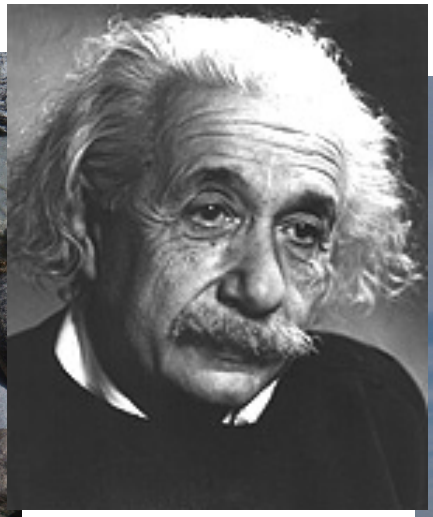


# EinStein + ein Glas Wasser

### … und ein Mensch hat ein Jahr lang genügend Strom

Natürlich braucht's dazu auch noch etwas Gehirnschmalz, die bekannte Formel $E = mc^2$ und eine geeignete Dampfmaschine. So eine wie sie zum Beispiel in den nächsten Jahren in Cadarache (Südfrankreich) gebaut wird. Forscher aus den EU-Ländern inkl. der Schweiz, den USA, Russland, China, Südkorea, Indien und Japan entwickeln dort zurzeit gemeinsam den Fusionsreaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor; lateinisch: der Weg). Dieses Kernkraftwerk kann keine Katastrophe wie in Tschernobyl verursachen und die entstehende Asche ist nicht radioaktiv. ITER ist wohl das faszinierendste technische Projekt, das die Menschheit je in weltweiter Zusammenarbeit verwirklicht hat. Die Bauzeit geht bis 2018, dann wird der Versuchsbetrieb aufgenommen. Auf dieser Technologie basierende Kernfusionskraftwerke werden in einigen Jahrzehnten den ersten Strom ins Netz liefern. Sie sollen uns dann zusammen mit den erneuerbaren Energien schrittweise in eine Zeit mit sinkendem Verbrauch von fossilen Brennstoffen führen.

Eigentlich kennt man diese Form der Energieerzeugung, die so genannte Kernfusion, schon seit langem. Sie bringt die Sonne und all die anderen Sterne am Himmel zum Leuchten. Die Kernfusion auf der Erde zu nutzen hat jedoch seine Tücken. Immer wieder haben die Forscher die Geldgeber vertröstet, das Ziel sei in Sichtweite. Diese betrug vorerst während einigen Jahrzehnten stets gleich bleibende zwanzig Jahre. Als das langsam unglaubwürdig klang, sagte man den funktionierenden Fusionsreaktor in ungefähr vierzig Jahren voraus. In letzter Zeit häufen sich jedoch die Erfolge. In weltweit zahlreichen Versuchsanlagen gelingt es, die von den Physikern vorhergesagte Kernfusion zu erzeugen und die vorerst aufgetretenen technischen Probleme zu lösen. Heute sind die Forscher davon überzeugt: ITER wird ein Erfolg!

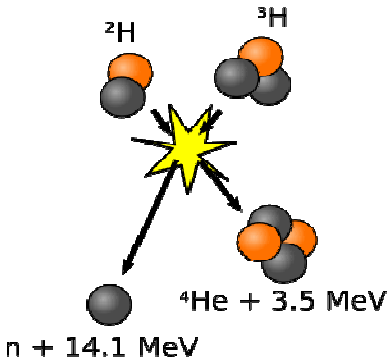
### Wie funktioniert die Kernfusion?

