

Kohle, Gas, Öl, Kernenergie? – Teil 2

Das Mengenproblem

Zumindest solange die Weltbevölkerung noch weiter wächst, wird der Energieverbrauch weiter steigen müssen. Er wird sogar überproportional steigen, da Wohlstand und Energieverbrauch untrennbar miteinander verknüpft sind. All das Geschwafel von "Energieeffizienz" ist nur ein anderes Wort für Wohlstandsverzicht und schlimmer noch, für eine neue Form des Kolonialismus. Woher nimmt z. B. ein "Gutmensch" in Deutschland das Recht, Milliarden von Menschen das Leben vor enthalten zu wollen, das er für sich selbst beansprucht? Das wird nicht funktionieren. Nicht nur China, läßt sich das nicht mehr gefallen.

Wenn aber der Energieeinsatz mit steigendem (weltweiten) Wohlstand immer weiter steigen muß, welche Energieträger kommen in Frage? Die additiven Energien Wind, Sonne etc. werden immer solche bleiben. Dies liegt an ihrer geringen Energiedichte und den daraus resultierenden Kosten und ihrer Zufälligkeit. Die fossilen Energieträger Kohle, Öl und Erdgas reichen zwar für (mindestens) Jahrhunderte, führen aber zu weiter steigenden Kosten. Will man z. B. noch größere Mengen Kohle umweltverträglich fördern, transportieren und verbrennen, explodieren die Stromerzeugungskosten weltweit. Dies ist aber nichts anderes als Wohlstandsverlust. Man kann nun mal jeden Dollar, Euro oder Renminbi nur einmal ausgeben!

Um es noch einmal deutlich zu sagen, das Problem ist nicht ein baldiges Versiegen der fossilen Energieträger, sondern die überproportional steigenden Kosten. Je mehr verbraucht werden, um so mehr steigt z. B. die Belastung der Umwelt. Dem kann aber nur durch einen immer weiter steigenden Kapitaleinsatz entgegen gewirkt werden. Ab einer gewissen Luftverschmutzung war einfach der Übergang vom einfachen Kohleofen auf die geregelte Zentralheizung, vom einfachen "VW-Käfer" auf den Motor mit Katalysator, vom "hohen Schornstein" auf die Rauchgaswäsche nötig... Jedes mal verbunden mit einem Sprung bei den Investitionskosten.

Der Übergang zur Kernspaltung

Bei jeder Kernspaltung – egal ob Uran, Thorium oder sonstige Aktinoide – wird eine unvergleichbar größere Energiemenge als bei der Verbrennung frei: Durch die Spaltung von einem einzigen Gramm Uran werden 22.800 kWh Energie erzeugt. Die gleiche Menge, wie bei der Verbrennung von drei Tonnen Steinkohle, 13 barrel Öl oder rund 2200 Kubikmeter Erdgas.

Man kann gar nicht oft genug auf dieses Verhältnis hinweisen. Auch jedem technischen Laien erschließt sich damit sofort der qualitative Sprung für den Umweltschutz. Jeder, der schon mal mit Kohle geheizt hat, weiß wieviel Asche 60 Zentner Kohle hinterlassen oder wie lange es dauert, bis 2000 Liter Heizöl durch den Schornstein gerauscht sind und welche Abgasfahne

sie dabei hinterlassen haben. Wer nun gleich wieder an "Strahlengefahr" denkt, möge mal einen Augenblick nachdenken, wie viele Menschen wohl momentan in Atom-U-Booten in den Weltmeeren unterwegs sind. So schlimm kann die Sache wohl nicht sein, wenn man monatelang unmittelbar neben einem Reaktor arbeiten, schlafen und essen kann, ohne einen Schaden zu erleiden. Der größte Teil der "Atomstromverbraucher" wird in seinem ganzen Leben nie einem Reaktor so nahe kommen.

