



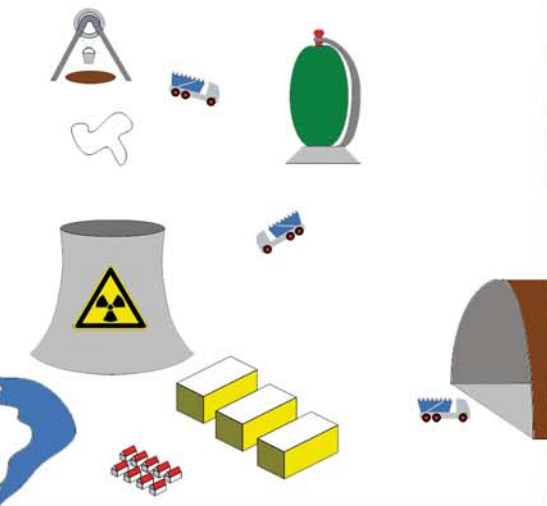
IdPA 2009/2010

Hinter den Kulissen



Kernkraftwerk Mühleberg

Energieeffizienz



Autoren	Kevin Gerber Simon Grossenbacher
Klasse	BMSP 7A
Betreuerin Experte	Sarah Aeschbacher Daniel Wyrsch
Datum	11. Februar 2010
Version	1.1



Autoren: Kevin Gerber, Berner Fachhochschule für Technik und Informatik
Jlcoweg 1, CH-3400 Burgdorf
+41 (34) 426 68 66 / kevin.gerber@bfh.ch

Simon Grossenbacher, Kern AG
Hünigenstrasse 16, CH-3510 Konolfingen
+41 (31) 790 35 51 / sgrossenbacher@kern.ch

Betreuerin: Sarah Aeschbacher, Gewerblich Industrielle Berufsschule Bern
Lorrainestrasse 5, CH-3013 Bern
sarah.aeschbacher@gibb.ch

Experte: Daniel Wyrsh, Gewerblich Industrielle Berufsschule Bern
Lorrainestrasse 5, CH-3013 Bern
+41 (31) 335 94 36 / daniel.wyrsh@gibb.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzzusammenfassung	1
2	Einleitung	2
2.1	Aufgabenstellung	2
2.2	Vorgehensweise	2
2.3	Zielsetzung	2
Allgemein		3
3	Zahlen und Fakten	3
3.1	KKWs in der Schweiz	3
3.2	Weltweit	6
4	Strom in der Schweiz	7
4.1	Anteile Gesamtstromverbrauch	8
4.2	Anteile Gesamtstromerzeugung	8
5	Der Brennstoff Uran	9
5.1	Natürliches Vorkommen	9
5.1.1	<i>Isotope</i>	9
5.2	Anreicherung	10
5.2.1	<i>Methoden</i>	10
5.3	Brennelemente	14
5.4	Kernspaltung	16
5.4.1	<i>Prinzip</i>	16
5.4.2	<i>Spaltungsenergie</i>	17
5.4.3	<i>Steuerstäbe</i>	19
6	Aufbau & Funktionsprinzip	21
6.1	Druckwasserreaktor (DWR)	21
6.1.1	<i>Primärkreislauf</i>	21
6.1.2	<i>Sekundärkreislauf</i>	22
6.2	Siedewasserreaktor	23
7	Radioaktivität & Entsorgung	24
7.1	Schädliche Wirkung	24
7.1.1	<i>Radioaktivität zerstört Zellen</i>	24
7.1.2	<i>Krebsrisiko im Normalbetrieb</i>	25
7.1.3	<i>Super GAU</i>	26
7.2	Entsorgung	27
7.2.1	<i>Entsorgungskonzept der Nagra</i>	27

Energieeffizienz des KKW Mühleberg	30
8 Bau.....	31
8.1 Berechnung	31
8.2 Fehlerabschätzung	31
9 Abbau von Uran.....	32
9.1 Berechnung Uranabbau	32
9.2 Uranaufbereitung	33
9.3 Berechnung Transport.....	34
9.4 Interpretation	35
10 Anreicherung.....	36
10.1 Berechnung	36
10.2 Fehlerabschätzung	38
11 Transport	39
11.1 Berechnung Verbrauch des Frachters	39
11.2 Berechnung Verbrauch des LKWs.....	40
11.3 Interpretation	41
12 Dieserverbrauch Volvo FH16.....	42
13 Kühlung.....	43
13.1 Berechnung	43
13.2 Fehlerabschätzung	44
14 Kernspaltung.....	45
14.1 Berechnung	45
14.2 Fehlerabschätzung	46
15 Betriebsunterhalt	47
15.1 Berechnung Betriebsunterhalt in einem Jahr.....	47
15.2 Fehlerabschätzung	47
16 Entsorgung.....	48
16.1 Berechnung Transport nach Würenlingen	49
16.1.1 Abgebrannte Brennelemente.....	49
16.1.2 Schwach- und Mittelaktive Abfälle.....	50
16.2 Plasmaverbrennungsanlage	50
16.3 Geologisches Tiefenlager	51
16.4 Fehlerabschätzung	51
16.5 Interpretation	52
17 Fazit	53
17.1 Energieerzeugung	53
17.1.1 Eingespeiste Jahresenergie.....	53
17.1.2 Berechnung.....	53
17.1.3 Fehlerabschätzung	54

17.2	Energieaufwand	55
17.2.1	<i>Berechnung</i>	56
17.2.2	<i>Fehlerabschätzung</i>	56
17.3	Energieeffizienz.....	57
17.3.1	<i>Fehlerabschätzung</i>	57
17.4	Vergleich zu anderen Kraftwerken	58
18	Schlusswort	59
Glossar & Quellen		60
19	Glossar	60
20	Quellen	67
20.1	Internet.....	67
20.2	Buch	76
Anhang		77

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 KKW der Schweiz	3
Abb. 2 KKW Beznau AG	4
Abb. 3 KKW Gösgen SO	4
Abb. 4 KKW Leibstadt AG	5
Abb. 5 KKW Mühleberg BE	5
Abb. 6 Alle weltweit betriebene KKW	6
Abb. 7 Steigender Stromverbrauch in der Schweiz (in Mrd. kWh)	7
Abb. 8 Stromverbrauch 2008 in der Schweiz	8
Abb. 9 Stromproduktionsanteile der Schweiz im Jahre 2008	8
Abb. 10 Weltweite Uranreserven in 1000 Tonnen	9
Abb. 11 Trennfaktor	10
Abb. 12 Schema Gasdiffusionsmethode	11
Abb. 13 Schema Zentrifugalverfahren	12
Abb. 14 Schema Lasermethode	13
Abb. 15 Uranoxid-Pellets	14
Abb. 16 Das Brennelement	14
Abb. 17 Kernspaltung	16
Abb. 18 Fragmentierungsmöglichkeiten	17
Abb. 19 Diagramm Bindungsenergie	18
Abb. 20 Schema eines Druckwasserreaktors	21
Abb. 21 Schema eines Siedewasserreaktors	23
Abb. 22 Krebserkrankung	25
Abb. 23 Tschernobyl Super GAU	26
Abb. 24 Zwischenlager ZWILAG hochaktive Abfälle	27
Abb. 25 Zwischenlager ZWILAG mittel- & leichtaktive Abfälle	28
Abb. 26 Geologisches Tiefenlager	29
Abb. 27 Skizze Energieeffizienzüberlegung	30
Abb. 28 Gesteinsmühle	33
Abb. 29 Gemahlenes Uran	34
Abb. 30 Diagramm $V=f(N_p)$	37
Abb. 31 Frachtschiff	39
Abb. 32 Diagramm Verbrauch=f(Gewicht)	42
Abb. 33 Skizze Kühlung	44
Abb. 34 Überwachungszentrale	47
Abb. 35 Modell eines CASTOR Behälters	48
Abb. 36 Schwertransporter mit abgebrannten Brennelementen	49
Abb. 37 Energieerzeugungs-Verluste	54
Abb. 38 Energieaufwand	56

1 Kurzzusammenfassung

In unserer interdisziplinären Projektarbeit mit dem Oberthema: „Hinter den Kulissen“ untersuchen Simon Grossenbacher und Kevin Gerber die Energieeffizienz des Kernkraftwerks Mühleberg. Bei der Berechnung werden folgende Punkte berücksichtigt:

- Bau vom KKW Mühleberg
- Uranabbau
- Urananreicherung
- Transport
- Kühlung
- Kernspaltung
- Turbinen, Generatoren, Transformatoren
- Betriebsunterhalt
- Entsorgung

Bei unserer Berechnung kommen wir auf einen Wirkungsgrad von 40.64% bei der Energieerzeugung und beim Energieaufwand auf extrem hohe 91.42%.

Dies ergibt schlussendlich eine Energieeffizienz von 37.1%.

2 Einleitung

Als Berufsmaturitätsschüler sind wir beauftragt worden, eine interdisziplinäre Projektarbeit zu schreiben. Unter Interdisziplinarität versteht man die Nutzung von Ansätzen, Denkweisen und Methoden verschiedener Fachrichtungen.¹ Bei uns sind es die zwei Fachrichtungen Deutsch und Mathematik.

Das IdPA Oberthema wählten wir als Klasse aus. In mehreren Diskussionen entschlossen wir uns für das Thema „Hinter den Kulissen“.

In einer Zweiergruppe nehmen Simon Grossenbacher und Kevin Gerber die interdisziplinäre Projektarbeit in Angriff.

2.1 Aufgabenstellung

Wir haben uns für das Hauptthema Energieeffizienz vom Kernkraftwerken Mühleberg entschieden. Unter Energieeffizienz versteht man den Faktor, der entsteht, wenn man von der möglichen Energie die nutzbare Energie abzieht.² Unsere gewonnenen Erkenntnisse und Vorgehensweise werden wir in dieser ausführlichen Dokumentation festhalten.

Als angehende Elektroniker interessieren wir uns wie ein Strom erzeugt wird, bevor dieser in unsere Steckdose gelangt. Ausserdem ist dieses Thema sehr umstritten und zurzeit in den Medien präsent, deshalb haben wir uns für diese Herausforderung entschieden.

