Trotzdem trat infolge Ausfalls der Heizung der befürchtete Totalschaden tatsächlich ein. Auch verschlechtert Bismut die Neutronenökonomie erheblich, ist stark korrosiv und macht den Reaktor weniger effektiv.

Bemerkenswert ist bei fast allen Generation IV – Typen, dass zumindest Pilotanlagen schon einmal erfolgreich liefen und zum Teil immer noch laufen. Insbesondere die russischen natriumgekühlten Reaktoren haben sich in immer größeren Ausführungen bereits seit mehreren Jahrzehnten im Praxisbetrieb bewährt. Es begann mit dem BN-250, der 21 Jahre alt wurde. Die BN-Reihe wurde bis heute mit stetig gesteigerter Leistung fortgesetzt, 1980 mit dem BN-600 von 600 Megawatt elektrischer Leistung, der noch heute läuft, 2014 schließlich mit dem BN-800 von 789 Mega-Watt, der seit Dezember 2015 ans russische Stromnetz angeschlossen ist. Der BN-600 und der BN-800 sind momentan weltweit die einzigen laufenden SFR-Leistungsreaktoren. Wie es in Zukunft mit den BN-Typen weitergeht, ist allerdings ungewiss.

Wie groß ist eigentlich die Brennstoffreichweite von Kernkraftwerken?

Dazu setzen wir hypothetisch den extremen Zustand voraus, dass zukünftig **alle** benötigte Energie nur noch aus Kernkraftwerken kommen soll. Aus dem aktuellen Energiebedarf eines industrialisierten Menschen kommt man dann mit den heutigen Generation III – Reaktoren auf etwa 0,2 Kilogramm Natururanverbrauch pro Jahr und Kopf. Gegenwärtig sind rund 8 Millionen Tonnen Uran kostendeckend förderbar. Mit 0,2 kg pro Kopf würden die Uranvorkommen für hochindustrialisierte 8 Milliarden Menschen nur **fünf** Jahre ausreichen, wobei von den aktuellen thermischen Reaktoren mit der schon erwähnten 1% bis 1,2% Brennstoffnutzung ausgegangen wird.

Geeignete Generation IV-Reaktoren, die auch als Brüter optimiert werden können und schon Jahrzehnte im Pilotbetrieb erfolgreich laufen, können aber – eine Wiederaufbereitung vorausgesetzt – 100% des Natururans nutzen. Wegen ihren höheren Arbeitstemperaturen haben sie zudem einen doppelt so hohen Wirkungsgrad wie die heutige Generation III. Damit wären wir bereits bei nahe 1000 Jahren Natururan-Reichweite. Bei 100% Brennstoffausnutzung wird aber das im Meer vorhandene Uran von insgesamt 4,5 Milliarden Tonnen kostengerecht. Es bildet sich aus der Erdkruste durch ständige Auswaschung von Bächen und Flüssen und verschwindet im Meer daher nie. Zurzeit kostet es etwa das Vierfache des Urans aus Bergwerken. Mit den neuen Reaktortypen spielt der höhere Preis keine Rolle mehr. Bereits mit den jetzt schon existierenden hocheffektiven Generation IV-Reaktoren und Uran aus dem Meer wird die Brennstoffreichweite praktisch unendlich. Vom Kernbrennstoff Thorium, das etwa dreimal so häufig wie Uran in der Natur vorkommt, ist dabei nicht einmal die Rede.

Wie steht es eigentlich um den Abfall von Kernkraftwerken?

Über die Transmutation wurde hier bereits gesprochen, wegen ihrer Kosten und dem gegenwärtigen Fehlen von ausreichend vielen schnellen Reaktoren