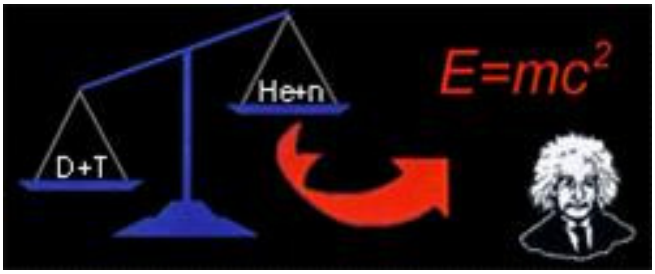
Der kleinste Bauteil eines chemischen Elementes ist bekanntlich ein Atom. Dessen Kern (= Atom ohne seine elektrisch negativ geladenen kleinen Elektronen) setzt sich aus Nukleonen zusammen. Es gibt zwei Sorten Nukleonen: die elektrisch positiv geladenen Protonen und die Neutronen. Beide haben ungefähr dasselbe Gewicht. Die Anzahl Protonen je Kern sagt aus, welches chemische Element wir gerade betrachten. Die Anzahl der Neutronen je Kern kann in einem chemischen Element variieren. Enthält ein Kern z.B. nur ein Proton, handelt es sich um Wasserstoff. Der in einem Glas Wasser vorhandene Wasserstoff enthält zu ca. 0.015 Prozent Atomkerne, die neben dem Proton auch noch ein Neutron besitzen. Es ist zwar immer noch Wasserstoff mit dem üblichen chemischen Verhalten. Dieser ist aber ungefähr doppelt so schwer und man nennt ihn Deuterium. Auch Tritium, so nennt man den Wasserstoff mit zwei Neutronen, findet man auf der Erde. Die kosmische Strahlung erzeugt stets neues Tritium, doch da die Hälfte der neu entstandenen


Benedikt Jorns benedikt.jorns@bluewin.ch

Tritiumkerne nach ca. 12 Jahren eines der beiden Neutronen verloren hat, schätzt man den natürlichen Tritiumbestand auf nur etwa 3.5 kg. Es ist jedoch möglich, Tritium durch Neutronenbeschuss des Leichtmetalls Lithium künstlich herzustellen. Lithium ist ein häufiges und überall auf unserer Erde vorhandenes Leichtmetall. Man findet es z.B. in ganz gewöhnlichen Kieselsteinen.

Deuterium und Tritium sind die Brennstoffe eines Fusionskraftwerkes. Bringt man sehr wenig Deuterium und Tritium in einen genügend grossen Vakuumbehälter und heizt die Mischung auf ca. 100 Mio. Grad, so entsteht ein Plasma, das heisst die Atome haben ihre Elektronen verloren und sind deshalb elektrisch positiv geladen. So können wir sie in einem starken Magnetfeld zusammenhalten, ohne dass die Behälterwände berührt werden. Durch Kernfusion bilden sich jetzt aus je einem Deuterium- und einem Tritiumkern ein Heliumkern und ein elektrisch neutrales Neutron. Die bei dieser Reaktion entstandenen Endprodukte sind etwas leichter als die Ausgangsprodukte. Was geschieht mit der verlorenen Materie? Albert Einstein gab uns die Antwort mit der „Zauberformel“ $E = mc^2$. Die durch die Kernfusion verlorene Brennstoff-Masse zeigt sich nun in Form von nutzbarer Energie. Ein Teil dieser Energie erhitzt das neu entstandene Helium und damit auch das ganze Plasma, so dass die fürs Starten des Fusionsprozesses nötige Heizung ausgeschaltet werden kann. Ein grösserer Teil der freigesetzten Energie beschleunigt das einzelne Neutron. Die ungeladenen Neutronen verlassen den Plasmabehälter mit grosser Geschwindigkeit, werden einerseits für die Herstellung von neuem Tritium aus Lithium in der Wand des Plasmabehälters verwendet und andrerseits werden sie in geeignetem Material abgebremst und erhitzen dieses dabei stark. Dadurch erzeugter Wasserdampf kann auf altbekannte Art zum Betrieb einer Dampfturbine verwendet werden. Auf diese Weise soll in einigen Jahrzehnten aus wenig Deuterium und Tritium sehr viel elektrische Energie erzeugt werden können. Als Asche entsteht wertvolles nicht radioaktives Helium, welches in der Industrie gefragt ist.