2.2 Vorgehensweise

Um als erstes einen tieferen Einblick in den komplexen Funktionsablauf eines Kernkraftwerks zu erhalten, werden wir eine Führung im KKW Mühleberg besuchen. Dies werden wir als erstes organisieren und uns in die Materie einarbeiten, mit dem Ziel an der Führung bereits ein breites Wissen zu haben. Wir haben entschieden, in einem ersten Teil das Grundwissen, das für die Berechnungen und das Verständnis vorausgesetzt wird, zu erläutern. Um den Urankreislauf besser nachvollziehen zu können, werden wir mit mehreren Fachleuten Kontakt aufnehmen und ihnen Fragen stellen.

2.3 Zielsetzung

In dieser Dokumentation werden wir die folgenden Leitfragen beantworten:

- Wie effizient ist das Kernkraftwerk Mühleberg?
- Wie viel der möglichen Energie der Brennstäbe kann in elektrischen Strom umgesetzt werden?
- Wie gross ist der Energieaufwand des KKW Mühlebergs unter Berücksichtigung der Herstellung, Transportwege und Entsorgung?

¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Interdisziplinarit%C3%A4t>, (5. Jan 10)

² <http://de.wikipedia.org/wiki/Energieeffizienz>, (5. Jan. 10)

Allgemein

3 Zahlen und Fakten

3.1 KKWs in der Schweiz

In der Schweiz gibt es heute insgesamt vier Kernkraftwerke. Diese vier Kernkraftwerke haben insgesamt fünf Reaktorblöcke, welche zusammen eine Bruttogesamtleistung von 3'372 MW aufweisen.

Das erste Kernkraftwerk der Schweiz wurde am 17. Juli 1969 in Betrieb genommen. Dies war der Reaktorblock Beznau 1 und ist heute immer noch im Betrieb.

Mit einer Bruttogleistung von 1'220 MW ist das Kernkraftwerk Leibstadt das leistungstärkste Kernkraftwerk der Schweiz.³



Abb. 1 KKW der Schweiz⁴

³ <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/861002#Schweiz>, (24. Sep. 09)

⁴ http://www.nuklearforum.ch/_upl/files/2009_PDF_DATEN_FAKTEN_dt.pdf, (24. Sep. 09)

**KKW Beznau AG⁵**

Anz. Reaktoren:	2
Reaktortype:	Druckwasserreaktor
Status:	In Betrieb 1969/71
Bruttoleistung:	380 / 380 MW
Kühlung:	Flusswasser

**KKW Gösgen SO⁶**

Anz. Reaktoren:	1
Reaktortype:	Druckwasserreaktor
Status:	In Betrieb seit 1979
Bruttoleistung:	970 MW
Kühlung:	Kühlturm

⁵ <http://www.schutthalde.ch/sellafeld/images/beznau.jpg>, (24. Sept. 10)

⁶ <http://www.schutthalde.ch/sellafeld/images/goesgen.jpg>, (24. Sept. 10)

**KKW Leibstadt AG⁷**

Anz. Reaktoren:	1
Reaktortype:	Siedewasserreaktor
Status:	In Betrieb seit 1984
Bruttoleistung:	1'220 MW
Kühlung:	Kühlturm

**KKW Mühleberg BE⁸**

Anz. Reaktoren:	1
Reaktortype:	Siedewasserreaktor
Status:	In Betrieb seit 1971
Bruttoleistung:	390 MW
Kühlung:	Flusswasser

⁷ <http://www.schutthalde.ch/sellafield/images/leibstadt.jpg>, (24. Sept. 10)

⁸ <http://www.schutthalde.ch/sellafield/images/muhleberg.jpg>, (24. Sept. 10)

3.2 Weltweit

Im Januar 2009 gab es auf der ganzen Welt insgesamt 212 aktive Kernkraftwerke. Diese haben zusammen 438 Reaktorblöcke und weisen eine Gesamtleistung von 371'576 MW auf. Das Land mit den meisten Kernkraftwerken ist die USA. Sie haben 65 aktive Kernkraftwerke. In Europa ist Frankreich am stärksten vertreten mit insgesamt 20 Kernkraftwerken.⁹

Ende Januar 2009 befanden sich 44 neue Kernkraftwerke im Bau.¹⁰

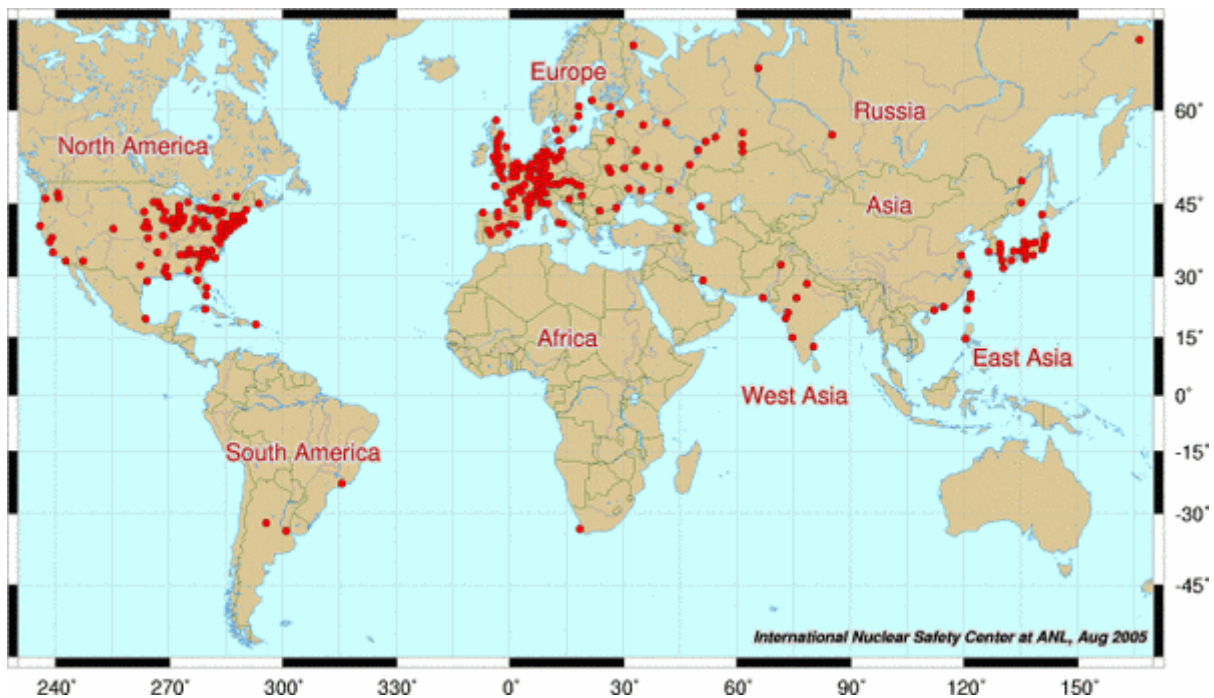


Abb. 6 Alle weltweit betriebene KKW¹¹

⁹ <http://dic.academic.ru/dic.nsf/dewiki/861002#Schweiz>, (24. Sep. 09)

¹⁰ <http://dic.academic.ru/dic.nsf/dewiki/861002#Schweiz>, (24. Sep. 09)

¹¹ <http://www.enprimus.de/typo3temp/pics/798e98c1e0.png>, (24. Sep. 09)

4 Strom in der Schweiz

Die andauernde Zunahme der Bevölkerungszahlen führt unweigerlich zu einem grösseren Energiebedarf.

Die Argumente der Grünen beruhen hauptsächlich darauf, dass durch neue Techniken der weltweite Stromverbrauch im Privathaushalt und in der Industrie gesenkt werden könnte. Dies wäre so auch möglich, doch die Realität zeigt etwas anderes. Der Stromverbrauch stieg in den letzten Jahren weiter an und wird in den nächsten Jahren noch weiter steigen.

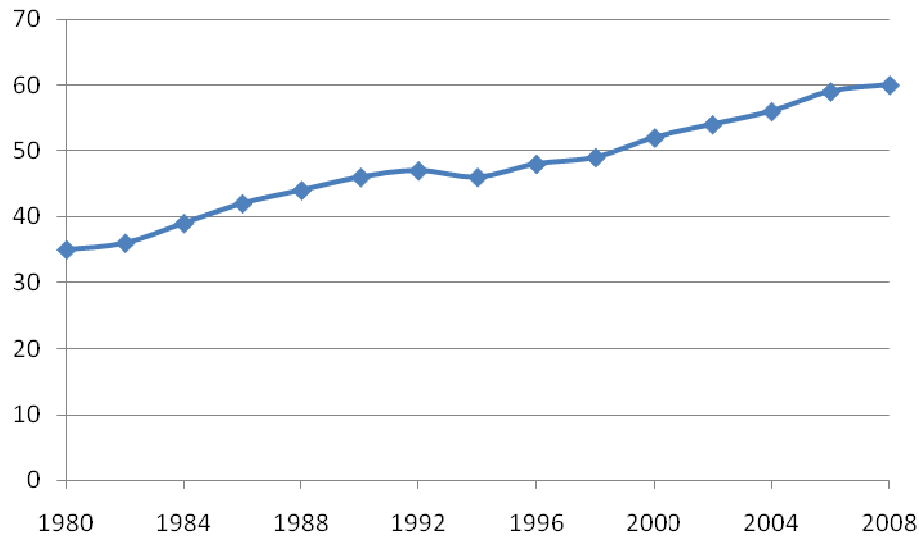


Abb. 7 Steigender Stromverbrauch in der Schweiz (in Mrd. kWh)¹²

¹² http://www.vbe-schweiz.ch/medien/pdfdateien/pdf_all/Contra_Stromfresser.pdf, (1. Okt. 09)

4.1 Anteile Gesamtstromverbrauch

Die grössten Kunden der Elektrizitätswerke bilden die Industrie, der Haushalt und die Dienstleistungen. Der Verkehr und die Landwirtschaft haben vergleichsweise einen kleinen Bedarf an elektrischer Energie. Ein wichtiger Grund hierfür ist, dass sie hauptsächlich die Energie aus Fossilen Brennstoffen nutzen und nicht aus der Steckdose. Das ist z.B. Benzin oder Diesel für die Fahrzeuge.

