

STROM AUS URAN

*Vom verantwortungsvollen Umgang
mit Ressourcen*

SWISSNUCLEAR

swissnuclear ist die Fachgruppe Kernenergie der swisselectric. Swisselectric setzt sich aus Vertretern der schweizerischen Stromverbundunternehmen Alpiq, Axpo, BKW, CKW und EGL zusammen. Gegründet wurde die Fachgruppe im Juni 1985 unter der damaligen Bezeichnung Unterausschuss Kernenergie (UAK).

swissnuclear setzt sich ein für den sicheren und wirtschaftlichen Betrieb der Kernkraftwerke in der Schweiz. Ihre Mitgliedunternehmen betreiben die Schweizer Kernkraftwerke Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg, die rund 40% des Strombedarfs der Schweiz produzieren.

INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung	3
Uran: Energieträger mit Potenzial	7
Uran: Vorkommen und Reserven	11
Brennstoff: Herstellung der Brennelemente	19
Transport und Lagerung: Sicherheit steht an erster Stelle	27
Brennstoffrecycling: Schonung der Ressourcen	33
Non-Proliferation: Kernmaterialüberwachung – Safeguards	41
Zukunft Kernbrennstoff: Entwicklung geht weiter	45
Glossar	49

EINLEITUNG

Moderne Gesellschaften benötigen Energie, viel Energie sogar. In Form von Gas, Erdöl und in zunehmendem Masse auch von Strom. Angesichts des Klimawandels besteht das Bestreben, die Emissionen klimaschädlicher Gase zu senken und auf möglichst CO₂-arme Produktionsformen zu setzen. Dazu gehört die Kernenergie, die in der Schweiz seit über 40 Jahren zuverlässig und sicher Strom produziert. Trotzdem sind die Vorbehalte dieser Energieform gegenüber nach wie vor gross.

Neben der Frage der Sicherheit von Kernkraftwerken ist es vor allem ein weiteres Thema, das die Menschen beschäftigt: Der Brennstoff Uran, sein Abbau und dessen Konsequenzen für Mensch und Umwelt. Diese Broschüre will auf einige der immer wieder aufgeworfenen Fragen Antworten geben und Wissen vermitteln.

Uran ist in der Natur in grossen Mengen vorhanden und kann uns noch sehr lange als Energielieferant dienen – nicht nur in Kernanlagen wie wir sie heute kennen. Wie für jeden anderen Rohstoff gilt es, einen sehr sorgfältigen Umgang mit der Ressource zu pflegen. Dazu gehört namentlich auch der verantwortungsvolle Abbau und der sichere Umgang mit dem nach dem Einsatz im Kernreaktor hochaktiven Material, z.B. beim Transport. Ein weiterer Aspekt in Zusammenhang mit spaltbarem Material ist die Non-Proliferation (Nichtverbreitung von Kernwaffen), welche in dieser Broschüre auch thematisiert wird.

Die Schweizer Stromproduzenten verstehen sich als nachhaltige Unternehmen. Sie übernehmen Verantwortung für Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft in den Bereichen, in denen sie tätig sind. Dazu gehört auch, dass sie über die ganze Wertschöpfungskette unserer Stromproduktion, bei der Kernenergie vom Uranabbau bis zur Verteilung des Stroms über das Stromnetz, Bescheid wissen. Ebenso wichtig ist es uns, Transparenz zu schaffen und Fakten zu vermitteln. Die vorliegende Broschüre soll hierzu einen Beitrag liefern.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Stephan W. Döhler', written in a cursive style.

Stephan W. Döhler

Präsident swissnuclear

URAN

Energieträger mit Potenzial

Uran ist ein weiches Metall, mit einer Dichte, die neunzehnmal grösser als Wasser ist. Das natürlich vorkommende Uran besteht zu über 99% aus dem Isotop Uran 238. Das letzte Prozent setzt sich aus Spuren von Uran 234 und rund 0,7% Uran 235 zusammen. Damit das Uran als Brennstoff in einem herkömmlichen Kernkraftwerk eingesetzt werden kann, muss der Anteil an Uran 235 genügend hoch sein. Das Natur-Uran wird daher angereichert: Der natürliche Anteil von rund 0,7% Uran 235 wird auf 4–5% erhöht. Dieses angereicherte Uran wird als Urandioxid in den Brennelementen eingesetzt.

Hohe Energiedichte

Der Energieinhalt von Uran ist sehr hoch, was bedeutet, dass mit einer geringen Menge Brennstoff sehr viel Energie erzeugt und zur Stromproduktion genutzt werden kann.

Brennstoffverbrauch

Die in nebenstehender Grafik erwähnten Brennstofftabletten werden abgefüllt in Brennelemente und im Reaktorkern eingesetzt. Jedes Brennelement bleibt üblicherweise fünf Jahre im Reaktor. Jährlich wird das älteste Fünftel ausgetauscht, weil der Gehalt an Uran 235 zu gering und jener an neutronenabsorbierenden Spaltprodukten zu hoch geworden ist.

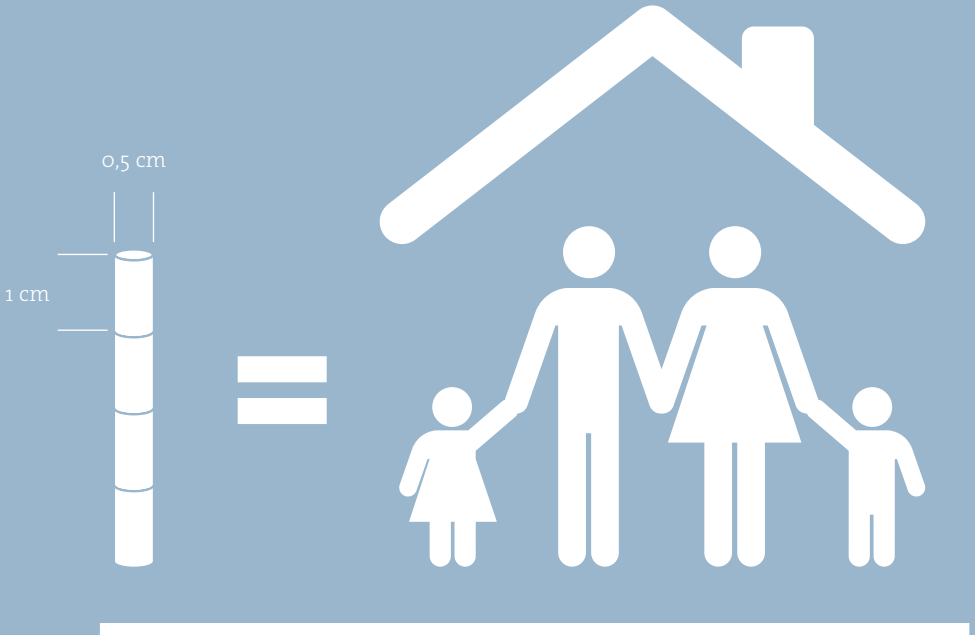
Pro Jahr benötigen die fünf Schweizer Kernkraftwerke insgesamt rund 550 Tonnen Natur-Uran, respektive 80 Tonnen angereichertes Urandioxid. Damit werden knapp 40% des Schweizer Strombedarfs gedeckt.