**Brauchen wir die Kernfusion?**

Schon im Paradies konnten es Adam und Eva nicht lassen, vom Apfel zu essen. Die Neugierde war zu gross, um darauf zu verzichten. Auch als der Mensch das Feuer entdeckte, war er vielleicht verunsichert, ob dies für ihn und die Erde gut sei. Der Mensch hat ein Gehirn, das ihn nicht in Ruhe lässt. Er muss alles ausprobieren. Die Kernfusion eröffnet uns neue Dimensionen. Unser Leben wird dank solchen Entdeckungen und den daraus resultierenden Veränderungen interessanter, gleichzeitig wächst jedoch auch die Verantwortung für unsere Taten. Es gibt gute Gründe, „ja“ zu sagen zur Kernfusion.

Es sind nicht die zukünftigen Kernkraftwerke, die für uns eine Gefahr darstellen, wohl aber die mit den Wasserstoffbomben mögliche zerstörerische Wirkung der Kernfusion. Eine Wasserstoffbombe genügt, um eine Stadt wie London in Schutt und Asche zu legen. Leider war ihre Entwicklung sehr viel einfacher, als die der kontrollierten Kernfusion in Reaktoren. Das Arsenal von amerikanischen und russischen Nuklearwaffen ist noch immer unvorstellbar gross und der Overkill - das ist die Fähigkeit die ganze Menschheit mehrfach zu zerstören – hängt trotz den SALT-Abkommen wie ein Damoklesschwert über unseren Köpfen.

Unser heutiger Energieverbrauch ist riesig. Weltweit beträgt er jährlich 125'000'000'000'000 KWh (= 125 PetaWh). Das heisst durchschnittlich konsumiert ein Mensch rund um die Uhr eine Leistung von ca. 2'000 Watt, in der Schweiz ungefähr 5'000 Watt. Wollen wir die Zunahme des Weltenergieverbrauchs nur im Rahmen des Bevölkerungszuwachses zulassen, müssen wir, wie es unter anderen Bundesrat Moritz Leuenberger fordert, die Energie effizienter und sparsamer nutzen und uns schrittweise zur 2’000-Watt-Gesellschaft entwickeln. Nur so können wir den nicht zu verhindernden Mehrverbrauch in den heute wirtschaftlich noch zurückliegenden Ländern kompensieren. Im Moment nimmt der weltweite Energiekonsum ungebremst um ca. zwei Prozent im Jahr zu. Wer denkt, mit effizientem und sparsamem Energieverbrauch sei ein Rückgang der Energiebedürfnisse nicht nur in den reichen Ländern sondern sogar weltweit möglich, der träumt!

