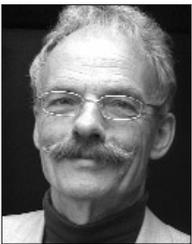


# Atomstrom ist keine Lösung für Klimaprobleme und Energieknappheit

**Fossile Energiesysteme, auch Atomenergie, haben ihre Blütezeit hinter sich; sie sind längst überholt. Erneuerbare Energiequellen dagegen sind unerschöpflich. Die Technologie, die es braucht, um erneuerbare Energiequellen zu nutzen, ist erprobt und wartet nur darauf, im grossen Stil angewendet zu werden. Wir brauchen keine Atomenergie. Im Augenblick gibt es nicht eine Energiekrise, sondern eine Paradigmen-Krise.**



Von Jan Willem Storm van Leeuwen, Ceedata Consulting, Holland storm@ceedata.nl

Eine umfassende Energie-Analyse des Nuklear-Systems zeigt, dass die Atomenergie weder das Problem der globalen Erwärmung noch das Problem zukünftiger Energieengpässe zu lösen vermag.

## Das Nuklear-System

Ein Atomkraftwerk kommt nie allein: Ein grosser Komplex von in der Regel üblichen industriellen Prozessen ist nötig, um die Atomenergie aus dem

Uran in der Erdkruste zu befreien und sie in eine nutzbare Form, in der Regel elektrische Energie, umzuwandeln. Dieser Komplex heisst Nuklear-System oder nukleare Prozess-Kette und kann in drei Teile zerlegt werden:

- 1) Umwandlung des aus der Erdkruste gewonnen Uranerzes in Brennelemente für den Atomreaktor.
- 2) Bau des eigentlichen Atomkraftwerks; Unterhalt und Betrieb des AKW während seiner Betriebszeit.
- 3) Handhabung des radioaktiven Abfalls, Ausserbetriebnahme und Rückbau des (radioaktiven) Atomreaktors und «Endlagerung» des Atommülls.

Jeder dieser drei Teile umfasst diverse industrielle Prozesse. Jeder Prozess benötigt elektrische Energie, fossile Treibstoffe, Materialien und Chemikalien und emittiert Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Der Atomreaktor selber ist in Tat und Wahrheit das einzige Glied in der Prozesskette, das kein Kohlendioxid freisetzt.

Jan Willem Storm van Leeuwen (Magister der (Natur-)Wissenschaften, Physikalische Chemie, Technische Universität Eindhoven) ist beratender Wissenschaftler bei der Consulting-Firma Ceedata. Zudem arbeitet er für die Offene Universität Heerlen, für die er Ausbildungslehrgänge für Chemie-Lehrpersonen entwickelt.

Storm van Leeuwen ist Sekretär der holländischen Vereinigung des Club of Rome. Die Hauptgebiete seiner Arbeit als Experte sind Risiko-Analyse und Lebens-Zyklus-Analysen von Energiesystemen, wobei er sich auf Aspekte der Nachhaltigkeit konzentriert. Typisch für seine Beratungsarbeit ist, dass er komplexe Systeme durchschaubar und wesentliche Daten für Entscheidungsträger und Politiker zugänglich macht. Seit den Achtzigerjahren befasst er sich mit Nukleartechnik.