ISOTOPE sind Atome desselben Elements, aber mit unterschiedlicher Masse. Isotope eines Elements haben jeweils die gleiche Anzahl an Protonen, aber eine unterschiedliche Anzahl an Neutronen im Atomkern. Sie haben jeweils die gleichen chemischen, aber unterschiedliche physikalische Eigenschaften.

.....

VERGLEICH ENERGIEDICHTE

4 Brennstofftabletten einer Grösse von 0,5x1cm reichen aus, um eine vierköpfige Familie während eines ganzen Jahres mit Strom zu versorgen.



4 Brennstofftabletten
(Originalgrösse)

vierköpfige Familie

Andere Energieformen benötigen zur Produktion derselben Menge Strom ungleich viel mehr Rohstoff, nämlich:

nahezu 660 m³ Erdgas oder

rund 730 Liter Schweröl oder

gut 900 kg Steinkohle.

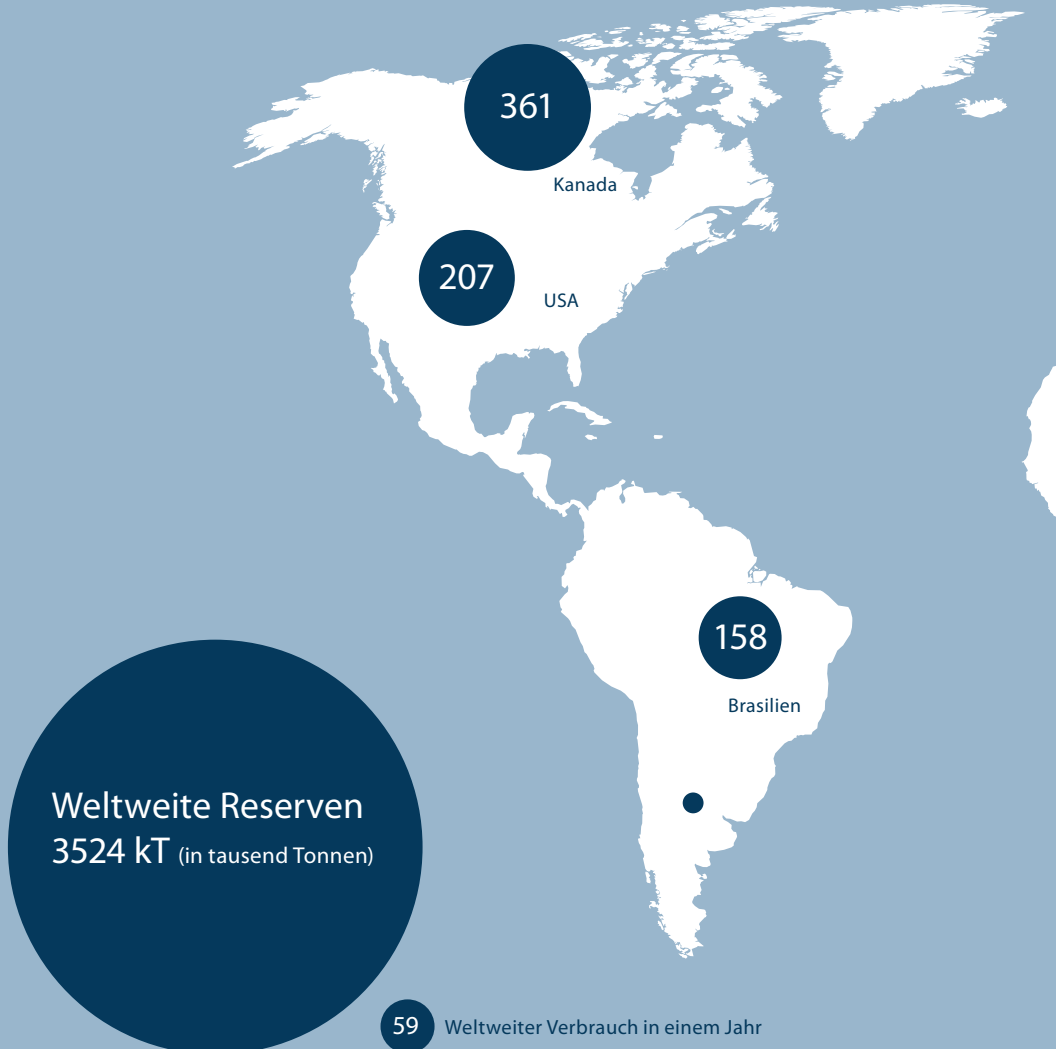
URAN

Vorkommen und Reserven

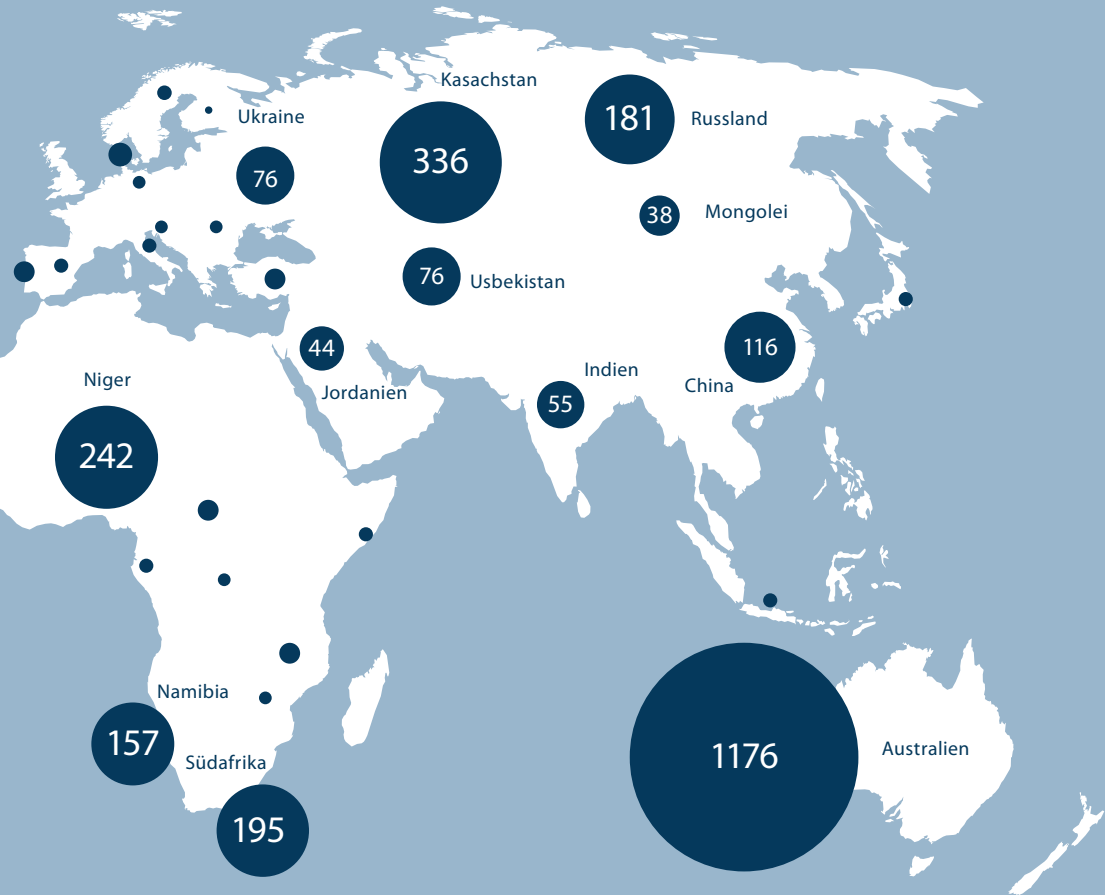
Uran ist fast überall in der Erdkruste vorhanden und auch die Ozeane enthalten riesige Mengen davon. Anders als beim Erdöl besteht eine viel kleinere Abhängigkeit von einigen wenigen Regionen. Die wichtigsten Fördergebiete von Uran sind global auf verschiedene Länder wie Kanada, Kasachstan oder Australien verteilt. Nach Angaben der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) reichen die bekannten, wirtschaftlich abbaubaren Uranreserven beim heutigen Verbrauch mindestens für die nächsten 60 Jahre. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft weitere Abbaumöglichkeiten erschlossen werden können.

WELTWEITE URANRESERVEN

Uran ist weltweit vorhanden. Die bekannten Uranreserven reichen noch für mindestens 60 Jahre. Die potentiellen Fördermengen sind berechnet bei einem Preis von US \$ 130 / kg (entspricht dem Preisniveau von 2012)



RED BOOK Alle zwei Jahre geben die IAEA und die OECD das sogenannte «Red Book» heraus. Dieses gibt u.a. Auskunft über die prognostizierte Menge abbauwürdiger Uranvorkommen, den weltweiten Verbrauch und die insgesamt prognostizierte Reichweite. Das «Red Book» ist online im OECD Bookshop erhältlich.



Werte in tausend Tonnen

Quelle: OECD Redbook 2009

Urangewinnung

Uran kommt nicht als Element, sondern als Uranerz in Verbindung mit anderen Elementen vor. Je nach Beschaffenheit der Lagerstätte wird es im Tagebau in grossen Gruben, in Minen oder mittels eines Auslaugeverfahrens (an Ort und Stelle) abgebaut.

Daneben wird Uran auch beim Rückbau von militärischen Einrichtungen, welche ebenfalls angereichertes Natur-Uran verwendeten, gewonnen. Seit dem Ende des Kalten Krieges bauen die beiden grössten Atommächte Russland und USA ihre Lagerbestände an spaltbarem Material systematisch ab. Das waffenfähige Material wird so weit abgereichert, dass es für zivile Zwecke in Kernanlagen eingesetzt werden kann. Dadurch besteht zugleich ein wirtschaftlicher Anreiz den Rückbau voranzutreiben.