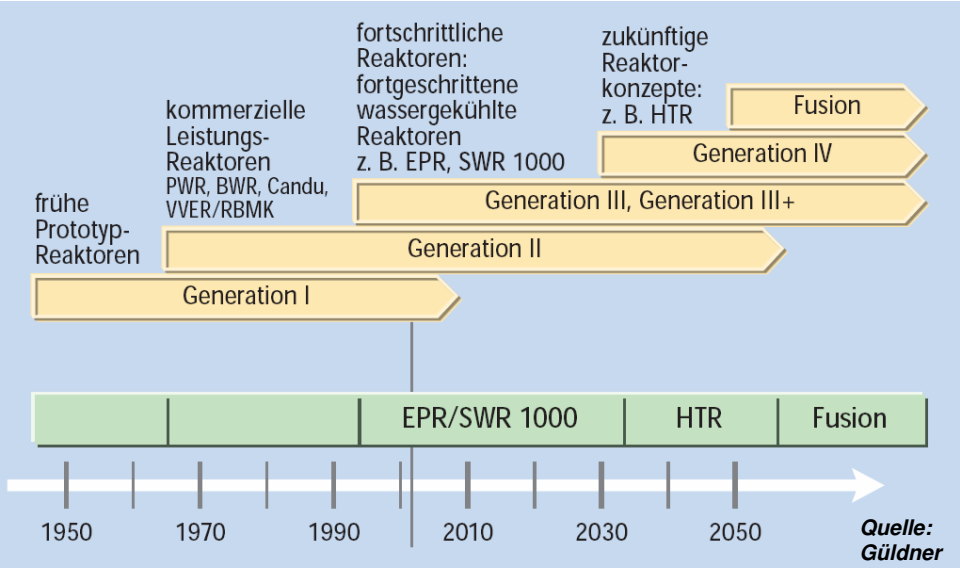

Benedikt Jorns benedikt.jorns@bluewin.ch

Fossile Brennstoffe decken zur Zeit 80 Prozent unserer Energieversorgung ab. Es ist sehr schwierig vorauszusagen, wie lange wir fossile Brennstoffe noch nutzen können. Sie werden nicht einfach eines Tages ausgehen. Vielmehr wird die Förderung immer aufwändiger und problematischer, bis sie sich schliesslich auf einem deutlich tieferen Niveau einpendelt. Fossile Quellen werden auch dann noch für die Herstellung von Kunststoffen, Farben, Klebestoffen, Medikamenten und vielen anderen Produkten geschätzt.

Die Biomasse, die Wasserkraft, die Photovoltaik, die Solarwärme, die Windkraft und andere erneuerbare Energien sind aus unserer zukünftigen Energieversorgung nicht wegzudenken. Die Kernfusion ist daneben die einzige unbeschränkt zur Verfügung stehende Energiequelle. Wir sind heute sehr weit davon entfernt, die fossilen Brennstoffe durch die hier aufgezählten Energieformen ersetzen zu können. Wahrscheinlich müssen wir dereinst für alle uns zur Verfügung stehenden Möglichkeiten bei der Energiebeschaffung froh sein.

Die von den Physikern schon vor Jahrzehnten vorausgesagte Klimaerwärmung als Folge unserer grossen Kohlendioxid-Produktion ist heute deutlich spürbar. Massnahmen gegen die beängstigende Zunahme der $CO_2$-Konzentration in unserer Atmosphäre sind dringend notwendig. Die effizientere Energienutzung, die Förderung der erneuerbaren Energieformen sowie der Bau von neuen Kernkraftwerken sind bestenfalls mittelfristig wirksam. Fast alle Bürger in unserem Land haben Vorschläge bereit, wie man den $CO_2$-Ausstoss reduzieren könnte. Doch wenn man sich die Mühe nimmt, grob auszurechnen, wie viel diese Vorschläge zur Problemlösung beitragen würden, ist man fast ausnahmslos enttäuscht von der nur kleinen Auswirkung auf die von uns produzierte Gesamtmenge Kohlendioxid. Ohne die Nutzung der Kernenergie – sei es heute die Kernspaltung oder später die Kernfusion – gelingt uns die $CO_2$-Reduktion auch mittelfristig nicht. Sie ist ebenso notwendig wie die Verbesserung der Energieeffizienz und die vermehrte Nutzung der erneuerbaren Energien.

**Die Weiterentwicklung der Kernkraftwerke bis hin zur Kernfusion**




Die in der Schweiz im Einsatz stehenden Reaktortypen werden der Generation II zugeordnet. Durch Nachrüstungen konnte man ihre Sicherheit anheben, doch entsprechen sie nicht mehr dem neusten Stand der Technik.

Das in Finnland im Bau stehende Kernkraftwerk erhält einen Reaktor des Typs EPR (europäischer Druckwasserreaktor) der Generation III+. Dieser erfüllt bereits sehr hohe Sicherheitsanforderungen. Die Wahrscheinlichkeit eines schweren Unfalls konnte nochmals verkleinert werden. Wenn's doch mal soweit kommen sollte: Bei einem Schmelzen des Brennstoffes kann dieser sofort in eine grosse Schale abgelassen und abgekühlt werden. Gemäss den Konstrukteuren wären auch im schlimmsten denkbaren Fall keine Evakuierungen in der Umgebung des Kraftwerks nötig. Zurzeit sind weltweit 30 neue Kernkraftwerke der Generation III in Bau (wirkliche Bauphase), weitere ca. 64 KKW befinden sich in einer fortgeschrittenen, eine grössere Zahl in einer frühen Planungsphase.

Etwa ab 2030 sollen Reaktoren der Generation IV einsetzbar sein, welche die Sicherheit, die Wirtschaftlichkeit und die Nutzung der Brennstoffe bei der Kernspaltung nochmals stark verbessern. Die radioaktiven Abfälle sollen zu einem grossen Teil wieder in den Brennstoffkreislauf zurückgeführt werden. Der mögliche Einsatz für die Bereitstellung von waffentauglichem Plutonium wird zudem unattraktiv gemacht. Der Strompreis dürfte nochmals deutlich sinken. Bis und mit den Reaktoren der Generation IV wird die Kernspaltung angewendet.