## Emission von Treibhausgasen durch das Nuklear-System

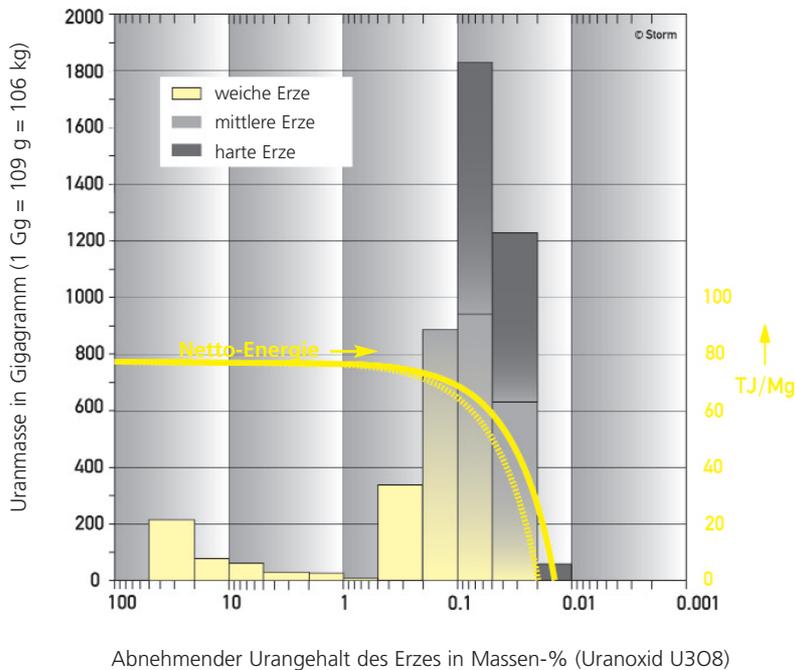
In unserer Studie haben wir die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Nuklear-Systems untersucht. Über die Emission von anderen Treibhausgasen, insbesondere FCKW (Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe), die ganz bestimmt und erst noch in beträchtlichem Umfang, auch vorkommt, sind keine Angaben verfügbar. Die Atomindustrie sollte es sich zur dringenden Aufgabe machen, diese Treibhausgas-Emissionen zu untersuchen und zu publizieren, statt unbezogen zu behaupten, die Atomenergie sei frei von solchen Emissionen. Wenn keine Daten existieren, so heisst das nicht, dass es keine Emissionen gibt!

Auf Grund unserer Untersuchung verursacht ein heutiges Nuklear-System etwa 90–140 g CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde. Die offiziellen Nuklear-Institute zitieren viel tiefere Emissionswerte: 3–40 g CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Kilowattstunde, *inklusive* andere Treibhausgase. Diese Angaben beruhen auf unveröffentlichten und darum nicht überprüfbaren Daten. Offensichtlich stützen sich die offiziellen Werte auf oberflächliche und unvollständige Analysen. Nur schon der Bau eines Atomkraftwerks trägt mit mindestens 14 g CO<sub>2</sub>/kWh zur über die gesamte Lebensdauer gemittelten Emissionsrate bei.

Wir weisen darauf hin, dass die offiziellen Institute, von denen die Behörden und die politischen Verantwortungsträger beraten werden, wie zum Beispiel die Internationale Atomenergie-Agentur (IAEA), die Nuklear-Energie-Agentur (NEA), die weltweite Nuklear-Vereinigung (World Nuclear Association, WNA) oder das Nuklear-Energie-Institut (NEI), ausdrücklich «Interessenvertretungen» und nicht zwangsläufig unabhängige Forschungsinstitute sind.

## Anteil der Atomenergie am weltweiten Energiebedarf

Im Jahre 2005 produzierten alle Atomkraftwerke weltweit insgesamt etwa 10 Exajoule (2,8 Millionen GWh) elektrische Energie. Das sind etwa 15% der weltweiten Erzeugung (100%= 66 EJ, 1 Exajoule = 10<sup>18</sup> Joule) an elektrischer Energie im 2005. Gesamthaft wurden der Erdbevölkerung etwa 455 EJ Energie zur Verfügung gestellt, inklusive «traditionelle Biomasse» (Holz, Mist,



## Die Energieklippe

**Abbildung 1:** Dieses komplizierte Diagramm stellt mehrere Resultate der Studie gleichzeitig dar.

Das Balkendiagramm stellt die Beträge der weltweit bekannten ausbeutbaren Uranvorkommen und die Verteilung ihres Gehaltes dar. Gesamthaft sind in diesem Diagramm 4,743 Teragramm (1 Tg = 10<sup>12</sup> g = 109 kg) Uran dargestellt. Das sind 4,743 Millionen Tonnen, gestützt auf die offiziellen Statistiken über die weltweiten Uranvorkommen der IAEA (Internationale Atomenergie-Agentur) und der NEA (Nuklear-Energie-Agentur).