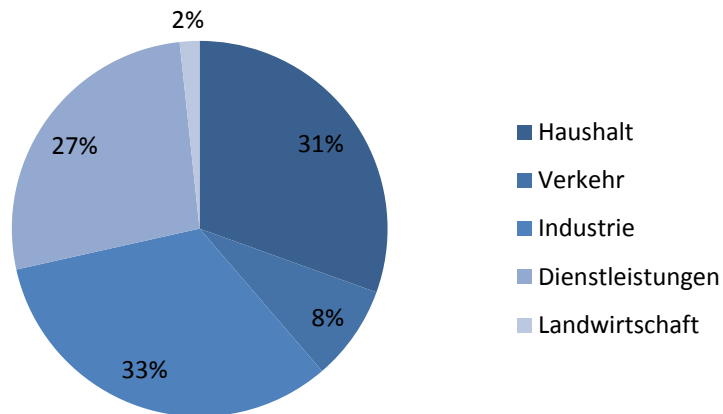


Abb. 8 Stromverbrauch 2008 in der Schweiz¹³

4.2 Anteile Gesamtstromerzeugung

Die Kernenergie hat in der Schweiz einen Anteil von 40% an der Gesamtstromerzeugung. Der grösste Energielieferant ist mit 57% die Wasserkraft. Vergleichsweise wenig machen die erneuerbaren Energiequellen, wie z.B. Wind und Sonnenenergie aus.

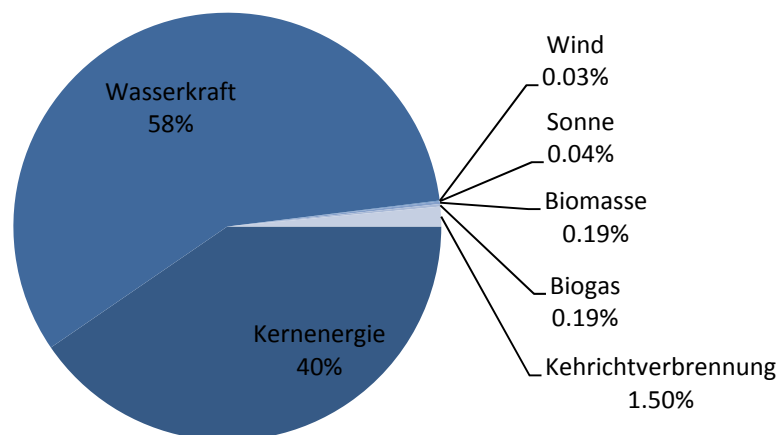


Abb. 9 Stromproduktionsanteile der Schweiz im Jahre 2008¹⁴

¹³ http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=de&dossier_id=00768, (1. Okt. 09)

¹⁴ http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=de&dossier_id=00768, (1. Okt. 09)

5 Der Brennstoff Uran

Bei Kernkraftwerken wird als Brennstoff Uran verwendet. Uran ist ein radioaktives Schwermetall mit der Ordnungszahl 92. Im Periodensystem gehört es zur Gruppe der Actinoide.¹⁵

5.1 Natürliches Vorkommen

In der Natur kommt Uran elementar vor. Nach Angaben der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung der Industrieländer (OECD) reichen die bekannten abbaubaren Uranreserven beim heutigen Verbrauch für die nächsten 100 Jahre.¹⁶



Abb. 10 Weltweite Uranreserven in 1000 Tonnen¹⁷

Das tatsächliche Uranvorkommen auf der Welt ist aber bedeutend höher. Doch einen Abbau dieser Reserven, für einen Kilogrammpreis von 130 US Dollar (rund 134 CHF¹⁸), ist wirtschaftlich gesehen nicht rentabel. Neigen sich jedoch die jetzigen Uranquellen dem Ende zu, so wird durch Angebot und Nachfrage der Verkaufspreis steigen und man wird neue Uranminen erschliessen.¹⁹

5.1.1 Isotope

Uran kommt in zwei verschiedenen Isotopen in der Natur vor. Als ^{238}U und ^{235}U . Jedoch ist der Anteil dieser beiden Isotope nicht ausgeglichen, denn 99.3% des gesamten Uranvorkommens besteht aus ^{238}U und die Restlichen 0.7% sind ^{235}U . Da sich aber nur das ^{235}U für die Kernspaltung eignet, ist es nötig dieses anzureichern.

$$99.3\% \rightarrow {}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow 0.7\% \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U}$$

¹⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran>, (1. Okt. 09)

¹⁶ <http://kernenergie.ch/de/ressource-uran.html>, (1. Okt. 09)

¹⁷ <http://kernenergie.ch/de/ressource-uran.html>, (1. Okt. 09)

¹⁸ Wechselkurs: 1.03 CHF, (5. Jan. 10)

¹⁹ <http://kernenergie.ch/de/ressource-uran.html>, (1. Okt. 09)

5.2 Anreicherung

Unter der Anreicherung von Uran versteht man im Grunde genommen eine technische Isotopentrennung. In einer Urananreicherungsanlage wird das Natururan, bestehend aus 99.3% ^{238}U und 0.7% ^{235}U , in zwei Fraktionen geteilt. Der eine Teil weist einen höheren Anteil der Uranisotops ^{235}U als der Ausgangsstoff auf, er wurde angereichert. Beim zweiten Teil spricht man von einem abgereicherten Uran, dessen Gehalt vom spaltbaren Uran verkleinert wurde.

Die gängigsten Typen der Kernreaktoren werden meistens mit Uran betrieben, dessen ^{235}U -Gehalt auf 3% bis 5% erhöht worden ist. Bei der Anreicherung einer Tonne dieses Urans, entsteht als Nebenprodukt insgesamt um die 5.5 Tonnen abgereichertes Uran. Dieses abgereicherte Uran besitzt eine sehr hohe Dichte und wird deshalb als Ausgleichsgewichte z.B. in Flugzeugtragflächen oder als Munition weiterverarbeitet. Für solche Zwecke werden aber bisher nur etwa 5% des anfallenden abgereicherten Urans genutzt, der Rest wird eingelagert.

Für Kernwaffen benötigt man hochangereichertes Uran, dessen Gehalt vom spaltbaren Uran mindestens 85% beträgt.²⁰

5.2.1 Methoden

Es gibt mehrere Möglichkeiten Uran anzureichern. Einige Methoden werden heute industriell eingesetzt, andere sind nur für Versuchszwecke aufgebaut worden.

Ein wichtiger Faktor bei der Anreicherung von Uran bei allen Methoden ist der Trennfaktor. Er sagt aus, um wie viel das Uran pro Anreicherungsstufe angereichert wird.

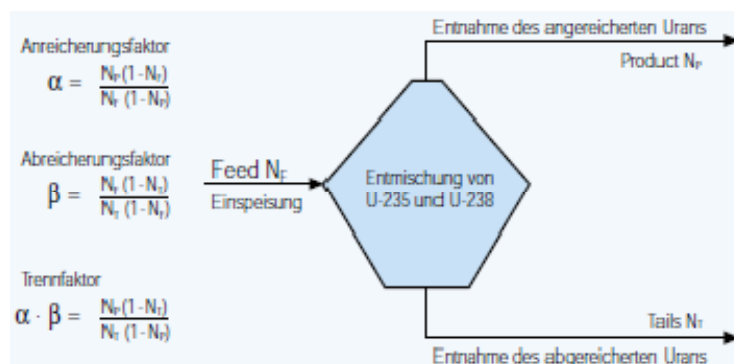


Abb. 11 Trennfaktor²¹

Der Trennfaktor alleine sagt aber noch nichts über die Leistungsfähigkeit eines Trennelementes aus. Darum ist die Trennleistung (auch Trennarbeit genannt) noch von hoher Wichtigkeit. Sie hängt davon ab, wie viel Uran in Kilogramm unter gewissen Umständen (^{235}U Konzentrationen des Ursprungsurans, des abgereicherten Urans und des angereicherten Urans) hergestellt werden kann.

$$\sigma U = P \cdot V(N_P) + V(N_T) - V(N_F)$$

Die Einheit für die Trennleistung ist entweder kg UTA (Urantrennarbeit) oder SWU (Separative Work Unit), wobei sich im deutschsprachigen Raum kg UTA durchgesetzt hat.

²⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Anreicherung>, (6. Okt. 09)

²¹ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

Bei den gebräuchlichsten Isotopentrennverfahren (Gasdiffusionsmethode / Zentrifugal-methode) wird das Verfahrensgas Uranhexafluorid (UF_6) eingesetzt. Diese chemische Verbindung ist die einzige, die bei Zimmertemperatur und einem Dampfdruck von ca. 100mbar eine ausreichende Flüchtigkeit besitzt. Ausserdem besitzt Fluor den Vorteil, dass es nur ein Isotop hat und somit die Uranisotopentrennung nicht durch eine Fluorisotopentrennung beeinträchtigt wird. Die eigentliche Teilung der beiden Isotope ermöglicht dann ihre Massendifferenz von 0.85%.²²

$$\Delta m_{\%} = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \cdot 100 = \frac{(6 \cdot 19u + 238u) - (6 \cdot 19u + 235u)}{(6 \cdot 19u + 238u)} \cdot 100 = \underline{\underline{0.85\%}}$$

5.2.1.1 Gasdiffusionsmethode

Das physikalische Grundprinzip auf welches diese Methode basiert, ist die Diffusionsgeschwindigkeit. Dabei wird ausgenützt, dass das $^{235}\text{UF}_6$ gering schneller diffundiert als das $^{238}\text{UF}_6$.²³

Die Anreicherung läuft wie folgt ab. Es wird unangereichertes UF_6 in eine, sich unter hohen Druck befindende, Kammer geleitet. Gerade anschliessend an diese Kammer befindet sich eine weitere, die aber einen tieferen Druck aufweist. Diese beiden Kammern sind durch eine Membrane verbunden. Die $^{235}\text{UF}_6$ Isotope wandern geringfügig schneller durch die Membrane hindurch in die zweite Kammer als das schwere Isotop. Auf diese Weise gelangen etwa 50% der eingespiessenen UF_6 Isotope in die zweite Kammer, in welcher sich nun leicht angereichertes UF_6 befindet. Das restliche abgereicherte Uran fliesst an den Membranen vorbei.