Der Prototyp eines Fusionsreaktors soll ca. 2035 ans Netz gehen. Den kommerziellen Einsatz erwartet man ab dem Jahr 2050. Es gibt bereits erste umfangreiche Studien, die den Strompreis bei

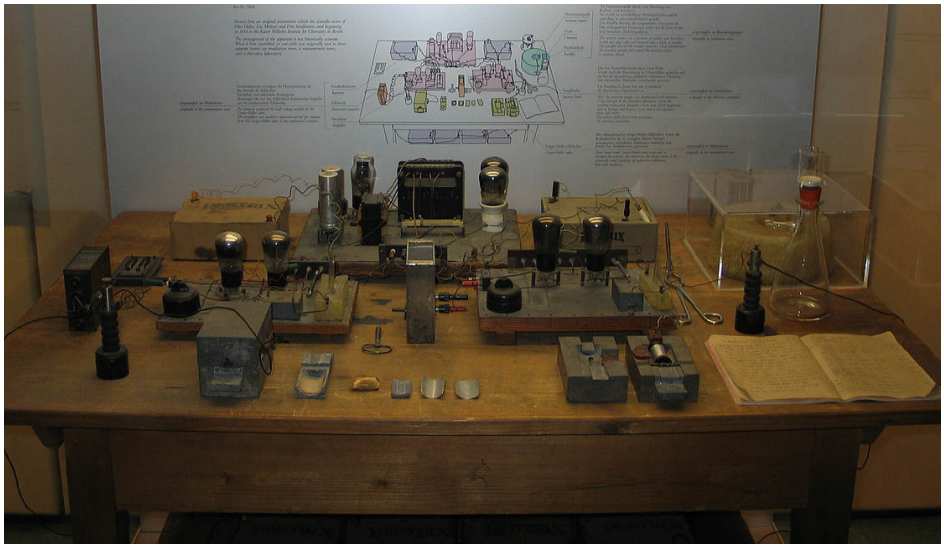
der Kernfusion abschätzen. Dabei wird davon ausgegangen, die zukünftigen kommerziellen Fusionsreaktoren seien gleich wie ITER gebaut. Die Berechnungen ergaben einen Strompreis im Bereich zwischen dem von heutigen Kernkraftwerken und einem Mix aus erneuerbaren Energiequellen. Dieser Preis wird voraussichtlich über dem von Kernkraftwerken der Generation IV liegen, so dass man davon ausgeht, dass die Kernfusion in ihrer ersten Zeit in Konkurrenz zur nach wie vor genutzten Kernspaltung stehen wird. Die Kernfusion hat jedoch das Potential, durch die Weiterentwicklung der Technik günstiger zu werden. Zudem hat sie deutliche Vorteile bei der Umweltverträglichkeit und im Gegensatz zur Kernspaltung steht unbeschränkt Brennstoff zur Verfügung.

**„Atomkraftwerk"-Gegner hat es gebraucht und es braucht sie auch in Zukunft!**

Die direkte Nutzung der Kernenergie auf der Erde ist bisher das Verrückteste, was dem Menschen in den Sinn kam. Erstmals hat er die nicht gerade erbauliche Möglichkeit, sich selbst und viel anderes Leben auf dieser Erde mit Nuklearwaffen auszurotten. Einstein sah zwar bei Hitler die Gefahr zu früh. Sein bekannter Brief an den amerikanischen Präsidenten führte zu den bisher einzigen Einsätzen von Nuklearbomben. Heute haben wir allen Grund, die Weiterführung der nuklearen Abrüstung zu fordern.

Die Kernenergie kann uns Menschen andrerseits in Zukunft vielleicht dabei helfen, drohende Gefahren aus dem Weltall abzuwehren. Man nimmt heute an, dass sich die Lebensbedingungen auf der Erde schon mehrmals nach Einschlägen von riesigen Meteoriten während einer gewissen Zeit drastisch verschlechterten. Verschiedene feststellbare Massensterben von Tieren sind eventuell so erklärbar. Die Ablenkung eines bedrohlich grossen auf uns zufliegenden Gesteinsbrockens durch eine nukleare Detonation wäre denkbar.