Bitte beachten Sie, dass die waagrechte Achse logarithmisch und die senkrechte Achse linear ist. Die Uranmenge, die als Vorrat von einem bestimmten Gehalt verfügbar ist, wird durch die Höhe (nicht durch die Fläche) des Balkens dargestellt. Die Breite der Balken stellt nur die (Streu-)Breite der Urangehalte dar. Die grüne Kurve stellt die Netto-Energieproduktion des Nuklear-Systems in Abhängigkeit vom Urangehalt des Erzes dar. Die gestrichelte grüne Linie stellt weiche Erze dar, die durchgezogene grüne Linie harte Erze.

Bei hohem Gehalt nimmt die Netto-Energie langsam ab, aber unterhalb eines Gehalts von 0,05% fällt die Kurve rasant auf Null ab: die «Energieklippe»!

Stroh). Der Atomenergie-Anteil macht also gerade mal 2,2% des weltweiten Energiebedarfs aus. [1]

## Gewinnung von Uran

Uran findet man in der Natur in Form von vielen chemischen Verbindungen (Mineralien), die in unterschiedlichste Felsarten eingebettet sind. [2] Um das Potenzial der Atomenergie in Bezug auf Energieversorgung und Klimabeeinflussung beurteilen zu können, muss man die physikalisch-chemischen Eigenschaften der uranhaltigen Vorkommen genauer betrachten.

Der Urangehalt der Gesteine variiert sehr stark. Die reichsten Erze enthalten etwa 20% Uran, das heisst 200g Uran pro Kilogramm Gestein (200g U/kg). Im Moment ist der weltweite Mittelwert etwa 1g U/kg. Die schwächsten noch ausgebeuteten Erze enthalten bloss 0,1g U/kg. Gewöhnlicher Granit enthält etwa 0,004g U/kg. Je höher der Gehalt eines Vorkommens, umso seltener bzw. weniger mächtig ist das Vorkommen; das ist ein bekanntes Phänomen bei Mineralien in der Erdkruste. Die Verteilung von Uran in den bekannten Vorkommen der Erdkruste ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Gewinnung von Uran aus der Erdkruste erfordert eine ganze Abfolge von physikalischen und chemischen Prozessen. Jeder dieser Prozesse erfordert Energie- und Materialzufuhr und braucht technische Vorrichtungen: Je geringer der Urangehalt des Erzes, umso grösser sind diese Aufwendungen. Um 1 kg Uran aus einem Erz mit einem Gehalt von 1% zu gewinnen, müssen 100 kg Gestein verarbeitet werden. Wenn der Gehalt zehnmal kleiner ist, müssen für 1 kg Uran bereits 1000 kg Erz verarbeitet werden. Damit wird auch der Energieaufwand pro Kilogramm Uran zehnmal grösser.

Die Extraktion von Uran aus dem Wirtsgestein ist ein komplizierter chemischer Prozess. Der Aufwand an Energie und Chemikalien hängt in erster Linie von der Anreicherung des Erzes, in zweiter Linie aber auch von

den geochemischen Eigenschaften des Felsmaterials ab. Zudem wird die Extraktion umso schwieriger, je geringer der Urangehalt des Erzes ist. Schwieriger bedeutet wiederum mehr Energie und mehr Chemikalien pro Kilogramm Uran. [3]