Da der Trennfaktor dieser Anreicherungsmethode mit 1.0042 sehr gering ist, müssen ca. 1200 solcher Stufen hintereinander geschaltet werden (Kaskade).

$$\alpha \cdot \beta = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \sqrt{\frac{19u \cdot 6 + 238u}{19u \cdot 6 + 235u}} = \underline{\underline{1.0042}}$$

Der grosse Vorteil dieses Verfahrens ist der riesige Materialdurchsatz. Aus diesem Grund wird diese Methode heute, trotz einem Arbeitsaufwand von ca. 2400 kWh/kg UTA, noch eingesetzt.²⁴

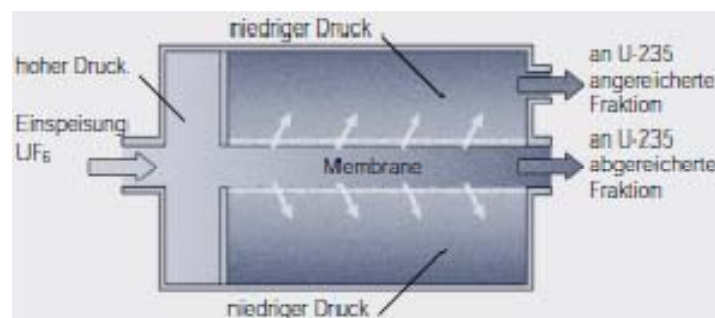


Abb. 12 Schema Gasdiffusionsmethode²⁵

²² <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

²³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Gasdiffusionsverfahren>, (14. Dez. 09)

²⁴ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

²⁵ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

5.2.1.2 Zentrifugalmethode

Dieses Verfahren nutzt die geringe Massedifferenz zwischen den beiden Uranhexafluorid Isotope, um die beiden Isotope zu trennen.

Der Vorgang der Trennung erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst wird das unangereicherte UF_6 in einen Rotor geleitet, der mit etwa 90'000 Umdrehungen pro Minuten dreht. Das eingeleitete Gas wird von der Rotorwand mitgerissen und rotiert nun annähernd mit der gleichen Geschwindigkeit. Durch das schnelle Drehen entstehen Zentrifugalkräfte, die zur Auswirkung haben, dass sich die schweren $^{238}\text{UF}_6$ an der Rotorwand und die leichteren $^{235}\text{UF}_6$ in der Mitte sammeln. Nun hat man die Isotope im Prinzip getrennt. Man kann den Effekt aber noch verstärken, wenn man zusätzlich zu der radialen noch eine axiale Entmischung dazu fügt. Dies wird meist durch ein Temperaturgefälle realisiert, das dazu führt, dass sich nun der grösste Konzentrationsunterschied zwischen den beiden Enden des Rotors befindet. Bezogen auf die Abb. 13 Schema Zentrifugalverfahren sammelt sich das $^{235}\text{UF}_6$ am unteren Ende des Rotors, wo es danach mit Hilfe von Rohren abgeführt wird.

Die Zentrifugalmethode besitzt gegenüber der Gasdiffusionsmethode einige schwerwiegende Vorteile. Zum einen wäre da der viel grössere Trennfaktor und zum andern der viel geringere Energieaufwand von ca. 50 kwh/kg UTA. Die Gründe, warum nicht in allen grossen Anreicherungsanlagen die Zentrifugalmethode Vorrang vor der Gasdiffusionsmethode bekommt, sind die Tatsachen, dass sie einen viel geringeren Materialdurchsatz besitzt und ein höherer Wartungsaufwand von Nöten ist.^{26,27}

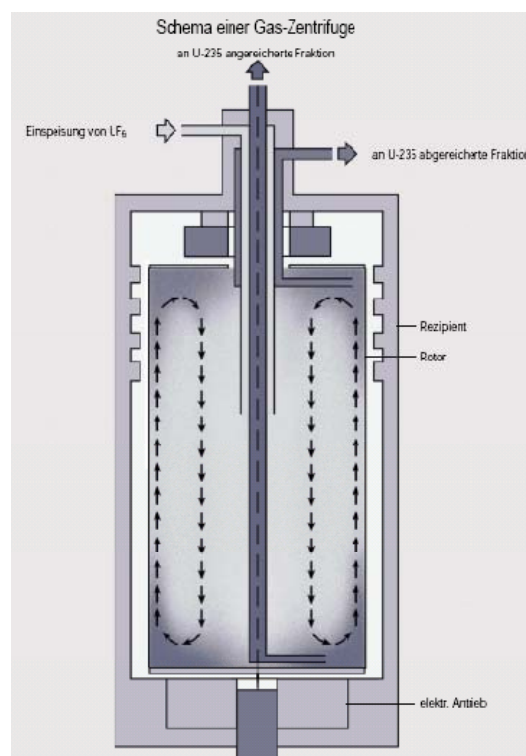


Abb. 13 Schema Zentrifugalverfahren²⁸

²⁶ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

²⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Anreicherung>, (12. Dez. 09)

²⁸ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

5.2.1.3 Lasermethode

Die Lasermethode ist sicher die Zukunft in der Urananreicherung. Sie unterscheidet sich in den meisten Punkten vollkommen von der Gasdiffusions- und Zentrifugalmethode. Hier macht man sich die physikalische Eigenschaft zu Nutzen, dass verschiedene Isotope unterschiedliche Absorptionsspektren besitzen. So ist es möglich, durch eine schmalbandige Lichtquelle die Atome isotopenselektiv anzuregen (das Uran wird vorher so stark erhitzt, dass es verdampft). Die Trennung erfolgt dann durch Ionisierung des Atoms mit Hilfe eines weiteren Laserstrahls. Um die Isotope nun auch physikalisch trennen zu können, wird ein elektrisches Feld benutzt. Durch die enorme hohe Hitze (1400°C) ist das angereicherte Uran flüssig.

Es gibt noch diverse andere Laserprinzipien, welche aber entweder nicht über einen Funktionsversuch heraus kamen, oder unter strengster Geheimhaltungspflicht stehen.²⁹

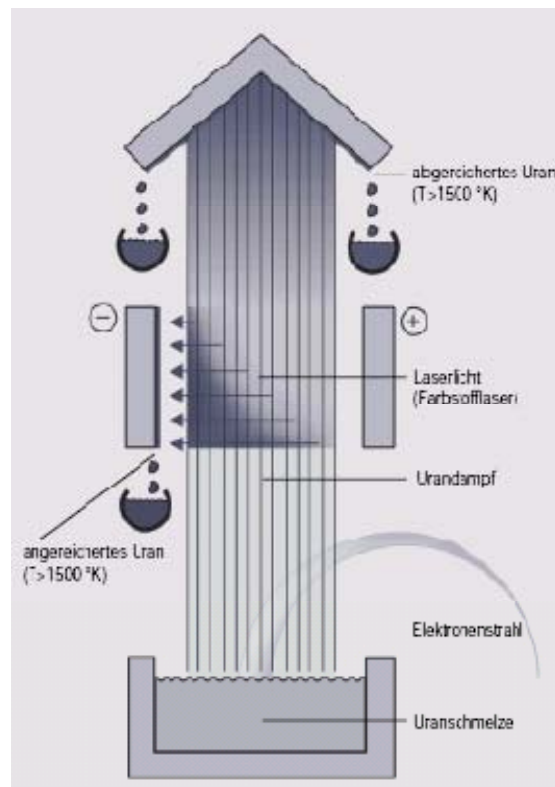


Abb. 14 Schema Lasermethode³⁰

²⁹ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

³⁰ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

5.3 Brennelemente

Das angereicherte Uran verlässt die Anreicherungsanlage in Form von kleinen Uranoxid-Pellets. Diese sind ungefährlich, weil sie praktisch keine radioaktiven Strahlungen abgeben. Aus zwei solchen Uranoxid-Pellets lässt sich so viel Strom erzeugen, wie ein Vierpersonen Haushalt pro Jahr verbraucht.³¹



Abb. 15 Uranoxid-Pellets³²

Diese Uranoxid-Pellets werden aufeinander gestapelt und in eine Leichtmetalllegierung eingeschlossen. Diese Hülle sorgt dafür, dass der Kernbrennstoff von Kühlmittel getrennt bleibt und die entstehenden Spaltprodukte nicht in das Kühlwasser gelangen können.

Ein Brennelement besteht aus mehreren sogenannten Brennstäben. Sie haben eine Länge von genau 4.5 Meter. Im Kernkraftwerk Mühleberg besteht jedes Brennelement aus insgesamt 100 Brennstäben. Davon sind allerdings nur 92 mit Uranoxid-Pellets bestückt.³³



Abb. 16 Das Brennelement³⁴

³¹ <http://kernenergie.ch/de/energieeffizienz.html>, (19. Nov. 09)

³² http://kernenergie.ch/upload/cms/user/KKG_Pellets_auf_Hand2.jpg, (19. Nov. 09)

³³ Führung KKW Mühleberg, (14. Nov. 09)

³⁴ <http://www.ers-kleinblittersdorf.homepage.t-online.de/home/akw-brennelement.jpg>, (19. Nov. 09)

Ein solches Brennelement kostet ungefähr eine halbe Million Dollar (das sind rund 516'000 CHF³⁵). Beachten muss man, dass dazu noch einmal eine halbe Million für die Entsorgung aufgewendet werden muss. Die Brennelemente bleiben ungefähr vier bis fünf Jahre im Einsatz. Dann ist ihr spaltbares Urangehalt zu tief und sie müssen ersetzt werden. Die abgebrannten Brennelemente werden in der jährlichen Revision ersetzt. Alle Brennstäbe, die neuen und die noch brauchbaren werden umverteilt, damit die neuen Brennelemente in der Mitte sind und die ältesten am Rand.³⁶

³⁵ Wechselkurs: 1.03 CHF, (5. Jan. 10)

³⁶ Führung KKW Mühleberg, (14. Nov. 09)

5.4 Kernspaltung

Die gesamte Energiegewinnung in einem KKW basiert auf der Kernspaltung. Die Tatsache das sich Atome (griechisch atomos = unteilbar) spalten lassen, wurde erst im Jahre 1938 von deutschen Wissenschaftlern entdeckt und galt dazumal als bahnbrechende Entdeckung. Jedoch lassen sich nicht alle Atome ohne weiteres spalten, sondern nur einige schwere Atomkerne (darunter auch $^{235}\text{Uran}$).³⁷

5.4.1 Prinzip

Eine Vorgabe, die erfüllt sein muss, ist die Tatsache, dass der zu spaltende Atomkern genügend schwer sein muss. Nur wenn das gegeben ist, können die entstehenden Kerne fester gebunden sein als der Ursprüngliche, sprich sie haben Energievorteile.