Die nahezu unerschöpflichen Uranvorräte

Allein in den Weltmeeren – also prinzipiell für alle frei zugänglich – sind über 4 Milliarden to Uran gelöst. Jedes Jahr werden etwa 32.000 to durch die Flüsse ins Meer getragen. Dies ist ein nahezu unerschöpflicher Vorrat, da es sich um einen Gleichgewichtszustand handelt: Kommt neues Uran hinzu, wird es irgendwo ausgefällt. Würde man Uran entnehmen, löst es sich wieder auf. Bis man sich diesen kostspieligeren – weil in geringer Konzentration vorliegenden – Vorräten zuwenden muß, ist es noch sehr lange hin. Alle zwei Jahre erscheint von der OECD das sog. "Red book", in dem die Uranvorräte nach ihren Förderkosten sortiert aufgelistet sind. Die Vorräte mit aktuell geringeren Förderkosten als 130 USD pro kg Uranmetall, werden mit 5.902.900 Tonnen angegeben. Allein dieser Vorrat reicht für 100 Jahre, wenn man von der weltweiten Förderung des Jahres 2013 ausgeht.

Der Uranverbrauch

Die Frage, wieviel Uran man fördern muß, ist gar nicht so einfach zu beantworten. Sie hängt wesentlich von folgenden Faktoren ab:

- Wieviel Kernkraftwerke sind in Betrieb,
- welche Reaktortypen werden eingesetzt,
- welche Anreicherungsverfahren zu welchen Betriebskosten und
- wieviel wird wieder aufbereitet?

Im Jahre 2012 waren weltweit 437 kommerzielle Kernreaktoren mit 372 GWel in Betrieb, die rund 61.980 to Natururan nachgefragt haben. Die Frage wieviel Reaktoren in der Zukunft in Betrieb sind, ist schon weitaus schwieriger zu beantworten. Im "Red book" geht man von 400 bis 680 GWel im Jahre 2035 aus, für die man den Bedarf mit 72.000 bis 122.000 to Natururan jährlich abschätzt. Hier ist auch eine Menge Politik im Spiel: Wann fährt Japan wieder seine Reaktoren hoch, wie schnell geht der Ausbau in China voran, wie entwickelt sich die Weltkonjunktur?

Der Bedarf an Natururan hängt stark von den eingesetzten Reaktortypen ab. Eine selbsterhaltende Kettenreaktion kann man nur über 235-U einleiten. Dies ist aber nur zu 0,7211% im Natururan enthalten. Je nach Reaktortyp, Betriebszustand usw. ist ein weit höherer Anteil nötig. Bei

Schwerwasserreaktoren kommt man fast mit Natururan aus, bei den überwiegenden Leichtwasserreaktoren mit Anreicherungen um 3 bis 4 %. Über die gesamte Flotte und Lebensdauer gemittelt, geht man von einem Verbrauch von rechnerisch 163 to Natururan für jedes GWel pro Kalenderjahr aus.