## Die Energieklippe

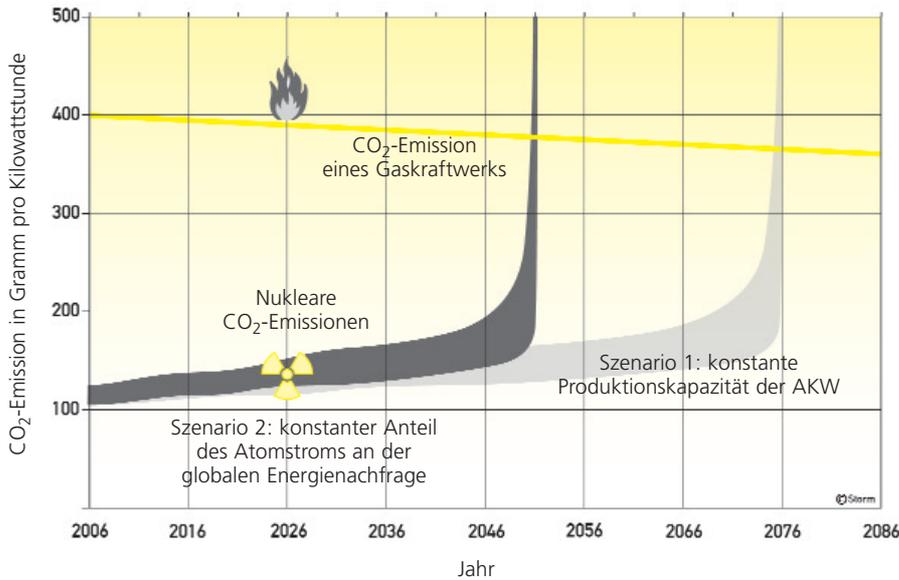
Die Menge an Energie, die aus 1 kg Natururan mit der natürlich vorhandenen Isotopen-Zusammensetzung gewonnen werden kann, hat im Wesentlichen einen festen Wert. Die Energie, die gebraucht wird, um das Uran aus dem Gestein zu isolieren, wächst mit sinkendem Urangehalt des Wirtsgesteins. Ab einem bestimmten Minimalgehalt ist der Energieaufwand gleich gross wie der Energiegewinn. Verwendet man Erz mit diesem kritischen Urangehalt, so liefert das Nuklearsystem netto keine Energie. Der Zusammenhang zwischen Netto-Energieproduktion und Gehalt des Uranerzes ergibt die «Energieklippe» und ist in Abbildung 1 dargestellt.

## Uranvorräte

Die potenzielle Grösse und Lebensdauer des weltweiten Parks an Atomkraftwerken ist begrenzt durch die Verfügbarkeit von Uranvorräten mit «Netto-Energiegehalt». Jetzt kommen wir an den entscheidenden Punkt.

Wie Abbildung 1 zeigt, sind die grössten Uranvorräte in Gesteinen enthalten mit besonders geringen Urankonzentrationen; das ist ein bekanntes Phänomen bei Metallerzen. [4]

Wir unterscheiden zwischen «weichen» und «harten» Uranerzen; letztere heissen so, weil sie schwerer abzubauen und zu mahlen sind. Dabei konsumieren sie mehr Energie und mehr Material als «weiche» Erze. Erze mit geringem Urangehalt sind tendenziell «hart». In Abbildung 1 wurde das Diagramm mit der «Energieklippe» auf eine Grafik projiziert, welche die globalen Vorräte



### Die CO<sub>2</sub>-Emissionen von AKWs im Verlauf der Zeit

**Abbildung 2:** Die Emissionsrate von Kohlendioxid der Atomkraftwerke steigt innerhalb der nächsten Jahrzehnte, weil der Urangehalt der Erze abnimmt. Die haltvollsten und am leichtesten abbaubaren Vorräte werden zuerst abgebaut, weil sie die grössten Profite bringen. Der grüne Bereich stellt die Unsicherheit bei den Prognosen dar. Diese rührt einerseits von individuellen Unterschieden zwischen den Minen und andererseits von der unsicheren Datenlage her. Als Folge einiger optimistischer Annahmen in der Analyse ist die obere Grenze plausibler als die untere.

an ausbeutbarem Uran darstellt. Dabei zeigt sich, dass die grössten bekannten Vorkommen am nächsten zur «Energieklippe» liegen. Nicht die Menge an Uran in der Erdkruste bestimmt das globale Potenzial an spaltbarem Material, sondern die Qualität der Vorkommen, aus denen das Uran gewonnen wird.

### Erschöpfung der Uranvorräte

Um einen Anhaltspunkt zur Beurteilung des zukünftigen Potenzials der Atomenergie zu bekommen, wurden zwei einfache Szenarien verwendet:

**Szenario 1:** Die weltweite Kapazität der Atomkraftwerke bleibt konstant auf dem gegenwärtigen Niveau von 370 GW(e=elektrisch). Dabei sinkt der Beitrag des Atomstroms zum weltweiten Energiebedarf bis zum Jahr 2050 unter 1%, während die globale Energienachfrage jährlich um 2 bis 3% steigt.