Es gibt zwei verschiedenen Arten wie eine Spaltung ausgelöst werden kann:

- Spontane Kernspaltung
- Induzierte Kernspaltung

Einige Atomkerne (Nuklide) spalten sich ohne äussere Einflüsse von selbst. Die Kernspaltung ist dabei eine Art des radioaktiven Zerfalls dieser Nuklide. Da diese Art der Kernspaltung selbständig erfolgt und somit nicht kontrollierbar ist, ist sie nicht in der Energiegewinnung zu gebrauchen.

Interessanter ist da schon die induzierte Kernspaltung. Im Grunde wird dabei ein Neutron freigesetzt, das dann ein Atom trifft. Dieses absorbiert das Neutron und gewinnt dadurch an Bindungsenergie und eventuell auch noch an kinetischer Energie. Das anschliessende Verhalten des Atomkerns nach der Absorption ist spezifisch. Handelt es sich um ein spaltbares Nuklid, so gerät dieses in einen angeregten Zustand und teilt sich in zwei Teile (Spaltprodukte) und gibt dabei selber wiederum Neutronen frei (typisch 2 bis 3 Neutronen). Es ist aber auch möglich, dass sich der Kern anstatt zu spalten in einen stabileren Zustand begibt. Die entstehenden Spaltprodukte müssen nicht immer dieselben sein. Es sind jeweils mehrere Fragmentierungen möglich, welche jedoch zusammen immer dieselbe Kernladungszahl und Massezahl besitzen wie der Ursprungskern.³⁸

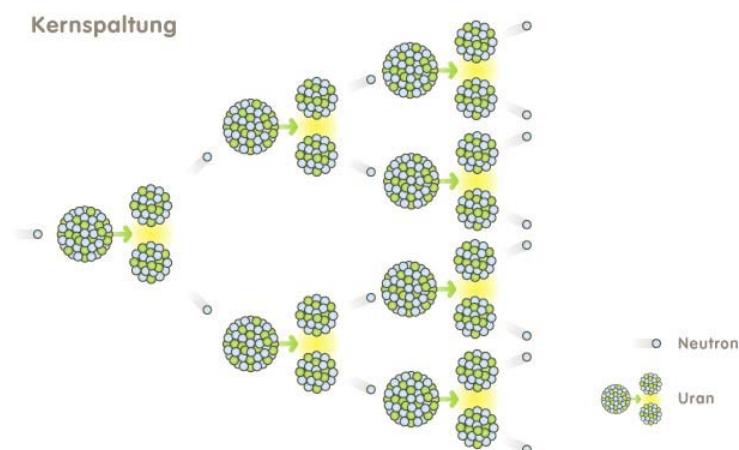


Abb. 17 Kernspaltung³⁹

³⁷ <http://www.kernenergie.ch/de/kernspaltung.html>, (8. Jan. 10)

³⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung>, (8. Jan. 10)

³⁹ http://www.kernenergie.ch/upload/cms/user/Kernspaltung_d.pdf, (8. Jan. 10)

5.4.1.1 Kernspaltung Beispiel mit Uran -235

Wird dem Nuklid ^{235}U ein Neutron hinzugefügt, so entsteht das Nuklid ^{236}U , das sehr instabil ist und sich darum spaltet. Aus dem Atomkern ^{236}U entstehen durch die Spaltung zwei Spaltprodukte. Ihre Massezahl muss in der Summe gleich gross sein wie jene des ^{236}U Nuklids. Die Aufteilung ist dabei nicht immer dieselbe.

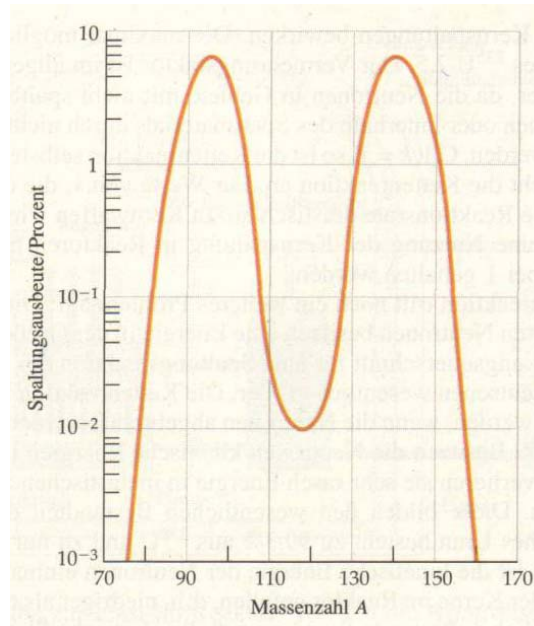
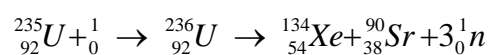
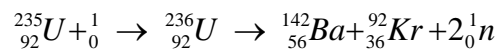


Abb. 18 Fragmentierungsmöglichkeiten⁴⁰

Wie man aber in der Abb. 18 Fragmentierungsmöglichkeiten erkennen kann, gibt es zwei Fragmentierungen die besonders häufig vorkommen: ^{142}Ba (Barium), ^{92}Kr (Krypton) und $2n$ (Neutronen) oder ^{134}Xe (Xenon), ^{90}Sr (Strontium) und $3n$ (Neutronen).⁴¹



5.4.2 Spaltungsenergie

Die ganze Energiegewinnung beruht auf dem Massendefekt, welcher beschreibt, wie sich der Unterschied zwischen der Summe aller Nukleonen (Protonen und Neutronen) Massen zu derer des Atomkerns verhält. Die gemessene Masse des Atomkerns ist dabei immer kleiner als jene der Nukleonen. Da aber laut dem Gesetz der Physik keine Masse verloren werden darf, geht man davon aus, dass die Differenz in Energie umgewandelt wird.

Bezogen auf die Kernspaltung verhält es sich so, dass wenn sich ein schwerer Atomkern spaltet zwei Spaltprodukte mit mittlerer Masse entstehen. Diese besitzen jeweils eine tiefere Bindungsenergie als der Ursprungsatomkern. Die Differenz der ursprünglichen Bindungsenergie zu der Bindungsenergie eines Spaltprodukts ergibt dann die gewonnene Energie.

⁴⁰ Buch: Physik von Paul A. Tiber (S.1407)

⁴¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung>, (13. Dez. 09)

5.4.2.1 Beispiel anhand des Atoms Uran-235

Folgendes Beispiel soll die erwähnte Theorie etwas näher bringen:⁴²

1. Bei der Kernspaltung von Uran wird ein ^{235}U Nuklid und ein Neutron benötigt. Zusammen ergibt dies eine Massezahl von 236.

$$n_{\text{Nukleonen}} = n_{^{235}\text{U}} + n_{\text{N}} = 235 + 1 = 236$$

2. Aus der Abb. 19 Diagramm Bindungsenergie kann man nun die Bindungsenergie herauslesen. Bei einer Massenzahl von 236 ergibt dies 7.6 MeV pro Nukleon. Die gesamte Bindungsenergie eines 236 Nuklids beträgt somit 1793.6 MeV.

$$E_{^{236}\text{U}} = E_{236} \cdot n_{\text{Nukleonen}} = 7.6 \text{ MeV} \cdot 236 = 1793.6 \text{ MeV}$$

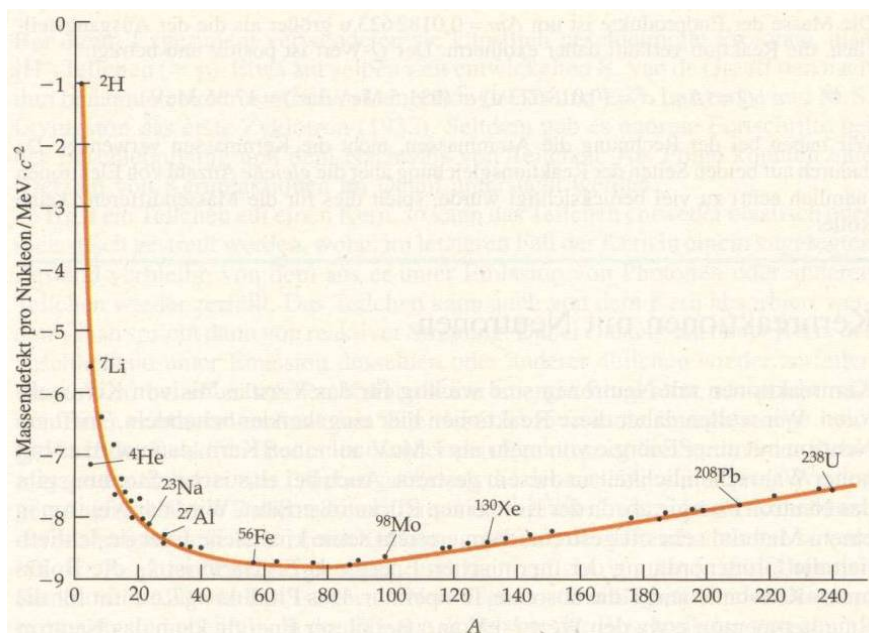


Abb. 19 Diagramm Bindungsenergie⁴³

3. Bei der Kernspaltung entstehen zwei Spaltprodukte, welche zusammen die Massenzahl 236 haben müssen. Wir nehmen an, dass sich das 236 Nuklid genau halbiert, also zwei Spaltprodukte mit jeweils einer Massenzahl von 117 entstehen.

$$n_{\text{Spaltprodukt}} = \frac{n_{\text{Nukleonen}}}{2} = \frac{236}{2} = 117$$

4. Nun kann man die Bindungsenergie des entstandenen Spaltproduktes aus dem Diagramm herauslesen. Dies ergibt eine Bindungsenergie von 8.6 MeV pro Nukleon. Die gesamte Energie die ein Spaltprodukt besitzt, ist demzufolge 117-mal höher, also 1006.2 MeV.

$$E_{\text{Spaltprodukt}} = E_{117} \cdot n_{\text{Spaltprodukte}} = 8.6 \text{ MeV} \cdot 117 = 1006.2 \text{ MeV}$$

5. Jetzt sind alle Angaben vorhanden, um die Energie zu berechnen, die bei einer Kernspaltung zusammen kommt.

$$E_{\text{Kernspaltung}} = 2 \cdot E_{\text{Spaltprodukt}} - E_{^{236}\text{U}} = 2 \cdot 1006.2 \text{ MeV} - 1793.6 \text{ MeV} = \underline{\underline{218.8 \text{ MeV}}}$$

⁴² Buch: Physik von Paul A. Tiber (S.1406)

⁴³ Buch: Physik von Paul A. Tiber (S.1406)

Vergleicht man den erhaltenen Wert von 218.8MeV mit der freigesetzten Energie bei einer Verbrennungsreaktion eines Sauerstoffmoleküls von 4MeV⁴⁴, so wird deutlich, wie hoch die entstandene Energie ist.