Uranreserven reichen weit

Nach aktuellen Prognosen dürften die zurzeit bekannten, abbaubaren Uranreserven weltweit rund 60 Jahre reichen. Sie liegen damit deutlich über der Reichweite vieler anderer Rohstoffe (z.B. Zink, Kupfer), die für unser tägliches Leben wichtig sind.

Wie bei jedem Rohstoffmarkt definiert die Nachfrage den Preis. Je höher der Preis, desto höher ist aber auch der Erlös und damit die Bereitschaft, weniger ergiebige Vorkommen zu erschliessen. In den letzten 25 Jahren sind aus diesem Grund die prognostizierten Reserven und Ressourcen in etwa konstant geblieben.

Sollte die Nachfrage noch stärker zunehmen als erwartet, würde sich auch das Erschliessen von bisher als zu teuer erachteten alternativen Quellen plötzlich lohnen: Uran als Nebenprodukt der Düngerproduktion (Phosphat), Uran aus Meerwasser oder Uran aus Kohlenasche. Nimmt man alle diese Möglichkeiten zusammen, steht ein Mehrfaches der heute bekannten Vorkommen zur Verfügung.

URAN

Vorkommen und Reserven

Steigende Rohstoffpreise führen natürlich auch zu einer Verteuerung der Endenergie. Im Falle von Gas oder Rohöl schlagen sich steigende Energiekosten unmittelbar beim Endkunden nieder. Bei einem Kernkraftwerk fallen die Urankosten jedoch bedeutend weniger ins Gewicht, machen sie doch lediglich ca. 5% der Stromproduktionskosten aus. Würden sich z.B. die Kosten für Uran in den nächsten Jahrzehnten verzehnfachen, würden die Produktionskosten für Strom aus Kernenergie trotzdem lediglich um wenige Rappen ansteigen.

Uranbergbau mit Rücksicht auf Mensch und Umwelt

Der Uranabbau hat sich in der Vergangenheit mangelnden Umweltschutz und gesundheitsschädigende Arbeitsbedingungen vorwerfen lassen müssen. Die Industrie ist sich heute ihrer gesellschaftlichen Verantwortung bewusst und nimmt diese wahr.

Alle Uranminen stehen unter strenger behördlicher Aufsicht. Viele haben inzwischen das Umweltzertifikat nach internationalen Normen erworben (ISO 14001). Sie verpflichten sich, Mensch und Umwelt vor schädlichen Einflüssen zu schützen und die Naturlandschaft nach Ende des Minenbetriebs wieder herzustellen. Viele Minengesellschaften stehen im Prozess der Zertifizierung ihrer gesellschaftlichen Verantwortung (Corporate Social Responsibility) nach der SA 8000-Norm (Standard für Social Accountability des Council for Economic Priorities)

Auch die schweizerischen Kernkraftwerke haben sich verpflichtet, bei ihren Lieferanten auf die Umweltverträglichkeit zu achten.