**Szenario 2:** Der Anteil des Atomstroms am globalen Energiebedarf bleibt konstant beim heutigen Wert von 2,2%. Die Kapazität der Atomkraftwerke muss weltweit um 2 bis 3 % (also um 7,5 bis 10 GW(e)) pro Jahr steigen, um mit dem wachsenden Energiebedarf Schritt zu halten. Dieses Szenario entspricht dem Szenario «hoch» der IAEA im Jahr 2005.

In beiden Szenarien gehen wir davon aus, dass die Uranerze mit der besten Qualität als erste abgebaut werden, weil das für die Bergbaugesellschaften den grössten Gewinn abwirft. Das dürfte eine allgemein akzeptierte Annahme sein. Als Folge davon sinkt der durchschnittliche Urangehalt der verbleibenden Uranerz-Vorräte im Lauf der Zeit. Diese Feststellung hat schwerwiegende Konsequenzen im Hinblick auf die Emissionsrate von CO<sub>2</sub> und die Netto-Energieproduktion der Atomkraft in der Zukunft.

### Kohlendioxid-Ausstoss im Lauf der Zeit

Erze mit geringerem Urangehalt erfordern bei der Ausbeutung mehr Energieeinsatz. Deshalb wird pro Kilogramm Uran mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt. Während der mitt-

lere Urangehalt der Erze im Lauf der Zeit sinkt, steigt die CO<sub>2</sub>-Produktion pro Kilogramm Uran.

In etwa 70 Jahren (Szenario 1) bzw. 45 Jahren (Szenario 2) ist der CO<sub>2</sub>-Ausstoss der Atomkraftwerke grösser als jener der gasbefeuerten Kraftwerke (Abbildung 2).

### Netto-Energie im Lauf der Zeit

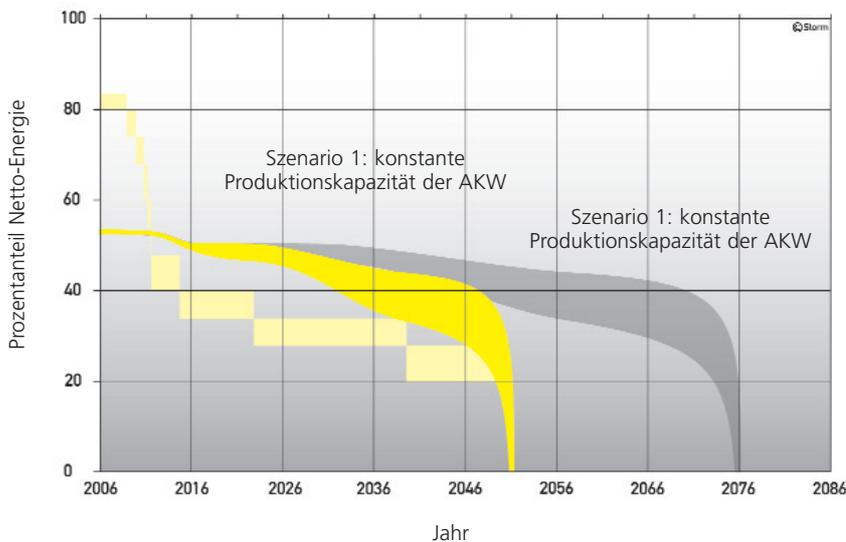
Aus den oben erwähnten Gründen wird sich die Netto-Energie, die sich aus Uranerzen gewinnen lässt, im Lauf der Zeit reduzieren. Die Abnahme des mittleren Urangehaltes auf unter 0,1% innerhalb von drei Jahrzehnten hat einen markanten Abfall der Netto-Energie aus Uran zur Folge. Das Nuklear-System wird – je nach dem verwendeten Szenario – zwischen 2050 oder 2070 die «Energieklippe» überschreiten (Abbildung 3).