steht aber die Endlagerung immer noch in der Diskussion. Das Thema „radioaktiver Abfall“ aus Kernkraftwerken und Nuklearmedizin ist nur hierzulande ein medial ewiger Dauerbrenner – im Gegensatz zur restlichen Welt, wo sich sogar französische Gemeinden zum Beispiel um Endlager für radioaktiven Abfall bewerben. Das Schreckgespenst extrem stark strahlenden Abfalls über Millionen Jahre gibt es nicht. Je stärker eine Substanz radioaktiv strahlt, umso schneller verschwindet sie, und umso kürzer ist ihre Halbwertszeit. Der bei den Generation III-Typen entstehende stark strahlende Abfall in Abklingbecken ist bereits nach wenigen Jahrzehnten so schwach strahlend geworden, dass er problemlos endgelagert werden kann. Ebenso unproblematisch für das Endlager ist der schwach strahlende Abfall. Die dabei entstandenen Mengen in Deutschland sind nicht groß: Großzügig gerechnet füllt der bis heute insgesamt in ein Endlager zu bringende Abfall einen Würfel der Kantenlänge von 100 m mit einem Gewicht von 2 Millionen Tonnen. Die Menge von hochtoxischen Chemikalien beträgt in Deutschland dagegen 7 Millionen Tonnen. Dieser extrem toxische Abfall verschwindet im Gegensatz zum Zerfall durch Radioaktivität niemals. Problematisch ist nur die relativ kleine Menge von Minoren Aktinoiden, die wie schon erwähnt, ungünstig langes Strahlen mit ungünstig starkem Strahlen verbinden und deswegen endgelagert werden müssen.

Zur SMR Extrawurst

Weltweit sind zur Zeit die sogenannten small modular Reaktoren, kurz SMR im Gespräch, wobei dieser Diskurs stark unter der Diskrepanz von medialem Wunschdenken und realer energiewirtschaftlicher Praxis leidet. Wenn man unter „Marktreife“ einen kommerziellen, in Serie gefertigten Reaktor versteht, der sich am freien Markt ohne massive staatliche Subventionen behauptet, **existiert** ein solcher SMR derzeit **nirgendwo**. Es gibt lediglich einige wenige Prototypen und Demonstrationsanlagen von Leistungen unter 300 MW. SMRs sind kein „physikalischer Quantensprung“, sondern ein Versuch, die inhärenten ökonomischen und baulichen Probleme der Großkernkraftwerke durch Standardisierung und Verkleinerung zu umgehen. Solange die Fabrik-Serienfertigung von SMR nicht real existiert, bleibt der Strom aus SMRs pro Megawattstunde deutlich teurer als aus Großkraftwerken – und das fundamentale Problem der strahlenden Altlasten bleibt nicht nur unverändert bestehen, sondern wird sogar noch größer. Die angedachten Batterien solcher SMR haben zwar einige Vorteile aber wesentlich mehr Nachteile. Statt eines Reaktorkerns hat man nun mehrere. Jeder benötigt einen eigenen Druckbehälter mit eigenen Sicherheitssystemen und eigenen Anschlüssen für die Kühlung. Die Module haben einen Mindestabstand, so dass sich die Gesamtleistung des Kraftwerks über ein großes Volumen verteilt. Der nukleare Teil bekommt damit gewaltige Dimensionen. SMR sind in Wirklichkeit eine **Rückwärtsentwicklung**, aber kein Fortschritt.

Zur Extrawurst Dual Fluid Reaktor (DFR)

Der DFR (hier) als schneller Flüssigkeitsreaktor wird manchmal mit dem molten salt Reaktor MSR verwechselt. Beim MSR gibt es aber nur eine Flüssigkeit, die gleichzeitig die Kettenreaktion beherbergt und zudem noch die erzeugte Wärme nach außen führen muss. Der Kompromiss beim MSR liegt in kleiner Leistungsdichte, weil man das Salz verdünnen muss. Beim DFR wird dagegen die produzierte Wärme noch im Reaktorkern auf ein zweites Medium übertragen und von diesem nach außen transportiert. Somit sind die beiden Funktionen getrennt, und jeweils der optimale Brennstoff und das optimale Wärmemedium wie flüssiges Blei können ausgewählt werden. Im MSR müssen dagegen beide Aufgaben, Brennstoffzufuhr und Wärmeabfuhr, vom gleichen Medium erfüllt werden – also zwei Funktionen, die nur schlecht vereinbar sind.

Inhärent sicher sind MSR und DFR gleichermaßen, denn flüssiger Brennstoff dehnt sich mit steigender Temperatur stärker aus als fester Brennstoff, die Neutronen spalten weniger und die Temperatur sinkt. Auch die einfache Sicherung eines schmelzenden Ablassventils bei zu hohen Temperaturen kommt hinzu, denn dann fließt die Salzschnmelze einfach ab, und die Kettenreaktion hört sofort auf. Der DFR gehört zu den Hochtemperaturreaktoren, kann auf einen hohen Brutfaktor getrimmt werden, und er ist zudem ideal für die Transmutation geeignet, um langlebige Aktinoide effizient zu spalten und zu verbrennen.