Das Geheimnis der Anreicherung

Diese Zahl ist aber durchaus nicht in Stein gemeißelt. Isotopentrennung ist ein aufwendiges Verfahren. Standardverfahren ist heute die Zentrifuge: Ein gasförmiger Uranstrom wird durch eine sehr schnell drehende Zentrifuge geleitet. Durch den – wenn auch sehr geringen – Dichteunterschied zwischen 235-U und 238-U wird die Konzentration von 235-U im Zentrum etwas höher. Um Konzentrationen, wie sie für Leichtwasserreaktoren benötigt werden, zu erhalten, muß man diesen Schritt viele male in Kaskaden wiederholen. So, wie sich in dem Produktstrom der Anteil von 235-U erhöht hat, hat er sich natürlich im "Abfallstrom" entsprechend verringert. Das "tails assay", das ist das abgereicherte Uran, das die Anlage verläßt, hat heute üblicherweise einen Restgehalt von 0,25% 235-U. Leider steigt der Aufwand mit abnehmendem Restgehalt überproportional an. Verringert man die Abreicherung von 0,3% auf 0,25%, so sinkt der notwendige Einsatz an Natururan um 9,5%, aber der Aufwand steigt um 11%. Eine Anreicherungsanlage ist somit flexibel einsetzbar: Ist der aktuelle Preis für Natururan gering, wird weniger abgereichert; ist die Nachfrage nach Brennstoff gering, wie z. B. im Jahr nach Fukushima, kann auch die Abreicherung erhöht werden (ohnehin hohe Fixkosten der Anlage). Hier tut sich eine weitere Quelle für Natururan auf. Inzwischen gibt es einen Berg von über 1,6 Millionen to abgereicherten Urans mit einem jährlichen Wachstum von etwa 60.000 to. Durch eine "Wiederanreicherung" könnte man fast 500.000 to "Natururan" erzeugen. Beispielsweise ergeben 1,6 Millionen to mit einem Restgehalt von 0,3% 235-U etwa 420.000 to künstlich hergestelltes "Natururan" und einen neuen "Abfallstrom" von 1.080.000 to tails assay mit 0,14% 235-U. Man sieht also, der Begriff "Abfall" ist in der Kerntechnik mit Vorsicht zu gebrauchen. Die Wieder-Anreicherung ist jedenfalls kein Gedankenspiel. In USA ist bereits ein Projekt (DOE und Bonneville Power Administration) angelaufen und es gibt eine Kooperation zwischen Frankreich und Rußland. Besonders vielversprechend erscheint auch die Planung einer Silex-Anlage (Laser Verfahren, entwickelt von GE und Hitachi) zu diesem Zweck auf dem Gelände der stillgelegten Paducah Gasdiffusion. Die Genehmigung ist vom DOE erteilt. Letztendlich wird – wie immer – der Preis für Natururan entscheidend sein.

Wann geht es mit der Wiederaufbereitung los?

Wenn ein Brennelement "abgebrannt" ist, ist das darin enthaltene Material noch lange nicht vollständig gespalten. Das Brennelement ist lediglich – aus einer Reihe von verschiedenen Gründen – nicht mehr für den Reaktorbetrieb geeignet. Ein anschauliches Maß ist der sogenannte Abbrand, angegeben in MWd/to Schwermetall. Typischer Wert für Leichtwasserreaktoren ist ein Abbrand

von 50.000 bis 60.000 MWd/to. Da ziemlich genau ein Gramm Uran gespalten werden muß, um 24 Stunden lang eine Leistung von einem Megawatt zu erzeugen, kann man diese Angabe auch mit 50 bis 60 kg pro Tonne Uran übersetzen. Oder anders ausgedrückt, von jeder ursprünglich im Reaktor eingesetzten Tonne Uran sind noch 940 bis 950 kg Schwermetall übrig.

Hier setzt die Wiederaufbereitung an: In dem klassischen Purex-Verfahren löst man den Brennstoff in Salpetersäure auf und scheidet das enthaltene Uran und Plutonium in möglichst reiner Form ab. Alles andere ist bei diesem Verfahren Abfall, der in Deutschland in einem geologischen "Endlager" (z. B. Gorleben) für ewig eingelagert werden sollte. Interessanterweise wird während des Reaktorbetriebs nicht nur Uran gespalten, sondern auch kontinuierlich Plutonium erzeugt. Heutige Leichtwasserreaktoren haben einen Konversionsfaktor von etwa 0,6. Das bedeutet, bei der Spaltung von 10 Kernen werden gleichzeitig 6 Kerne Plutonium "erbrütet". Da ein Reaktor nicht sonderlich zwischen Uran und Plutonium unterscheidet, hat das "abgebrannte Uran" immer noch einen etwas höheren Gehalt (rund 0,9%) an ²³⁵-U als Natururan. Könnte also sogar unmittelbar in mit schwerem Wasser moderierten Reaktoren eingesetzt werden (DUPIC-Konzept der Koreaner). Das rund eine Prozent des erbrüteten Plutonium kann man entweder sammeln für später zu bauende Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum oder zu sogenannten Mischoxid-Brennelementen (MOX-Brennelement) verarbeiten. Im Jahr 2012 wurden in Europa 10.334 kg Plutonium zu MOX-Brennelementen verarbeitet. Dies hat rund 897 to Natururan eingespart.