Hohe Versorgungssicherheit

Neben der langfristigen Verfügbarkeit eines Rohstoffs ist auch die kurzfristige Verfügbarkeit, gemessen an der Verletzlichkeit bei einem Lieferungs-ausfall, ein Mass für die Versorgungssicherheit.

Die Schweizer Kernkraftwerke beanspruchen mit rund 550 Tonnen jährlich weniger als ein Prozent des Weltjahresverbrauchs von rund 59000 Tonnen. Mit einer geschätzten Reichweite von mindestens 60 Jahren ist die langfristige Versorgungssicherheit bei Uran gegeben.

Aber auch kurzfristig besteht kaum ein Risiko bezüglich Versorgungssicherheit. Während der jährlichen Revision wird jeweils rund ein Fünftel der Brennelemente ersetzt. Typischerweise lagern die Kernkraftwerke vor Ort diese Menge frischen Brennstoffs für das jeweils nächste Betriebsjahr ein. Selbst im unwahrscheinlichen Fall eines Lieferunterbruchs von frischem Brennstoff in die Schweiz (was in den vergangenen 40 Jahren nie passiert ist) könnten die Kernkraftwerke mit dem bereits gelagerten Brennstoff noch bis zu einem ganzen Jahr mit voller Leistung Strom produzieren.

Damit erweist sich die Kernenergie als bedeutend resistenter hinsichtlich Versorgungsengpässen, als dies z.B. bei Erdöl oder Erdgas der Fall ist. Die Erdölpflichtlager beispielsweise reichen maximal für zwei bis drei Monate.

BRENNSTOFF

Herstellung der Brennelemente

Bereits in der Nähe der Minen wird das abgebaute Uranerz zerkleinert und gemahlen. Mit Säuren werden die Uranoxide aus dem Gestein gelöst. Nach weiterer chemischer Behandlung entsteht der sogenannte «gelbe Kuchen» (Yellow Cake), der in der Regel etwa 70 % Uran enthält. In dieser Form wird Uran international gehandelt. Bis zum Einsatz als Brennstoff in Kernkraftwerken muss es noch gereinigt, angereichert und verarbeitet werden.

Erst durch Anreicherung spaltbar

Uran 235 ist das einzige in der Natur vorkommende Isotop, mit welchem eine sich selbst erhaltende Kernspaltungs-Kettenreaktion aufrecht erhalten werden kann. Dies ist Grundlage für die nukleare Energieproduktion in herkömmlichen Reaktoren. Der im Natur-Uran vorhandene Anteil dieses Isotops ist dafür aber zu gering. Dieser muss deshalb bei der Herstellung von Brennstoff durch Anreicherung auf 4–5 % erhöht werden.

Urananreicherung: ein komplexer Prozess

Natur-Uran wird als Yellow Cake gehandelt. Als erstes muss der Yellow Cake konvertiert werden. In einem chemischen Konversionsverfahren wird durch den Einsatz von Fluorwasserstoff (auch bekannt als Flusssäure) sowie Fluor selber das Uran in Form von Uranhexafluorid (UF_6) gebunden. UF_6 ist bei normalem Druck und Raumtemperatur ein weißer kristalliner Körper, der bei reduziertem Druck und bei Temperaturen über 56°C direkt gasförmig wird (sublimiert).

In einem zweiten Schritt gilt es die Isotope Uran 235 und Uran 238 zu separieren, um den Anteil an Uran 235 gezielt zu erhöhen. Isotope reagieren chemisch gleich, weshalb für diese Anreicherung keine chemischen Verfahren zur Anwendung kommen können. Sie unterscheiden sich dagegen in ihren physikalischen Eigenschaften, nämlich in ihrer Masse. Entsprechend werden für die Anreicherung physikalische Trennverfahren eingesetzt. Dabei nutzt man die winzigen Massenunterschiede zwischen den beiden Isotopen Uran 235 und Uran 238 aus. Weltweit haben sich hierfür kommerziell zwei Verfahren durchgesetzt: das Gasdiffusions- und das Gaszentrifugenverfahren. Das mit Uran 235 fertig angereicherte Uranhexafluorid wird schliesslich als Gas in spezielle Behälter abgefüllt, gekühlt und damit verfestigt und zur Brennelementfabrikation transportiert.

BRENNSTOFF
Herstellung der Brennstäbe

GAS DIFFUSION: Das UF_6 wird mit hohem Druck gegen spezielle Membranen forciert. Die etwas leichteren Uran 235 Moleküle werden zu einem geringfügig grösseren Teil durch die Membranen durchgelassen.

GAS ZENTRIFUGEN: Das UF_6 wird in sehr schnell rotierenden Zentrifugen geschleudert. Das Uran 238 ist etwas schwerer und wird daher eher gegen die äussere Wand geschleudert. Damit wird der Anteil an Uran 235 in der Mitte leicht angereichert und kann so von der zentralen Achse entnommen werden. Diese Technik wird sich als Standard etablieren.

.....

BRENNSTOFF

Herstellung der Brennstäbe

Weltweit wird heute die Anreicherung von Uranhexafluorid in mehreren Anlagen durchgeführt, so z.B. in Frankreich, Kanada, den USA und Russland. Die dadurch notwendigen Transporte der Uran-Zwischenprodukte fallen in der Gesamtenergiebilanz aufgrund der hohen Energiedichte von Uran letztlich dennoch kaum ins Gewicht.

Abgereichertes Uranhexafluorid: Reststoff oder Wertstoff?

Durch die Anreicherung des Uranhexafluorids entstehen zugleich abgereicherte Rückstände, in der Fachsprache Tails genannt. Sie werden heute in der jeweiligen Anreicherungsanlage zwischengelagert. Wegen des verbleibenden Gehalts an wertvollem Uran 235 von immer noch 0,3% ist eine Entsorgung weder wirtschaftlich noch ökologisch sinnvoll. Bei steigenden Uranpreisen könnte das restliche vorhandene Uran 235 genutzt werden.

Vom Uranhexafluorid zum Brennelement

Das angereicherte Uranhexafluorid wird in einer Brennelementefabrik in Urandioxidpulver umgewandelt, zu Pellets gepresst und bei ca. 1700 Grad Celsius gesintert, d.h. zu keramischem Material umgeformt. Bei der Herstellung von Brennstäben werden diese Pellets in Zirkonium-Hüllrohre abgefüllt.

BRENNSTOFF

Herstellung der Brennstäbe

Die Brennstäbe werden gasdicht verschweisst, angepasst auf den jeweiligen Kraftwerkstyp zu unterschiedlich grossen Brennelementen zusammengesetzt und nach einer sehr kritischen Ausgangskontrolle seitens Werkverterter zum Kernkraftwerk geliefert, wo sie ohne weitere Verarbeitung zur Energieherstellung eingesetzt werden können.