Die einzigen Nachteile des DFR bestehen bislang darin, dass bisher noch nicht einmal für den ersten Schritt genügend Geld von der deutschen Bundesregierung oder von Risikokapital zur Verfügung steht. Flüssigbrennstoff mit Hochtemperaturmaterialien scheint wohl vielen zu ungewöhnlich für einen Kernreaktor zu sein. Ein konkreter erster Schritt beim DFR muss zeigen, dass sich der Reaktorkern aus hochwiderstandsfähigen Keramiken in der notwendigen Qualität fertigen lässt, und sich dann auch bewährt. In der nicht-nuklearen Industrie werden diese Materialien bereits bei solchen Temperaturen eingesetzt, auch den DFR-Brennstoff, eine Uran-Chrom-Schnmelze, sollten sie aushalten. Gelingt das Experiment, sind keine belastbaren Argumente mehr in Sicht, die grundsätzlich gegen den DFR sprechen. Es wird hier im Vortrag daher nachdrücklich an die deutsche Regierung appelliert, diesen einzigartigen Reaktortyp zumindest bis zum konkreten Beweis seiner Machbarkeit finanziell zu unterstützen, und sei es wenigstens durch beschleunigte Genehmigungsprozesse.

Warum ist der Weg zu den effizienten Kernreaktoren der Generation IV so steinig?

Auf den UN-Klimakonferenzen und jüngst beim Nukleargipfel in Paris im März 2026 sind fast 40 Staaten, darunter die USA, Frankreich, Großbritannien, Südkorea und auch China und Brasilien offiziell übereingekommen die weltweite Kernkraftkapazität bis 2050 zu

verdreifachen. Dieser aktuelle Boom ist stark ungleichgewichtig verteilt, denn über 90% aller Reaktoren, deren Bau oder konkrete Planung in den letzten zehn Jahren begonnen wurden, basieren auf chinesischen oder russischen Designs. China baut überwiegend im Inland, dagegen baut Russland als weltgrößter Exporteur von Kernkraftwerken im Ausland. Warum wird aber immer noch vorwiegend die Generation III+ bevorzugt und nicht die technisch wesentlich bessere Generation IV? Der Grund ist nicht die Physik der Generation IV, sondern eine Gemengelage von ökonomischen und regulatorischen Gründen.

Die jeweils aktuelle **Zulassungsfähigkeit** und die **Bauvorschriften** sind maßgebend. Für Leichtwasserreaktoren der Generation III+ existieren weltweit die einschlägigen Industrien und insbesondere die zugehörigen Lieferketten. Hinzu kommt, dass sich Behörden wie die US-amerikanische NRC (Nuclear Regulatory Commission) oder deren europäischen Pendant historisch auf Wasser als Kühlmittel festgelegt haben. Ein Zulassungsverfahren für einen Flüssigmetall- oder Flüssigsalzreaktor der Generation-IV dauert heute noch insbesondere im Westen viel zu lang. Damit sind oft mehr Kosten verbunden als für den Bau des Kernkraftwerks selber, weil die Kriterien für die völlig anderen physikalischen Parameter der Generation IV erst neu aufgestellt, dokumentiert und in den behördlichen Anweisungen verankert werden müssen. Investoren scheuen das sich daraus ergebende finanzielle Risiko. Und als Allerwichtigstes ist die entscheidende Standardisierungs-Frage immer noch ungeklärt: „Welcher Generation IV-Typ macht das Rennen?“

Wie kam es zum gegenwärtigen Stand und wie geht es weiter?

Diese Frage wird weniger von der hohen Anzahl vielversprechender Reaktortypen beantwortet, als vielmehr durch Ideologien in der westlichen Welt, die mit Technik wenig zu tun haben. Musterbeispiel dafür ist Frankreich. So wurden die in der Summe erfolgreichen natriumgekühlten schnellen Brüter Phénix, Superphénix und ASTRID letztlich Opfer eines links-grünen Wahns gegen Kernkraftwerke. In dieser Ideologie wurden Kernkraftwerke als Hauptstützen einer Entwicklung angesehen, die den Zielen des Ökosozialismus zuwiderlaufen. Der Ökosozialismus will den Ressourcenverbrauch und die CO₂-Emissionen mit Negativwachstum (**degrowth**) senken, Produktion und Energieversorgung nachhaltig verringern, das Profitprinzip aufgeben und **Wohlstand bewusst vernichten**. Ziel dabei ist nicht der Schutz der Natur, sondern eine sozialistische Diktatur der Verstaatlichung, Planwirtschaft und Kollektivierung.