Man kann also grob sagen, durch 1 kg Plutonium lassen sich rund 90 kg Natururan einsparen. Setzt man den Preis für Natururan mit 100 USD (entspricht ungefähr dem derzeitigen Euratom-Preis) an, so ergibt diese einfache Abschätzung Kosten von höchstens 9.000 USD pro kg Plutonium bzw. 900 USD für eine Tonne abgebrannter Brennelemente. Dies ist – zugegebenermaßen mit einem dicken Daumen gerechnet – doch eine brauchbare Einschätzung der Situation. Es wird noch eine ganze Zeit dauern, bis die Wiederaufbereitung in großem Stil wirtschaftlich wird.

Wegen der hohen Energiedichte sind die Lagerkosten in einem Trockenlager sehr gering. Außerdem hat "Atommüll" – im Gegensatz z. B. zu Quecksilber oder Asbest – die nette Eigenschaft, beständig "weniger gefährlich" zu werden. Die Strahlung ist aber der Kostentreiber beim Betrieb einer Wiederaufbereitungsanlage (Abschirmung, Arbeitsschutz, Zersetzung der Lösungsmittel etc.). Je länger die Brennelemente abgelagert sind, desto kostengünstiger wird die Wiederaufbereitung.

Erdgas- oder Kernkraftwerke?

Kraftwerke mit Gasturbinen und Abhitzekeßeln erfordern die geringsten Investitionskosten. Sie sind deshalb der Liebling aller kurzfristigen Investoren. Ihre guten Wirkungsgrade in der Grundlast (!!) von fast 60% werden gern als Umweltschutz ausgegeben, sind jedoch wegen der hohen Erdgaspreise (in Deutschland) eher zwingend notwendig.

Auch hier, kann eine einfache Abschätzung weiterhelfen: Geht man von den 163 to Natururan pro GWaer aus (siehe oben), die ein Leichtwasserreaktor "statistisch" verbraucht und einem Preis von 130 USD pro kg Natururan (siehe oben), so dürfte das Erdgas für das gleichwertige Kombikraftwerk nur 0,51 USD

pro MMBtu kosten! Im letzten Jahr schwankte der Börsenpreis aber zwischen 3,38 und 6,48 USD/MMBtu. Dies ist die Antwort, warum sowohl in den USA, wie auch in den Vereinigten Emiraten Kernkraftwerke im Bau sind und Großbritannien wieder verstärkt auf Kernenergie setzt. Ganz nebenbei: Die Emirate haben 4 Blöcke mit je 1400 MWel für 20 Milliarden USD von Korea gekauft. Bisher ist von Kosten- oder Terminüberschreitungen nichts bekannt.

Vorläufiges Schlusswort

Das alles bezog sich ausdrücklich nicht auf Thorium, "Schnelle Brüter" etc., sondern auf das, was man auf den internationalen Märkten sofort kaufen könnte. Wenn man denn wollte: Frankreich hat es schon vor Jahrzehnten vorgemacht, wie man innerhalb einer Dekade, eine preiswerte und zukunftssträchtige Stromversorgung aufbauen kann. China scheint diesem Vorbild zu folgen.

Natürlich ist es schön, auf jedem Autosalon die Prototypen zu bestaunen. Man darf nur nicht vergessen, daß diese durch die Erträge des Autohändlers um die Ecke finanziert werden. Die ewige Forderung, mit dem Kauf eines Autos zu warten, bis die "besseren Modelle" auf dem Markt sind, macht einen notgedrungen zum Fußgänger.

Der Beitrag wurde übernommen von [Nukeklaus hier](#)