### Ausblick

Beide Szenarien in dieser Arbeit basieren auf den gegenwärtig bekannten abbaubaren Vorräten an Uranerz. Gibt es Aussichten, dass noch weitere, bis jetzt unbekannte Vorräte entdeckt werden?

Es ist ziemlich sicher, dass weitere Uranvorkommen gefunden werden. Höhere Uranpreise machen zusätzliche Explorationsanstrengungen lohnend; weitere Exploration wird auch zu weiteren Vorkommen führen. Das ist der ökonomische Teil der Geschichte.

Die Uranvorkommen mit der besten Qualität, also die am einfachsten auffindbaren und am leichtesten zugänglichen (chemisch und physikalisch) und am besten abbaubaren Vorkommen, sind allesamt schon bekannt. Aus geologischer Sicht sind die Chancen, neue, grosse, qualitativ hochstehende Vorkommen zu finden, gering. Bis jetzt wurden keinerlei Hinweise publiziert, dass solche Vorkommen existieren. Sogar wenn ein reiches Vorkommen wie in Kanada (beispielsweise «Cigar Lake») entdeckt würde, könnte dieses bei der gegenwärtigen Nachfrage nur etwa 6 bis 7 Jahre lang hoch qualitatives Uran liefern. Am wahrscheinlichsten ist, dass Erzvorkommen, die zukünftig entdeckt werden, eine noch ge-



### Die Energieklippe im Lauf der Zeit.

**Abbildung 3:** Die vertikale Achse stellt den Anteil der Netto-Energie aus dem Nuklear-System dar. Dies ist der Bruchteil der produzierten Energie, der nicht gebraucht wird, um das nukleare System selber zu betreiben und aufrecht zu erhalten. Die hellgrüne Fläche ist ein Mass für die Unsicherheit der berechneten Werte. Wegen einiger optimistischer Annahmen in der Analyse sind die unteren Grenzwerte wahrscheinlicher als die oberen Grenzwerte.

ringere Energiequalität als die gegenwärtig bekannten Uranvorkommen haben. [5] Deshalb ist also anzunehmen, dass neu entdeckte Uranvorräte noch näher an der Energieklippe liegen. [6]

### Die Reaktoren der Generation IV, ein bewegliches Ziel

Die Atomindustrie behauptet fest, neue Atomreakortypen, genannt «Generation IV», seien einsatzbereit und würden alle Uran-Nachschubprobleme auf einen Schlag zum Verschwinden bringen. Die «Generation IV» ist eine neue Typenreihe mit geschlossenem Kreislauf, die früher «Brutreaktor» genannt wurde. Die «Brüter» wären imstande, etwa 60% der im natürlichen Uran enthaltenden Atome zu spalten, also hundertmal mehr als die aktuelle Reaktorgeneration.

Ein halbes Jahrhundert intensiver Forschung in sieben Ländern rund um den ganzen Globus und Investitionen von mindestens 100 Milliarden Dollar haben bisher nur bewiesen, dass das Brüttersystem technisch nicht machbar ist! Sogar wenn die technischen Probleme sofort lösbar wären, so wäre der erste kommerzielle Brüter erst etwa 30 Jahre später am Netz. Also definitiv zu spät, um die Energieprobleme zu lösen!

### Terroristen-Risiko

Die Verbreitung der Reaktoren der Generation IV würde eine grosse und unkontrollierbare Plutonium-Wirtschaft etablieren. Für jede Terroristengruppe wäre es ein Leichtes, genügend Plutonium abzuzweigen, um einen nuklearen Sprengsatz zu bauen. [7] Sicherheitsgarantien und Verträge auf Papier können den (illegalen) Handel mit und den Diebstahl von Plutonium nicht verhindern!

### Schlussbemerkungen

#### Demokratische Aspekte

Atomenergie ist nicht nur ein technisches Thema, sondern beinhaltet grundsätzliche demokratische Aspekte.

Die Atomindustrie hat sich mit Geheimhaltung umgeben, aber Atomenergie betrifft die gesamte Gesellschaft. In einer Demokratie hat das Volk das grundlegende Recht, seine Entscheide in Kenntnis der echten Fakten und nicht auf der Grundlage von unvollständiger Information zu fällen.