Vorschriften und Kontrollen sichern hohe Qualität der Brennelemente

Brennelemente sind ein Hochtechnologieprodukt. Der wirtschaftliche Wettbewerb unter den Herstellern stellt sicher, dass die Produkte laufend innovativ weiterentwickelt werden. Die Optimierung der Brennstoffnutzung und die Verlängerung der Einsatzdauer stehen dabei im Vordergrund. Heute können Brennelemente nach dem neuesten Stand der Technik rund doppelt so lange im Reaktor verbleiben wie noch vor 30 Jahren. Mit derselben Anzahl Brennelemente wird heute doppelt so viel Energie gewonnen, wodurch der Verbrauch an Rohstoffen sowie die Anzahl der zu entsorgenden Brennelemente stark reduziert werden konnten.

Die Herstellung wird durch eine aufwändige Fertigungsüberwachung durch kraftwerkseigene Inspektoren begleitet, wobei besonderer Wert auf die Qualität des Fabrikationsprozesses gelegt wird. Es kommen als Lieferanten nur Hersteller von Brennelementen in Frage, die mit einem international anerkannten und regelmässig überprüften Qualitätsmanagementsystem arbeiten.

TRANSPORT UND LAGERUNG

Sicherheit steht an erster Stelle

Über seinen ganzen Zyklus wird Uran in unterschiedlicher Form und Konsistenz transportiert. Bei jedem Transport müssen die entsprechenden Sicherheitsanforderungen berücksichtigt werden. Die wesentlichen Transporte finden von der Uranmine zur Konversionsanlage, von da zur Anreicherungsanlage und Brennelementefabrik sowie schliesslich zum Kernkraftwerk statt. Ausgediente Brennelemente werden in ein Zwischenlager und anschliessend in ein Tiefenlager gebracht.

Von der Mine zur Konversionsanlage, ...

Das gemahlene Urankonzentrat, der sogenannte Yellow Cake, muss zur Herstellung von Kernbrennstoff zuerst in Uranhexafluorid konvertiert und anschliessend angereichert werden.

Weltweit existieren nur einige wenige Konversionsanlagen, nämlich in Nordamerika, Frankreich, UK und Russland, was den Transport des Yellow Cake über weite Strecken notwendig macht. Das Material ist allerdings nur schwach radioaktiv, so dass für den Transport handelsübliche, dafür ausgelegte Stahlfässer von 200 und 400 Litern Fassungsvermögen zum Einsatz kommen.

... zur Anreicherungsanlage und Brennelementefabrik ...

Uranhexafluorid ist bei normalem Druck und Raumtemperatur ein weisses kristallartiges Material. Für den sicheren Transport ist aber eine andere Eigenschaft von entscheidender Bedeutung: Uranhexafluorid wird bei einer Temperatur von 56,8° C gasförmig. Es wird daher ausschliesslich in speziellen Druckbehältern transportiert, die auch bei den unterschiedlichsten Unfallszenarien dicht bleiben.

... und zum Einsatzort im Kernkraftwerk

Von der Anreicherungsanlage zur Brennelementefabrik wird das angereicherte Uran in ähnlichen, aber kleineren Druckbehältern transportiert und dort zu Brennelementen zusammengefügt. Unbestrahlte Brennelemente sind nur schwach radioaktiv, weshalb für deren Transport zum Kernkraftwerk keine besonderen Vorkehrungen zur Abschirmung notwendig sind. Die Dosisleistung eines neuen Brennelements beträgt weniger als 1 Microsievert pro Stunde in einem Meter Abstand. Es soll jedoch verhindert werden, dass Material in die Umgebung gelangt. Die speziell konstruierten Transportbehälter sind daher äusserst solide gebaut. Zusätzlich ist die Gesamtzahl der Brennelemente pro Transport begrenzt.

Höchste Sicherheit beim Transport von ausgedienten Brennelementen

Durch den Einsatz im Reaktorkern wird Uran gespalten. Die jetzt stark radioaktiven Brennelemente produzieren durch den radioaktiven Zerfall zudem sehr viel Wärme. Die Transport- und Lagerbehälter für ausgediente Brennelemente sind daher an ihrer Aussenseite oft mit Kühlrippen oder Kühlstiften versehen.

HÄRTETESTS: Die Behälter für den Transport und die Lagerung von verbrauchten Kernbrennstoffen müssen äusserst widerstandsfähig sein. Tests umfassen z.B. einen freien Fall aus 9 Metern Höhe auf eine unnachgiebige Betonplatte und einen Feuerstest bei 800°C. Extreme Tests – z.B. Fall aus 200 Metern Höhe oder Eisenbahnunfälle mit bis zu 140 km/h – haben gezeigt, dass die Schutzwirkung auch bei stärksten Belastungen erhalten bleibt. Ausserdem schreibt die Schweizer Sicherheitsbehörde ENSI vor, dass der Behälter unter dem sehr unwahrscheinlichen Szenario eines Flugzeugabsturzes an seinem schwächsten Punkt vollständig dicht bleiben muss.

.....

In der Schweiz werden die ausgedienten Brennelemente direkt in diesen Behältern im Zwischenlager Würenlingen oder in den Kernkraftwerken gelagert.

Nach der Periode der Zwischenlagerung kommen die Brennelemente in ein geologisches Tiefenlager. Mit der Suche und Erstellung eines solchen Tiefenlagers ist die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) durch die Kraftwerksbetreiber und den Bund beauftragt worden. Sie führt dies im Rahmen des Sachplanverfahrens (SGT¹) durch.

.....

¹ Information zum Sachplanverfahren:
www.nagra.ch/g3.cms/s_page/77580/s_name/standortsuche/close/true

Transportbewilligungen

Der Transport von gefährlichen Gütern auf der Strasse ist europaweit im ADR², in der Schweiz ergänzt durch Schweizer Richtlinien, geregelt. Darin sind z.B. Beförderungsbeschränkungen, Mengenschwellen, Vorschriften für die Sicherung und Qualitätssicherung etc. im Detail festgelegt.

Die Internationale Atomenergie Agentur (IAEA) gibt ihrerseits Empfehlungen für die sichere Beförderung radioaktiver Stoffe heraus. Diese fliessen in das internationale Transportrecht ein, um eine höchstmögliche Transportsicherheit zu gewährleisten.