Jedoch kann die Energie nicht direkt genutzt werden. Die nutzbare kinetische Energie ist erst ein Produkt des folgenden Vorgangs. Dabei stoßen sich die beiden Spaltprodukte ab (beide positiv geladen) und treiben mit hoher Geschwindigkeit auseinander. Anschließend werden sie vom umliegenden Material abgebremst und erzeugen Reibungswärme, die dann das umliegende Material erwärmt. Diese Wärme kann nun genutzt werden.

5.4.3 Steuerstäbe

Wie man auf der Abb. 17 Kernspaltung sehr gut erkennt, entwickelt sich die Anzahl der Kernspaltungen exponentiell. Dieses Verhalten wird bei Atombomben verwendet um in-nerst kürzester Zeit riesige Mengen von Energie freizusetzen. Hingegen bei einem KKW ist dieses Phänomen eher kontraproduktiv.

Um ein unkontrolliertes Kernspalten zu verhindern, setzt man daher sogenannte Steuerstäbe ein. Diese müssen die Eigenschaft besitzen überzählige Neutronen zu absorbieren. Typische Materialien, die dabei zum Einsatz kommen, sind Cadmium, Gadolinium und Bor.

Ein Kernreaktor kann sich hinsichtlich der Anzahl Kernspaltungen in verschiedenen Zuständen befinden:⁴⁵

- Kritisch ($k=1$): Dies ist der normale Zustand eines KKW und wird auch stationärer Betrieb genannt. Dabei werden überzählige Neutronen von den Steuerstäben absorbiert, so dass immer genau gleich viele freie Neutronen vorhanden sind.
- Unkritisch ($k<1$): Dieser Zustand wird für das Abschalten eines KKW verwendet. Im Gegensatz zu dem kritischen Zustand werden hier die freien Neutronen vermindert, bis keine mehr übrig sind, oder die erwünschte Energieverminderung erreicht ist.
- Überkritisch ($k>1$): Genau das Gegenteil des unkritischen Modus. Die Anzahl freier Neutronen wird erhöht. Erfolgt dieser Vorgang zu schnell, spricht man von einem prompt überkritischen Reaktor. Befindet sich der Reaktor erstmals in diesem Zustand ist er nicht mehr kontrollierbar.

Steuerstäbe alleine würden aber noch nicht reichen um ein KKW wirkungsvoll zu steuern, denn sie sind viel zu träge (jede Millisekunde entsteht eine neue Neutronengeneration). Nur Dank sogenannten trägen Neutronen ist eine mechanische Regelung überhaupt möglich. Sie entstehen nicht etwa bei der Kernspaltung selber, sondern sind ein Produkt der Spaltprodukte. Diese geben durch den natürlichen Zerfall alle 14 Sekunden ein Neutron ab. Diese mischen sich mit den Neutronen, die bei der Kernspaltung entstehen (nur 0.65% der Mischung sind träge Neutronen) und bremsen diese ab.⁴⁶

Ohne die trägen Neutronen und mit einem Vermehrungsfaktor von 1.001, würde sich alle 0.69s die Zahl der Neutronen verdoppeln.

$$n = \frac{\ln(2)}{\ln(k)} = \frac{\ln(2)}{\ln(1.001)} = 693$$

$$t_{\text{Verdoppelung}} = n \cdot t = 693 \cdot 1ms = 0.69s$$

⁴⁴ Buch: Physik von Paul A. Tiber (S.1407)

⁴⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernreaktor>, (8. Jan. 10)

⁴⁶ Buch: Physik von Paul A. Tiber (S.1409)

Nimmt man nun noch die trägen Neutronen hinzu und errechnet die Dauer zwischen den Generationen, so ergibt das nun schon eine Zeit von 92ms.

$$t_{\text{Durchschnitt}} = N_{K_Neutronen} \cdot t_{G1} + N_{T_Neutronen} \cdot t_{G2} = 0.9935 \cdot 1ms + 0.0065 \cdot 14s = 92ms$$

Da die Zeit zwischen den Neutronengenerationen 92mal länger ist als vorher, ergibt das natürlich auch eine andere Zeit bei der Verdoppelungsrate.

$$t_{\text{Verdoppelung}} = n \cdot t_{\text{Durchschnitt}} = 693 \cdot 92ms = \underline{\underline{58.78s}}$$

Diese Zeit reicht aus für eine mechanische Regelung.

6 Aufbau & Funktionsprinzip

Das Funktionsprinzip eines Kernkraftwerkes ist grundsätzlich genau das gleiche wie bei anderen thermischen Kraftwerken, wie z.B. einem Kohlekraftwerk. Durch Wärme-
produktion wird beispielsweise Wasser zum Verdampfen gebracht. Der Wasserdampf treibt eine Turbine an, die mit einem Generator verbunden ist und eine Ladungstrennung verursacht.

6.1 Druckwasserreaktor (DWR)

Bei einem Druckwasserreaktor wird leichtes Wasser (H_2O) als Moderator und als Kühlmittel eingesetzt. Der Betriebsdruck des Wassers im Primärkreislauf wird so hoch gewählt, dass es bei der vorgegebenen Betriebstemperatur noch nicht siedet.

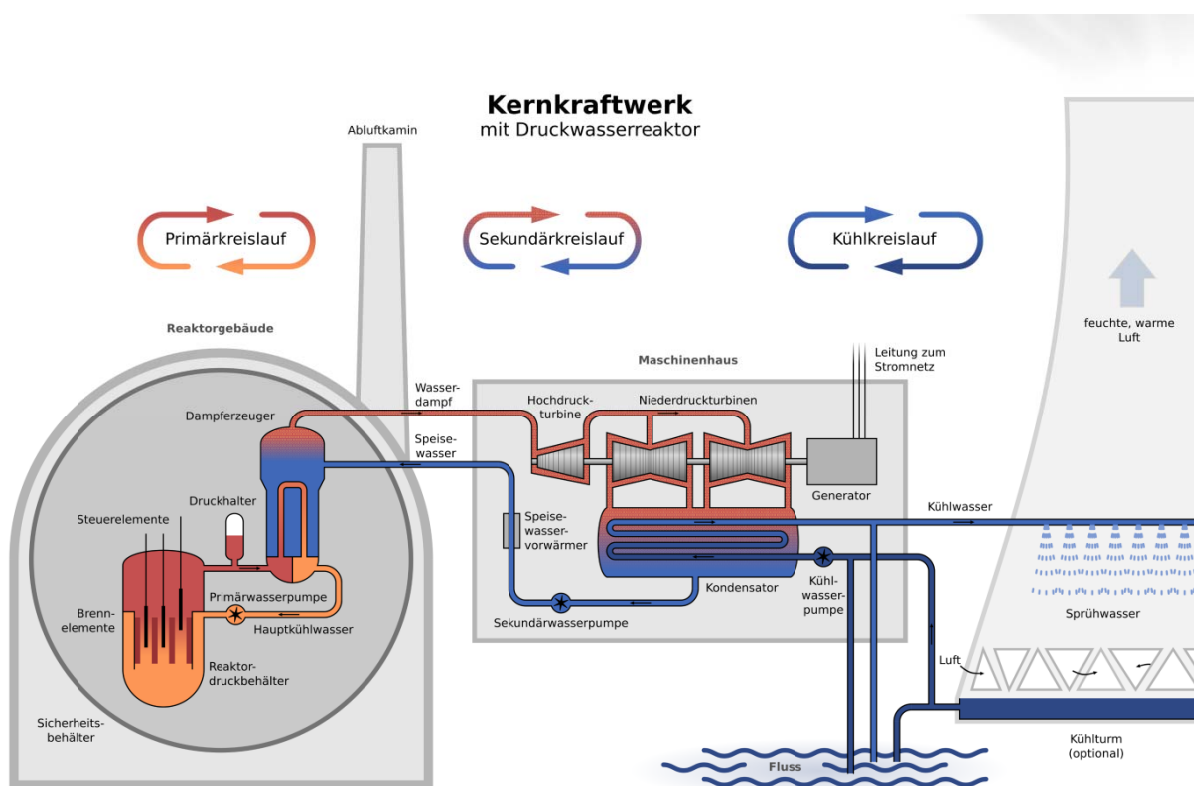


Abb. 20 Schema eines Druckwasserreaktors⁴⁷

6.1.1 Primärkreislauf

Dem Kühlwasser im Primärkreislauf wird Borsäure zugesetzt. Bor ist ein wirksamer Absorber für Neutronen, somit kann durch die Borsäurekonzentration die Leistung des Reaktors geregelt werden.

Unter einem erhöhten Druck von 154 bis 160 bar wird das Kühlmittel in den Reaktorkern geleitet. Dort im Reaktorkern nimmt es die durch die Kernspaltung entstandene Wärme auf und erwärmt sich auf ungefähr 325°C. Von dort wird es mit einer Pumpe in die Dampferzeuger gepumpt. Im Dampferzeuger wird die Energie, in Form von Wärme, von

⁴⁷

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Kernkraftwerk_mit_Druckwasserreaktor.png/800px-Kernkraftwerk_mit_Druckwasserreaktor.png, (9. Okt. 09)

dem Primärkreislauf dem Sekundärkreislauf übergeben. Dadurch kühlt sich das Kühlmittel ab und wird wieder in den Reaktor geleitet.⁴⁸

6.1.2 Sekundärkreislauf

Das Wasser im Sekundärkreislauf steht unter einem Druck von 70 bar. Somit beginnt das Wasser erst mit einer Temperatur von 280°C zu siedeln. An den Heizrohren im Dampferzeuger wird dieses Wasser verdampfen. Der entstandene Wasserdampf wird über Rohrsysteme zu den Dampfturbinen geleitet. Diese Dampfturbinen sind mit einem Generator gekoppelt, welcher elektrischen Strom erzeugt. Der Wasserdampf wird nun in einem Kondensator abgekühlt und als Wasser mit der Speisepumpe wieder in den Dampferzeuger geführt.