### Hinauszögern einer nachhaltigen Entwicklung

Die Finanzstruktur der Atomindustrie und damit der Atomenergie ist sehr undurchsichtig. Nur ein Teil der wahren Kosten wird wirklich veröffentlicht. Nur wenige Leute kennen die tatsächlichen Kosten der Atomenergie: also die Kosten, die die Gemeinschaft insgesamt zu bezahlen hat. Die «Langzeitlagerung» des Atom Mülls, die Ausserbetriebnahme und der Rückbau der Reaktoren (um nur einige Beispiele zu nennen) werden bei den publizierten Kosten des Atomstroms nicht oder ungenügend in die Rechnung einbezogen.

Lässt man sich auf ein neues Atomprogramm ein, so bezahlt man dies mit Investitionen in der Grössenordnung von einigen zehn Milliarden Euro und hat mindestens während der nächsten hundert Jahre hohe finanzielle Verpflichtungen. Ist ein neues Atomprogramm einmal gestartet, so ist es sehr schwer wieder zu stoppen. Die Atomenergie absorbiert einen unverhältnismässig grossen Anteil der verfügbaren Forschungs- und Fördergelder. Damit zögert sie die Entwicklung von nachhaltigen Energieoptionen noch weiter hinaus. Eine solche Verzögerung können wir uns schlicht nicht leisten.

Der Artikel stützt sich auf folgende Studie: Jan Willem Storm van Leeuwen & Philip Smith: «Nuclear Power – the Energy Balance»; August 2005; Download der Studie unter [www.stormsmith.nl](http://www.stormsmith.nl)

#### Weitere Quellen:

- Power Generation and the Environment – a UK Perspective, Volume 1, June 1998, AEAT 3776; <http://externe.jrc.es/uk.pdf>
- Red Book 2006, Uranium 2005: Resources, Production and Demand, «Red Book» 21st edition, OECD NEA, IAEA OECD 2006.
- BP 2006, Statistical Review of World Energy, June 2006; [www.bp.com/centres/energy/](http://www.bp.com/centres/energy/)

[1] In den meisten ökonomischen Statistiken sind nur gehandelte Energieflüsse aufgeführt. Indem man nun einen Buchhaltungs-Trick anwendet, kommt man in ökonomischen Statistiken auf einen Anteil von 6% (statt 2,2%).

[2] Die Definition von «Uran-Erz» richtet sich nach ökonomischen und nicht nach physikalischen oder chemischen Eigenschaften. Um das Potenzial der Atomenergie in Bezug auf Energieversorgung und Klimabeeinflussung beurteilen zu können, muss man sich aber ausschliesslich nach den physikalisch-chemischen Eigenschaften der uranhaltigen Vorkommen richten.

[3] Die minimale Energiemenge, die zur Extraktion von Uran aus der Erdkruste nötig ist, wird durch grundlegende physikalische und chemische Gesetzmässigkeiten bestimmt. Dank technologischen Fortschritten können wir näher an die thermodynamischen Grenzen herankommen; erreichen oder gar überschreiten können wir diese aber nie. Die thermodynamischen Gesetze können weder durch fortschrittliche Technik noch durch ökonomische Tricks umgangen werden.

[4] Die dunklen Balken stellen Vorkommen von «harten» Erzen dar. Es gibt auch Erze, die in dieser Hinsicht «gemischte» Eigenschaften haben; sie sind durch einen Farbverlauf dargestellt. Erze mit geringem Urangehalt sind tendenziell «hart».

[5] Das liegt entweder am geringeren Gehalt, an der grösseren Abbautiefe, am längeren Transportweg oder hat andere Gründe. Geringere Energiequalität bedeutet entsprechend mehr Energieaufwand pro Kilogramm Uran. Es ist also

[6] Es ist wichtig, dass wir unterscheiden zwischen gehaltvollen Erzen (also Erzen mit einem hohen Urangehalt) und hochqualitativen Erzen (also Erzen mit einem geringen Energieaufwand bei der Extraktion).

[7] Das mag vielleicht etwas plump sein, ist aber sehr effektiv.