Bewilligungsinstanz für Transporte von radioaktiven Stoffen ist in der Schweiz das Bundesamt für Energie (BFE). Voraussetzung für eine solche Bewilligung ist u.a. die Zulassung der erforderlichen Transportbehälter. Die Transportbehälter für Brennelemente (unbestrahlte und bestrahlte) sowie hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung müssen sowohl von der zuständigen Behörde des Ursprungslandes als auch von der Schweizer Aufsichtsbehörde, dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, zugelassen werden.

Jeglicher Transport von Brennstoff untersteht zudem der Überwachung durch die IAEA. Als mitunterzeichneter Staat des Atomwaffensperrvertrags gilt dies auch für die Schweiz.

.....
² ADR: Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route

BRENNSTOFFRECYCLING

Schonung der Ressourcen

Ein Brennelement verbleibt etwa 5 Jahre im Reaktorkern. Nach dieser Zeit gilt es als verbraucht, wird ausgetauscht und noch mehrere Jahre in einem Abklingbecken zwischengelagert. Doch dieser vermeintliche Abfall enthält noch grosse Mengen Energie, die durch Wiederaufarbeitung genutzt werden können. Dies ist ressourcenschonender und Abfallmengen reduzierend.

Wiederaufarbeitung verbrauchter Brennelemente

In einem ausgedienten Brennelement befindet sich immer noch ein Anteil Uran 235, welcher für neue Brennelemente genutzt werden kann. Durch den Neutroneneinfang im Reaktorkern entsteht ausserdem Plutonium. Dieses ist seinerseits leicht spaltbar.

Typischerweise können aus dem Recycling von rund zehn verbrauchten Brennelementen zwei neue hergestellt werden. Durch Wiederaufarbeitung lässt sich der Rohstoffbedarf entsprechend um rund 20 % reduzieren.

Um sowohl das Uran als auch das Plutonium als Wertstoffe zu separieren, muss ein industriell-chemischer Wiederaufarbeitungsprozess durchlaufen werden. Dabei werden die eigentlichen Abfälle, bestehend aus aktivierten metallischen Strukturteilen des Brennelementes (Zirkon und Stahl), den Spaltprodukten (kurzlebige radioaktive Nebenprodukte des Spaltprozesses) und den sogenannten höheren Aktiniden (langlebige radioaktive Stoffe), abgetrennt. Diese Abfälle werden in der Aufbereitungsanlage behandelt und in Stahlfässer eingeschlossen, bevor sie zum Kraftwerksbetreiber für die Zwischen- und spätere Tiefenlagerung zurück transportiert werden.

Das wiederaufbereitete Uran kann nun wiederum zur Herstellung herkömmlicher Brennelemente verwendet werden. Die Verarbeitungsmethoden dafür können aufgrund der leicht abweichenden Zusammensetzung des Brennstoffs verschieden sein. Die häufigste Methode, wiederaufgearbeitetes Uran erneut anzureichern, ist die Mischung (sog. Blending) mit höher angereichertem Uran.

Uran-Brennelemente aus der Wiederaufarbeitung unterscheiden sich aber weder in ihrem Aussehen noch in ihrem Verhalten im Reaktorkern wesentlich von neuen, aus Natur-Uran hergestellten Brennelementen.

Herstellung von MOX-Brennelementen

Sogenannte Mischoxid- oder MOX-Brennelemente unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihren Plutonium-Anteil von herkömmlichen Brennelementen, welche ungebraucht kein Plutonium enthalten. Das eingesetzte Plutonium stammt entweder aus der Wiederaufarbeitung oder aus der Abrüstung, konkret aus dem Rückbau nuklearer Sprengköpfe.

Die Verarbeitung von Plutonium erfordert höchste Sicherheitsvorkehrungen. Als starker Alpha-Strahler ist Plutonium besonders gefährlich, wenn es zu einer Aufnahme in den Körper kommt. Plutonium kann deshalb nicht wie Uran an einem offenen Arbeitsplatz verarbeitet werden. Die Fabrikation findet zum grössten Teil fernbedient und in abgeschirmten und unter Unterdruck stehenden Boxen statt. Der Herstellungsprozess ist daher komplex und aufwändig.

Für die Herstellung des Brennstoffs wird Plutonium-Oxid mit einem Trägermaterial von abgereichertem Uran-Oxid (0,3% Anteil an Uran 235) gemischt und in Pellets gepresst. Die Pellets werden in herkömmliche Brennstäbe eingefüllt.

Weniger und weniger langlebiger hochaktiver Abfall

Die langfristige Radiotoxizität von verbrauchtem Brennstoff ist hauptsächlich durch das Plutonium bestimmt. Durch Wiederaufarbeitung kann deshalb nicht nur der Bedarf an natürlichen Ressourcen in Form von Natur-Uran gesenkt werden. Durch das Abtrennen des Plutoniums wird gleichzeitig die Langlebigkeit des Abfalls um rund das Zehnfache reduziert und das Volumen der hochaktiven Abfälle verringert. Die Einlagerung des hochaktiven Abfalls in einem geologischen Tiefenlager bleibt heute aber auch mit der Wiederaufarbeitung notwendig.

Wiederaufarbeitung: umstrittenes Recycling

Die Wiederaufarbeitung ebenso wie der Einsatz von MOX-Brennelementen ist umstritten.

In vielen Ländern kommen heute denn auch keine wiederaufgearbeiteten Brennelemente zum Einsatz. In einigen Ländern, z.B. Deutschland, ist die Wiederaufbereitung sogar verboten. Für die Schweiz gilt vorerst bis 2016 ein Wiederaufarbeitungsmoratorium.

Kritiker verweisen auf das Risiko von Transporten von hochaktivem Material über grosse Distanzen. Die Transportvorschriften sind jedoch ausserordentlich streng, werden scharf kontrolliert und international überwacht.

Wiederaufarbeitungsanlagen wird zudem vorgeworfen, Umweltschäden zu verursachen. Genau wie bei Kohlekraftwerken, Chemiefabriken oder Spitälern gelten aber auch für Wiederaufarbeitungsanlagen Grenzwerte für zulässige Emissionen. Die Abgaben werden laufend überwacht und liegen weit unter den behördlich zugelassenen Grenzwerten, wie Umweltberichte belegen.

Auch wird das Risiko im Umgang mit Plutonium, vor allem Proliferation, als wesentliches Argument gegen die Wiederaufarbeitung genannt. Plutonium ist ein gefährlicher Stoff; waffenfähig, d.h. einsetzbar für eine Atombombe, ist das Plutonium aus der Wiederaufbereitung von zivilem Brennstoff jedoch nicht, da die Isotopenzusammensetzung nicht geeignet ist.