Der Kondensator muss wiederum gekühlt werden. Dies geschieht meistens mit Wasser aus einem Fluss. Je nach Wassertemperatur und Menge muss das Kühlwasser, bevor es in den Fluss zurückgeleitet werden darf, selbst noch einmal gekühlt werden. Zu diesem Zweck wird ein Teil des Kühlwassers in einem Kühlturm zum Verdunsten gebracht. Die zum Verdunsten aufgenommene Energie wird in Form von Wärme dem Flusswasser entzogen. Dabei entsteht bei manchen Wetterlagen eine weisse Wolke über dem Kühlturm. Diese besteht aber nur aus Wasserdampf.

⁴⁸ Buch: Wie funktioniert das? Die Technik im Leben von heute, von Kurt Dieter Solf (S.78)

6.2 Siedewasserreaktor

Der Aufbau und die Funktionsweise eines Siedewasserreaktors sind sehr ähnlich wie die des Druckwasserreaktors. Als Moderator und Kühlmittel wird hier ebenfalls leichtes Wasser (H_2O) verwendet.

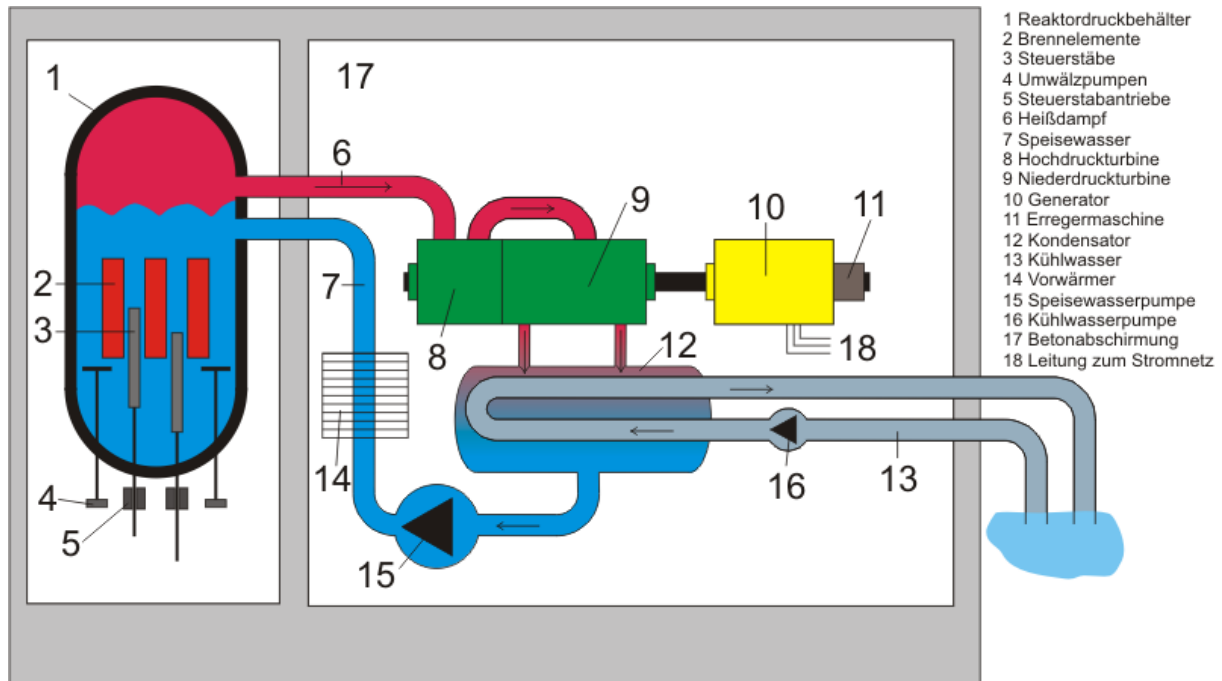


Abb. 21 Schema eines Siedewasserreaktors⁴⁹

Der Hauptunterschied zum Druckwasserreaktor ist, dass es beim Siedewasserreaktor keinen Primär- und Sekundärkreislauf gibt. Der mit zwei Drittel Wasser gefüllte Reaktor-druckbehälter steht unter einem Druck von ungefähr 74 bar. Durch die freiwerdende Energie bei der Kernspaltung wird das Wasser erhitzt und verdampft wegen dem erhöhten Druck bei einer Temperatur von 286°C. Dieser Wasserdampf treibt die Turbinen an, welche, wie schon beim Druckwasserreaktor, mit einem Generator gekoppelt sind. Der Generator wandelt die von der Turbine gelieferte Energie in elektrischen Strom um. Der Wasserdampf wird in einem Kondensator abgekühlt und als Wasser mit der Speisepumpe wieder in den Reaktor-druckbehälter zurückgeführt.

Der Kondensator muss wiederum gekühlt werden. Dies geschieht ebenfalls mit dem Wasser aus einem Fluss. Je nach Wassertemperatur und Menge muss auch dieses Kühlwasser bevor es in den Fluss zurückgeleitet werden darf, selbst noch einmal mit einem Kühlturm gekühlt werden.⁵⁰

⁴⁹ http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/b/bd/Schema_siedewasserreaktor_gro%C3%9F.png, (9. Okt. 09)

⁵⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Siedewasserreaktor>, (9. Okt. 09)

7 Radioaktivität & Entsorgung

Wie jede Energiequelle hat auch die Kernenergie ihre Vor- und Nachteile. Der Nachteil der Kernenergie sind die radioaktiven Abfälle. Es ist technisch nicht möglich, die Radioaktivität zu neutralisieren. Der Zerfall geschieht in 300'000 Jahren von selbst.

7.1 Schädliche Wirkung

Der Betrieb von Kernkraftwerken ist immer mit radioaktiver Strahlung verbunden. Es kann nicht 100%ig ausgeschlossen werden, dass der Betrieb, selbst ohne Störfall, keine schädliche Wirkung auf die Bevölkerung hat.

7.1.1 Radioaktivität zerstört Zellen

Alle radioaktiven Stoffe sondern ionisierende Strahlung ab. Diese gefährlichen Stoffe gelangen unter anderem durch die Atmung und die Nahrung in unseren Körper. Diese Strahlungen greifen die Zellen in unserem Körper an und beim Zerfall entstehen giftige Substanzen. Einige Zellen werden so abgetötet. Das Hauptproblem sind aber die nachhaltig beschädigten Zellen. Durch die Zellteilung werden diese Zellen vermehrt und dies kann schlussendlich zu Krebs führen. Die Zellen mit verändertem Erbgut können zu Missbildungen an Nachkommen oder zur Unfruchtbarkeit führen.⁵¹

⁵¹ http://de.wikipedia.org/wiki/Ionisierende_Strahlung, (5. Nov. 09)

7.1.2 Krebsrisiko im Normalbetrieb

Trotz meterdicken Betonwänden, können nicht alle radioaktiven Strahlungen herausgefiltert werden. Kernkraftwerke geben eine gewisse Strahlung an die Umwelt ab. Im sogenannten Normalbetrieb gelangen radioaktive Strahlungen über das Maschinenhaus und über das Abwasser der Kühlung nach aussen.⁵²

Aus einer Studie vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), geht hervor, dass die Krebserkrankungen in der Nähe eines Kernreaktors deutlich zunehmen. Dies betrifft vor allem Kinder. In dieser Studie wurden Daten von 6'000 Kinder unter 5 Jahren gesammelt. Das Krebsrisiko ist in einem Umkreis von 5km um 60% erhöht, das Leukämierisiko gar auf 120%.⁵³

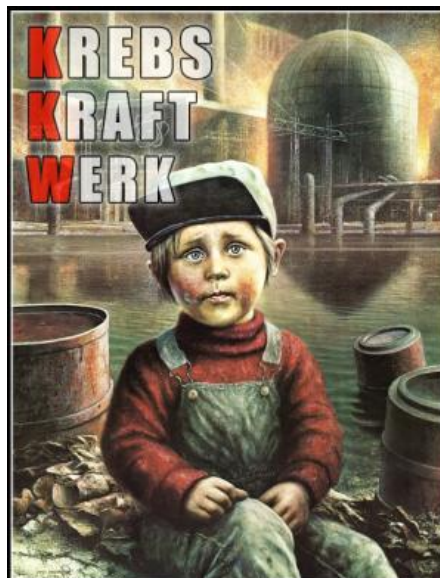


Abb. 22 Krebserkrankung⁵⁴

⁵² <http://vorort.bund.net/suedlicher-oberrhein/krebs-kinderkrebs-akw-kkw.html>, (5. Nov. 09)

⁵³ <http://www.bfs.de/de/kerntechnik/kinderkrebs/pm0711.html>, (5. Nov. 09)

⁵⁴ <http://vorort.bund.net/suedlicher-oberrhein/thumb.php?bild=http://vorort.bund.net/suedlicher-oberrhein/images/upload/Krebs-AKW-KKW.jpg&size=300>, (5. Nov. 09)

7.1.3 Super GAU

Es besteht immer ein Restrisiko, trotz den vielen Sicherheitsvorkehrungen. Bei einem Unfall hätte dies verheerende Folgen für grosse Gebiete um das betroffene Kernkraftwerk, wie man am 26. April 1986 in Tschernobyl sehen musste. Damals explodierte der Reaktorblock 4 als Folge einer Kernschmelze. Es mussten 375'000 Einwohner umgesiedelt werden und es wurde eine 4'300km² grosse Sperrzone errichtet. Alle Siedlungen in dieser Sperrzone müssen mindestens 50 Jahre lang unbewohnt bleiben. Die Zahl der Todesopfer wurde nie bestätigt.

Durch die extrem hohe Temperatur gelangten die giftigen Stoffe gasförmig in eine Höhe von 1,5km. Die radioaktiven Wolken wurden vom Wind über weite Teile Europas verteilt. Innerhalb der Länder wurde der Boden je nach lokalen Niederschlägen unterschiedlich hoch belastet.