Doch die rasche Entwicklung der Nukleartechnik Mitte des letzten Jahrhunderts hat uns Menschen überfordert. Da war bei den einen der Glaube an die scheinbar unbeschränkten neuen Möglichkeiten und bei den anderen die berechtigte Angst vor den neuen Gefahren. Manchmal wurde derselbe Mensch von diesen Gefühlen hin und her gerissen. Prof. Hahn gelang 1938 im Labor die erste Kernspaltung. Sicher hatte er Freude, als er dafür den Nobelpreis bekam. 1945 nach der Zerstörung grosser Teile der beiden Städte Hiroshima und Nagasaky durch Nuklearbomben fühlte sich Hahn schuldig, die Grundlagen für die Entwicklung dieser grausamen Waffen geliefert zu haben und dachte daran, sich das Leben zu nehmen.



**Versuchsaufbau mit dem Otto Hahn, Lise Meitner und Fritz Strassmann 1938 die Kernspaltung entdeckten (Deutsches Museum, München)**

1954 nahm das erste Kernkraftwerk seinen Betrieb auf (Obninsk, Russland). 1969 wurde das erste Kernkraftwerk in der Schweiz produktiv (Beznau-I). Doch langsam wuchs der Widerstand gegen diese Art der Energiegewinnung in einigen westeuropäischen Ländern. Die Protestbewegung gegen die „Atomkraft" fand in der Schweiz ihren Höhepunkt 1975 mit der Besetzung des Projektgeländes von Kaiseraugst. Die Wirkung der Kernkraftwerkgegner auf die weitere Entwicklung kann aus heutiger Sicht besser abgeschätzt werden. Die drei geplanten Kernkraftwerke in Kaiseraugst, Graben und Rüti wurden nicht gebaut. Dafür importieren wir aus französischen Kernkraftwerken etwa in entsprechendem Umfang Elektrizität. Dabei fliesst nicht nur Strom zu uns sondern auch Geld nach Frankreich. Nicht verhindern konnten die Kernkraftwerkgegner die intensive Forschung im Bereich der Kernenergie. Selbst in Deutschland, das offiziell aus deren Nutzung aussteigen will, wird an verschiedenen Forschungszentren wie in Jülich und im Max-Planck-Institut die Weiterentwicklung der Reaktortechnik an vorderster Front betrieben. Insbesondere

im Bereich der Kernfusion gehört Deutschland zu den weltweit führenden Nationen. Die Kernkraftwerkgegner haben jedoch nicht nur Vorhaben verhindert oder versucht, sie zu verhindern, sie sind auch engagierte Förderer der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz. Wahrscheinlich wäre ohne sie die Nutzung der Wind- und Solarenergie nicht soweit fortgeschritten. Es werden Minergie-Häuser gebaut und Apparate mit weniger Stromverbrauch propagiert. Auch die Entwickler und die Nutzer der Nuklear-Technologie sind gefordert. Bestehende Kernkraftwerke wurden nachträglich mit zusätzlichen Sicherheitsausrüstungen versehen. Genau definierte Sicherheitskriterien müssen erfüllt sein, damit ein neuer Kernkraftwerk-Typ einer höher bewerteten Generation zugeteilt werden kann. Die Verbreitung von Nuklearwaffen durch die friedliche Nutzung der Kernenergie (= Proliferation) wird dank dem Atomsperrvertrag verhindert und durch die Internationale Energie-Agentur (IEA) nach deren Vorgaben kontrolliert.