Unter dem geltenden Moratorium werden keine Brennelemente aus der Schweiz in die Wiederaufarbeitung transportiert. Die ausgedienten Brennelemente werden heute am Kraftwerkstandort selbst oder im zentralen Zwischenlager (Zwilag) in Würenlingen sicher vor Überflutung, Erdbeben und Flugzeugabsturz zwischengelagert. Von dort aus können die Brennelemente zu einem späteren Zeitpunkt entweder direkt in ein geologisches Tiefenlager verbracht oder in die Wiederaufarbeitung gesandt werden.

Bereits vor dem Moratorium exportierte Brennelemente dürfen jedoch behandelt werden. Allerdings ist deren Wiederaufarbeitung und die Rezyklierung der Wertstoffe bis heute weitgehend erfolgt. Sämtliche Abfälle aus der Wiederaufbereitung müssen zurückgenommen werden. Der Rücktransport wird in den nächsten Jahren abgeschlossen sein.

MOX-BRENNSTOFF: Zur Herstellung von MOX-Brennelementen werden Tails aus der Anreicherung mit Plutonium gemischt. Der Herstellungsprozess ist grundsätzlich derselbe wie für Urandioxid. Aufgrund der besonders hohen Strahlenschutz-Anforderungen im Umgang mit Plutonium ist die Herstellung von MOX-Brennstoff jedoch aufwändiger.

.....

NON-PROLIFERATION

Kernmaterialüberwachung – Safeguards

Der zivilen Nutzung der Kernenergie ging die militärische voraus. Die Technologie zur hohen Anreicherung von Uran für Atomsprengköpfe ist identisch mit derjenigen, zur schwächeren Anreicherung für Brennelemente zur Stromerzeugung. Deshalb steht der Bau von Anreicherungsanlagen – neben der Wiederaufarbeitung, bei der u.a. Plutonium aus den ausgedienten Brennelementen gewonnen wird – immer wieder im Zentrum internationaler Diskussionen.

Internationale Abkommen und Verträge

Die Schweiz gehörte 1957 zu den Staaten, die die Internationale Atomenergie-Agentur (IAEA) gegründet haben. Im Anschluss daran verpflichtete sich unser Land, sämtliche seiner Kernanlagen der permanenten Kontrolle der IAEA zu unterstellen. Als IAEA-Mitglied unterzeichnete die Schweiz eine Reihe von weiteren Abkommen, welche dazu dienen, die Sicherheit von Kernanlagen und die friedliche Nutzung der Kernenergie zu gewährleisten.

Der Vertrag über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (Non-Proliferation) wurde 1968 von den fünf Atomwaffenmächten USA, Russland, Frankreich, Großbritannien und der Volksrepublik China sowie mittlerweile 190 Staaten ohne Kernwaffen unterzeichnet und ratifiziert. Die Schweiz gehörte 1968 zu den Unterzeichnerstaaten (Ratifizierung 1977). Lediglich vier Nationen sind derzeit nicht Mitglied des Vertrages: Indien, Israel, Nordkorea und Pakistan.

Im Jahr 2000 hat die Schweiz auch das Zusatzprotokoll zur Nichtverbreitung von Kernwaffen unterzeichnet, welches seit 2005 in Kraft ist. Angesichts des internationalen Terrorismus ist dieser Vertrag von grosser sicherheitstechnischer Bedeutung.

Im Atomwaffensprerrvertrag verzichten die Unterzeichnerstaaten ohne Kernwaffen auf eine atomare Rüstung. Die fünf offiziellen Atomwaffenmächte verpflichten sich im Gegenzug zum Verzicht auf Atomwaffeneinsatz und zur allgemeinen und vollständigen Abrüstung unter strenger und wirksamer internationaler Kontrolle.

Nationale Gesetzgebung

Der Umgang mit Kernmaterialien und Kerntechnologie ist in der Schweizer Gesetzgebung geregelt (Kernenergiegesetz und entsprechende Verordnungen, Exportkontrollen im Kriegsmaterial- und Güterkontrollgesetz und den entsprechenden Verordnungen). Die Safeguardsverordnung regelt insbesondere den Vollzug des Abkommens vom 6. September 1978 zwischen der Schweizerischen Eidgenossenschaft und der Internationalen Atomenergie-Organisa-

tion über die Anwendung von Sicherungsmassnahmen im Rahmen des Vertrages über die Nichtverbreitung von Kernwaffen (Safeguards-Abkommen) und des Zusatzprotokolls vom 16. Juni 2000 zum Safeguards-Abkommen. Die Schweiz kommt damit ihren internationalen Verpflichtungen nach.

Die IAEA bezeichnet mit dem Begriff «Safeguards» die Massnahmen zur Überwachung von Nuklearmaterial. Es handelt sich um organisatorische und sicherungstechnische Massnahmen mit dem Ziel, eine Abzweigung signifikanter Mengen Kernmaterial von friedlichen nuklearen Tätigkeiten für die Herstellung von Atomwaffen und sonstigen Kernsprengkörpern rechtzeitig zu entdecken sowie durch das Risiko frühzeitiger Entdeckung davor abzuschrecken.

Überprüfung

Um die Nichtverbreitung von Kernwaffen bzw. von kerntechnischem Material, das für die Atomwaffenproduktion eingesetzt werden könnte, sicherzustellen, werden sämtliche relevanten Einrichtungen von der IAEA permanent überwacht. Die IAEA kontrolliert die Einhaltung des Vertrags unter anderem durch eine geeignete Videoüberwachung innerhalb der Kernanlagen und durch zusätzliche Vor-Ort-Inspektionen in den kerntechnischen Anlagen. Für die Betreiber der Schweizer Kernkraftwerke und der Zwiilag bedeutet dies u. a., dass die IAEA sämtliche Vorgänge in den relevanten Anlagenteilen während 24 Stunden am Tag per Video aufzeichnet. Die Vor-Ort-Inspektionen werden als Routineinspektionen (angemeldete Inspektionen) oder unangemeldete Kontrollen in beliebigen Kernanlagen im Beisein der Kontrollbehörde, dem Bundesamt für Energie (BFE), durchgeführt. Damit wird sichergestellt, dass sämtliche Handlungen in Übereinstimmung mit den geschlossenen Verträgen und den gesetzlichen Bestimmungen erfolgen. Ausserdem führen die Betreiber detailliert Buch über die Zusammensetzung und Menge von gelagerten Brennelementen und Abfällen. Diese Daten werden in einer zentralen Datenbank laufend nachgeführt.

ZUKUNFT KERNBRENNSTOFF

Entwicklung geht weiter

Die Kernenergie ist eine junge Technologie. Die Geschichte der zivilen Nutzung der Kernenergie beginnt 1957 mit dem Shippingport-Reaktor in den USA, dem eigentlichen Prototyp eines modernen Leichtwasserreaktors. Heute ist die Kernenergie in vielen Ländern der Garant für die Grundversorgung mit Strom. In der Schweiz tragen die eigenen Kernkraftwerke heute rund 40 % zum gesamten Strombedarf bei.