Die globale Energiekrise und der links-grüne Druck gegen die Kernenergie haben in Frankreich zu einer politischen Ausweichbewegung als sogenannter „Nuklearer Renaissance“ von Emmanuel Macron geführt. Es ist eine Abkehr von staatlichen Großprojekten, hin zu Start-ups. Dabei sind wieder die schnellen Reaktoren gefragt, allerdings nicht mehr die

gigantischen Monolithen der 1980er Jahre, sondern kleinere, privatwirtschaftlich entwickelte, modulare Brüter zur Beseitigung französischer Uranrestbestände mit Transmutation. Schließlich lagern Tausende Tonnen abgereichertes Uran in Frankreich, um sie langfristig als Brennstoff zu nutzen. Solche Reaktoren sind politisch weit schwerer zu bekämpfen als die ehemaligen Großprojekte.

Generell findet zurzeit weltweit ein Paradigmenwechsel statt, weil Uran auf dem Weltmarkt heute bei weitem nicht so knapp ist, wie man es in den 1970er Jahren vorhergesagt hatte. Der Fokus liegt heute auf Kompaktheit, inhärenter Sicherheit und auf der Entsorgung langlebiger Abfälle, wobei eigentlich Flüssigbrennstoffreaktoren wie der DFR ganz vorne liegen müssten. Für diese Ziele reichen kleinere schnelle Reaktorkerne zunächst einmal völlig aus. Der springende Punkt dabei ist immer folgender: Wer ein Kernkraftwerk bauen will – selbst ein kleines –, bewegt sich in einer Liga, in der Hunderte Millionen Euro Startkapital nur die Eintrittskarte sind. Bis ein schneller Reaktor-Prototyp Strom oder Wärme liefert, vergehen viele Jahre, und die Gesamtkosten gehen in die Milliarden.

Dass diese Start-ups heute überhaupt eine Chance haben, liegt an einer stark veränderten Finanzierungsstruktur wie sie in ähnlicher Form auch allmählich bei der KI und der Raumfahrt zu erkennen ist. Sie ist eine dreiteilige Mischung aus staatlichen Anschubhilfen, schwergewichtigen privaten Investoren und dem Gang an die US-Börse. Wer hier an der Börse investiert, geht freilich eine hochspekulative Wette ein. Denn das Risiko neuer Kernkraftwerke ist nicht die Reaktor-Physik, sondern die Finanzierung, Zulassung, Fertigung und vor allem eine rationale oder eine ideologische Politik des betreffenden Landes. Aktuell schwingt das weltweite Pendel weg vom Ökosozialismus und hin zur Vernunft, das kann sich aber auch wieder umkehren, wenn die Verrückten wieder die Oberhand gewinnen. Dann aber wären Aktien an der US-Börse von Firmen, die schnelle Kernkraftwerke bauen, ein riesiges Verlustgeschäft. Bei dieser Gemengelage spielt insbesondere der immens sich steigernde Strombedarf der KI eine Schlüsselrolle. Wird die KI ein weltweites Geschäft, dürften auch schnelle Kernreaktoren ein gutes Geschäft werden und umgekehrt.

Interessant in diesem Zusammenhang ist Bill Gates, der als Gründer von Microsoft und geschickter Geschäftsmann weltbekannt ist. Seit kurzer Zeit baut seine neue Firma TerraPower einen speziellen natriumgekühlten schnellen Reaktor als Prototyp. Dieser Reaktor ist nicht nur für das eigene KI-Rechenzentrum von Microsoft vorgesehen, sondern hat zudem noch das ambitionierte Ziel als ein standardisiertes modernes Kernkraftwerk der Generation IV zum weltweiten Verkauf angeboten zu werden. Ob dieses Mammutprojekt klappen wird? Schwer zu sagen. Pikant bei diesem Projekt ist jedenfalls, dass das US-Energieministerium über Förderprogramme bis zu 50% der Kosten des Reaktor-Demonstrators übernimmt. Läuft die ganze Sache schief, zahlt der amerikanische Steuerzahler kräftig mit. Geht es dagegen gut aus, erhält TerraPower die wertvollen Patente. Bill Gates hat sich hier wieder einmal als ein mit allen Wassern gewaschener

Geschäftsmann erwiesen.