**Wollen wir in der Schweiz die Kernenergie weiterhin nutzen?**

Falls das Projekt ITER tatsächlich ein Erfolg sein wird, ist anzunehmen, dass die Kernfusion ab ca. 2050 auch in der Schweiz einen wichtigen Beitrag zur Grundversorgung leisten wird. Nur ein verschwindend kleiner Teil unserer Bevölkerung weiss, dass die Nutzung der Kernenergie sich zurzeit grundlegend weiterentwickelt. Es ist absurd, dieser keine langfristige Zukunft zu geben, weil Uran nur begrenzt vorhanden sei. Die Nutzung der Kernenergie ist auch mit anderen Brennstoffen möglich, welche zum Teil in beliebiger Menge vorhanden sind. Das Risiko für Ereignisse wie in Tschernobyl und deren maximal mögliche Wirkung nimmt bei den zukünftigen Kernkraftwerken der Generationen III und IV stark ab. Bei Reaktoren mit Kernfusion ist eine Kernschmelzung nicht möglich. Die Radioaktivität wird zwar auch bei zukünftigen Kernkraftwerken ein ständiger Begleiter sein, doch werden die zu lagernden Materialien wesentlich kleinere und weniger langfristige Probleme verursachen, als dies heute der Fall ist. Insbesondere die anfallende Asche wird nicht mehr radioaktiv sein.

Viele Leute sind der Meinung, die Solar- und die Windenergie so wie die Nutzung der Erdwärme könnten in ferner Zukunft die fossilen Brennstoffe vollständig ersetzen. Realistisch gesehen, sind wir davon sehr weit entfernt. Im Moment decken diese Energieformen weniger als ein Prozent des Weltenergiebedarfs.

Ob wir in der Schweiz Kernkraftwerke der Generationen III und IV bauen werden, ist völlig offen. In unserer direkten Demokratie werden Volksabstimmungen darüber entscheiden. In etwa 15 Jahren haben unsere ersten Kernkraftwerke ihre maximale Lebensdauer erreicht. Gleichzeitig beginnen die Stromlieferungsverträge mit Frankreich auszulaufen. Es existieren bereits Pläne für Gaskombikraftwerke, solche für neue Kernkraftwerke werden bald folgen. Zielkonflikte sind offensichtlich: Während die einen uns überzeugen wollen, dass dank verbesserter Energieeffizienz und erneuerbaren Energien „keine Stromlöcher sondern nur Löcher in unseren Köpfen existieren“ und andere vor einem zusätzlichen $CO_2$-Ausstoss durch Gaskombikraftwerke warnen, erinnern sich die dritten an die „Aktion Kaiseraugst“, und die Elektrizitätsgesellschaften haben die Aufgabe, Strompannen zu vermeiden. Je länger wir über dieses Thema streiten, umso klarer drängt sich die am schnellsten zu realisierende Lösung auf: Gaskombikraftwerke sind „ab Stange“ erhältlich und die notwendigen Bauten sind innert wenigen Jahren erstellt.

Der Bundesrat will die Energieeffizienz und die erneuerbaren Energien fördern sowie die Kernkraftwerke ersetzen. Falls nötig können als Übergangslösung Gaskombikraftwerke gebaut werden, doch ist deren grosser $CO_2$-Ausstoss gemäss Kyoto-Protokoll zu kompensieren. Dies ist nur durch Zahlungen an Staaten mit freien $CO_2$-Kontingenten möglich. Russland und die Ukraine besitzen z.B. als Folge des seit 1990 erfolgten Zusammenbruchs der Schwerindustrie genügend solche $CO_2$-Kontingente. (Präsident Putin hatte allen Grund, durch seine nachträglich erfolgte Unterschrift das Kyoto-Protokoll rechtskräftig zu machen.) Die Argumente von Bundesrat Moritz Leuenberger, warum bei uns frühestens in 30 Jahren ein neues Kernkraftwerk ans Netz gehen könne, sind nicht einleuchtend. Die Planung, das Bewilligungsverfahren und der Bau dauern in Finnland insgesamt nur 11 Jahre.

In einer im ETH Globe Nr. 1 (Feb. 07) wiedergegebenen Diskussion sagt Prof. Prasser: „Nur wenn Kernenergie, regenerative (= erneuerbare) Quellen und effizienter Energieeinsatz gemeinsam eingesetzt werden, gibt es überhaupt eine Chance, die $CO_2$-Emissionen wirksam zu senken.“


Benedikt Jorns benedikt.jorns@bluewin.ch