Leichtwasserreaktoren haben Potential

Die heute üblichen Leichtwasserreaktoren nutzen hauptsächlich die durch die Spaltung von Uran 235 freiwerdende Energie. Im Reaktorkern wird aber nicht nur Uran 235 gespalten, sondern es wird durch Neutroneneinfang zugleich Uran 238 in Plutonium umgewandelt. Das Plutonium wird zum Teil wieder gespalten und trägt damit auch zur Stromproduktion bei. Das Plutonium, welches nicht gerade im Brennelement gespalten wird, ist letztlich, falls das Brennelement nicht wiederaufbereitet wird, brachliegende Energie. Diese Energie könnte durch den Einsatz so genannter Brüter-Reaktoren genutzt werden.

Diese Brüter funktionieren auf Basis von Uran 238, das im Natur-Uran zu über 99% enthalten ist. Uran 238 sowohl auch Plutonium sind in verbrauchten Brennstäben in ausreichender Menge vorhanden. Abgesehen davon sind aus der Anreicherung weltweit schätzungsweise 1,5 Mio. Tonnen abgereichertes Uran vorhanden. Würde dieser Rohstoff in Brüterreaktoren zur Energiegewinnung eingesetzt, könnte damit das heutige Volumen der Kernenergieproduktion während mehr als 2000 Jahren gedeckt werden. Prototypen solcher Anlagen wurden bereits gebaut, zum Beispiel in Frankreich, Japan, Russland und Indien. 2010 wurde ein weiterer Prototyp in China in Betrieb genommen.

Thorium als Alternative zu Uran

Sollten die Uranreserven tatsächlich aufgebraucht bzw. zu teuer sein, könnte Thorium als Alternative verwendet werden. Thorium kommt in der Natur rund dreimal häufiger vor als Uran. Das Isotop Thorium 232 lässt sich mittels Neutroneneinfang in spaltbares Uran 233 umwandeln und als Brennstoff einsetzen. Da natürliches Thorium praktisch zu 100% aus Thorium 232 besteht, ist sein Energieinhalt etwa 40-mal höher als jener von Natur-Uran, wie wir es heute verwenden. Thorium-Reaktoren sind z.B. in Indien in Entwicklung.

SCHNELLE BRÜTER: brauchen für den Betrieb grössere Mengen Plutonium. Bereits in den 70er Jahren galten Schnelle Brüter als Reaktoren der Zukunft. In dieser Zeit wurde möglichst aller Brennstoff in die Wiederaufarbeitung geschickt. Mit ein Grund war die Ungewissheit der Reichweite der Uranvorkommen und die Erwartung von Preissteigerungen beim Plutonium. Prototypen von Brüter-Reaktoren der vierten Generation sind heute in verschiedenen Ländern in Betrieb.

.....

GLOSSAR

Wichtige Begriffe in der Kernenergie

GLOSSAR
Wichtige Begriffe in der Kernenergie

Anreicherung Als Anreicherung wird der Prozess zur Erhöhung des Anteils an Uran 235 bezeichnet. Im Natur-Uran ist Uran 235 nur zu 0,7% vorhanden. Damit das Uran als Kernbrennstoff eingesetzt werden kann, muss dieser Anteil auf 4–5% erhöht werden.

Alphastrahler Als Alphastrahler werden Nuklide bezeichnet, die bei ihrem Zerfall Alphastrahlen aussenden. Alphastrahlen bestehen aus Helium-Kernen, sogenannten Alphateilchen.

Isotop Stoffe mit gleicher Anzahl Protonen, aber unterschiedlicher Anzahl Neutronen im Kern bezeichnet man als Isotope. Isotope weisen dieselben chemischen Eigenschaften auf. Aufgrund der unterschiedlichen Kernzusammensetzung sind sie aber unterschiedlich schwer und haben unterschiedliche physikalische Eigenschaften.

IAEA Internationale Atomenergie Agentur. Sie ist die internationale Aufsichtsbehörde über die zivile Nutzung der Kernenergie.

MOX-Brennelemente Misch-Oxid-Brennelemente. Zusätzlich zum Uranoxid enthalten diese Plutoniumdioxid, seltener Thoriumdioxid.

Natur-Uran Als Natur-Uran wird der in der Natur vorkommende Rohstoff bezeichnet. Uran kommt natürlicherweise fast überall im Gestein sowie in riesigen Mengen in den Ozeanen vor.

Neutroneneinfang Als Neutroneneinfang wird eine Kernreaktion bezeichnet, bei der eines oder mehrere Neutronen von einem Atomkern eingefangen werden, ohne dass dabei ein Teilchen mit Ruhemasse ausgestossen wird. Damit steigt die Massenzahl des betreffenden Kerns.

Non-Proliferation Non-Proliferation bezeichnet im Bereich der Kerntechnik die Nicht-Verbreitung von Kernwaffen.

GLOSSAR

Wichtige Begriffe in der Kernenergie

Plutonium 239 Plutonium 239 ist ein Alpha-Strahler, der in der Natur extrem selten vorkommt. Eine Umwandlung von Uran 238 zu Plutonium 239 findet in bestimmtem Umfang in jedem Leichtwasserreaktor statt und trägt infolge der Spaltung der Plutonium 239-Kerne während des Reaktorbetriebs zu über 40 % zur Erzeugung elektrischer Energie bei.

Safeguards Mit diesem Begriff bezeichnet die IAEA alle Massnahmen zur Überwachung von Nuklearmaterial.

Tails Bei der Anreicherung des Uranhexafluorid entstehen fest abgereicherte Rückstände. Diese werden in der Fachsprache Tails genannt.

Uran 235 Der Kern von Uran 235 setzt sich aus 92 Protonen und 143 Neutronen zusammen. Es ist das am leichtesten spaltbare Uran-Isotop.

Uran 238 Der Kern von Uran 238 setzt sich aus 92 Protonen und 146 Neutronen zusammen. Durch Neutroneneinfang und Betazerfall entsteht aus Uran 238 zuerst das kurzlebige Neptunium 239 und anschliessend Plutonium 239.

Yellow Cake Yellow Cake ist ein gelbes, pulverförmiges Gemisch und das erste Zwischenprodukt beim Abbau von Uran-Erzen. Uran wird international in Form von Yellow Cake gehandelt. Yellow Cake ist nur sehr schwach radioaktiv.

Herausgeber:
swissnuclear
Fachgruppe Kernenergie
der swisselectric
Froburgstrasse 17
4601 Olten

September 2012

Alle Rechte vorbehalten. Copyright © 2012