Der super GAU von Tschernobyl gilt als eine der schlimmsten Umweltkatastrophen aller Zeiten.⁵⁵

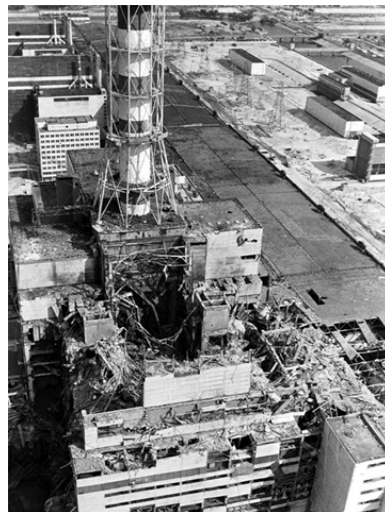


Abb. 23 Tschernobyl Super GAU⁵⁶

⁵⁵ http://de.wikipedia.org/wiki/Katastrophe_von_Tschernobyl, (5. Nov. 09)

⁵⁶ <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Medienraum/videoarchiv,did=161476.html?image=2&page=1>, (5. Nov. 09)

7.2 Entsorgung

In der Schweiz sind die Produzenten von radioaktiven Abfällen selbst für deren Entsorgung verantwortlich. Dies betrifft hauptsächlich die Kernkraftwerksbetreiber. Solche Abfälle entstehen aber auch in der Medizin, Industrie, Forschung und beim Abbau von stillgelegten Kernkraftwerken. Aus diesem Grund haben der Bund und die Kernkraftwerksgesellschaften im Jahre 1972 die Nagra gegründet. Ihre Aufgabe ist die radioaktiven Abfälle der Schweiz sicher zu lagern, so dass Mensch und Umwelt langfristig davor geschützt sind.

Radioaktive Abfälle fallen nicht in grossen Mengen an, aber sie sind sehr gefährlich und müssen deshalb unbedingt von der Umwelt ferngehalten werden.

Die Abfälle werden in drei Kategorien unterteilt:⁵⁷

- Hochaktive Abfälle
- Langlebige mittelaktive Abfälle
- Schwach- und mittelaktive Abfälle

7.2.1 Entsorgungskonzept der Nagra

Die einzige Methode zur sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle ist nach heutigem Wissen ein geologisches Tiefenlager. Der Bundesrat und das Parlament haben sich deshalb für dieses Konzept entschieden. Gründe die für eine geologisches Tiefenlager sprechen ist, dass gesellschaftliche und klimatische Entwicklungen nicht vorhersehbar sind, geologische aber schon.

7.2.1.1 Hochaktive Abfälle (vorwiegend Brennelemente)

Nachdem ein Brennelement nach vier bis fünf Jahren ausgebrannt ist, wird es ersetzt und in einem separaten Wasserbecken im Kernreaktor zwischengelagert. Auch diese alten Brennelemente generieren immer noch eine enorme Hitze und können deshalb noch nicht weiter transportiert werden. Nachdem ein Grossteil der Wärme abgeführt wurde, werden sie in spezielle Behälter verpackt und ins zentrale Zwischenlager ZWILAG nach Würenlingen (AG) gebracht. Dort werden sie während ca. 40 Jahre gelagert und kontrolliert. Danach kommen sie in ein geologisches Tiefenlager ca. 600m unter Tageslicht.



Abb. 24 Zwischenlager ZWILAG hochaktive Abfälle⁵⁸

⁵⁷ http://www.nagra.ch/q3.cms/s_page/79840/s_name/typen, (30. Nov. 09)

7.2.1.2 Schwach- & mittelaktive Abfälle

Zu den schwach- und mittelaktiven Abfällen gehören unter anderem auch Schutzkleidungen, Putzlumpen und maschinelle Verschleissteile. Dies macht der grösste Teil des radioaktiven Abfalls aus.

Beim Kernkraftwerk werden solche Abfälle in Stahlfässer verschlossen und in einem Lager zum Transport nach Würenlingen bereitgestellt. Im ZWILAG werden die Abfälle sortiert und gelangen per Fernbedienung, um möglichst den Kontakt mit Menschen zu vermeiden, in den Hochleistungsplasmabrenner. Die Abfälle werden samt Fass bei sehr hohen Temperaturen thermisch zersetzt oder verschmolzen. Durch diese Verbrennung nimmt die Radioaktivität zwar nicht ab, doch das Volumen wird stark verkleinert und die Lagerfestigkeit wird verbessert.

Das verschmolzene Glas wird in eine zylindrische Form gegossen und wiederum in Stahlfässer abgefüllt. Diese werden, gleich wie die hochaktiven Abfallstoffe, bei ZWILAG gelagert und kommen später in ein geologisches Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle.

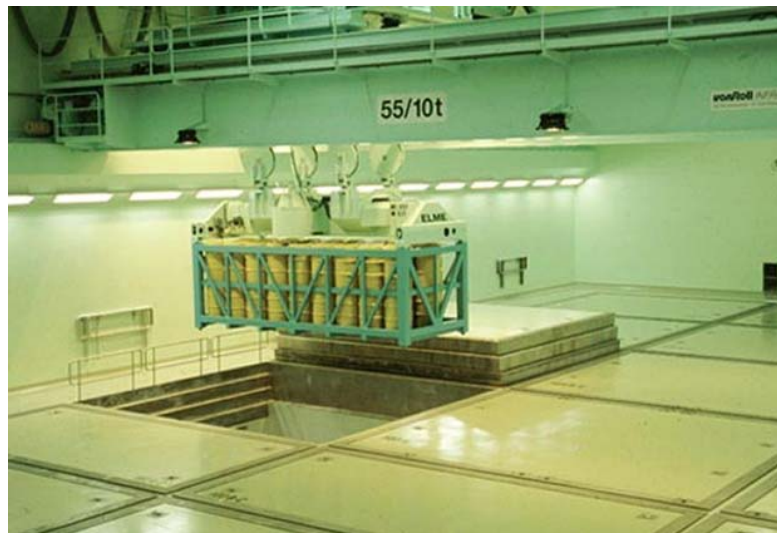


Abb. 25 Zwischenlager ZWILAG mittel- & leichtaktive Abfälle⁵⁹

⁵⁸ http://www.zwilag.ch/zwi/img/img_09_lagerh_1.jpg, (30. Nov. 09)

⁵⁹ http://kernenergie.ch/upload/cms/user/ZWILAG_Lager_mittelaktiv3.jpg, (30. Nov. 09)

7.2.1.3 Geologisches Tiefenlager

Momentan gibt es in der Schweiz noch kein geologisches Zwischenlager. Der Bau von zwei geologischen Tiefenlagern soll im Jahre 2030 für schwach- und mittelaktive und im Jahre 2040 für hochaktive Abfälle begonnen werden. Für die Standortwahl und den Bau ist die Nagra verantwortlich. Die Auswahl der Standorte ist ein sehr aufwändiger und langer Weg. Geplant ist, dass bis im Jahre 2016 ein geeigneter Ort gefunden wird.

Für den Standort solcher Tiefenlager sind dicke, tonige Gesteinsschichten notwendig, da sie sehr gut abdichten. Ausserdem muss sich der Standort in einem ruhigen Gebiet und ausreichend tief unter der Erde befinden.

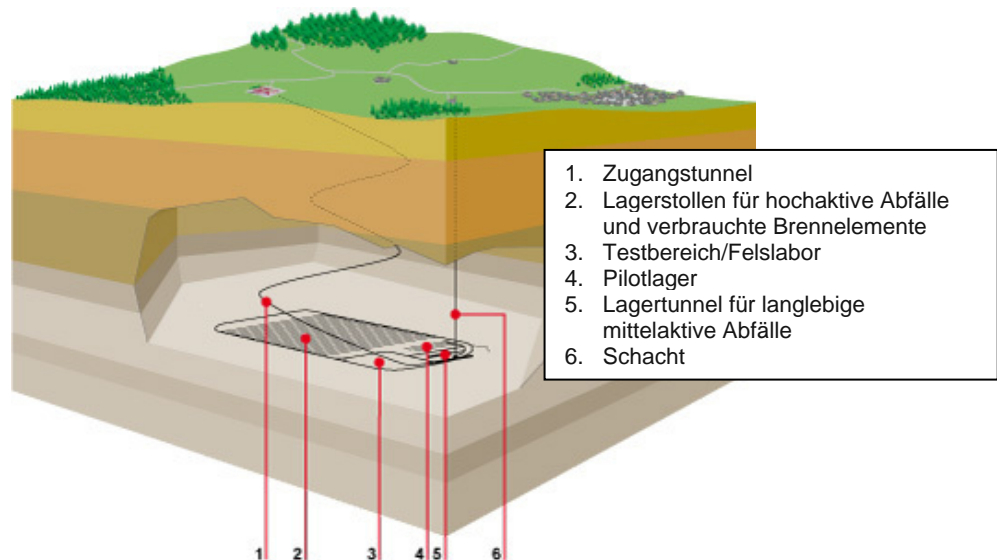


Abb. 26 Geologisches Tiefenlager⁶⁰

Die hochaktiven Abfälle werden umgepackt und anschliessend durch den Zugangstunnel mit einem Schienenfahrzeug nach unten gebracht. Im Lagerstollen wird der Behälter auf einen Einlagerungstrolley umgeladen. Mit diesem Trolley wird der Behälter in den 2.5m Durchmesser grossen Lagerstollen gebracht. Die Behälter werden einzeln mit Zwischenraum hintereinander in dem Lagerstollen eingebettet. Der Stollen wird fortlaufend mit abdichtendem Tongranulat (Betonit) verfüllt.

Ist das Tiefenlager voll, wird der komplette Stollen, sowie der Zugangstunnel mit Tongranulat aufgefüllt. Nun beginnt die Phase der Überwachung, welche mehrere Jahrzehnte dauern kann. Durch den Schacht ist es möglich weiterhin in das Felslabor zu gelangen um die Funktion der Sicherheitsbarrieren im Pilotlager zu prüfen. Unsere Nachkommen können dann selber entscheiden, ob sie die Anlage endgültig verschliessen wollen. In diesem Fall würden das Felslabor und der Schacht ebenfalls aufgefüllt und verschlossen.⁶¹

⁶⁰ [http://www.nagra.ch/images/database/\\$default/wiegrafiken/normal/Lager-HAAweb.jpg](http://www.nagra.ch/images/database/$default/wiegrafiken/normal/Lager-HAAweb.jpg), (30. Nov. 09)

⁶¹ http://www.nagra.ch/q3.cms/s_page/85450/s_name/loesungstiefenlager, (30. Nov. 09)

Energieeffizienz des KKW Mühleberg

Wir wollen in den kommenden Artikeln untersuchen wie effizient das KKW Mühleberg ist. Dabei gehen wir von der folgenden Skizze aus:

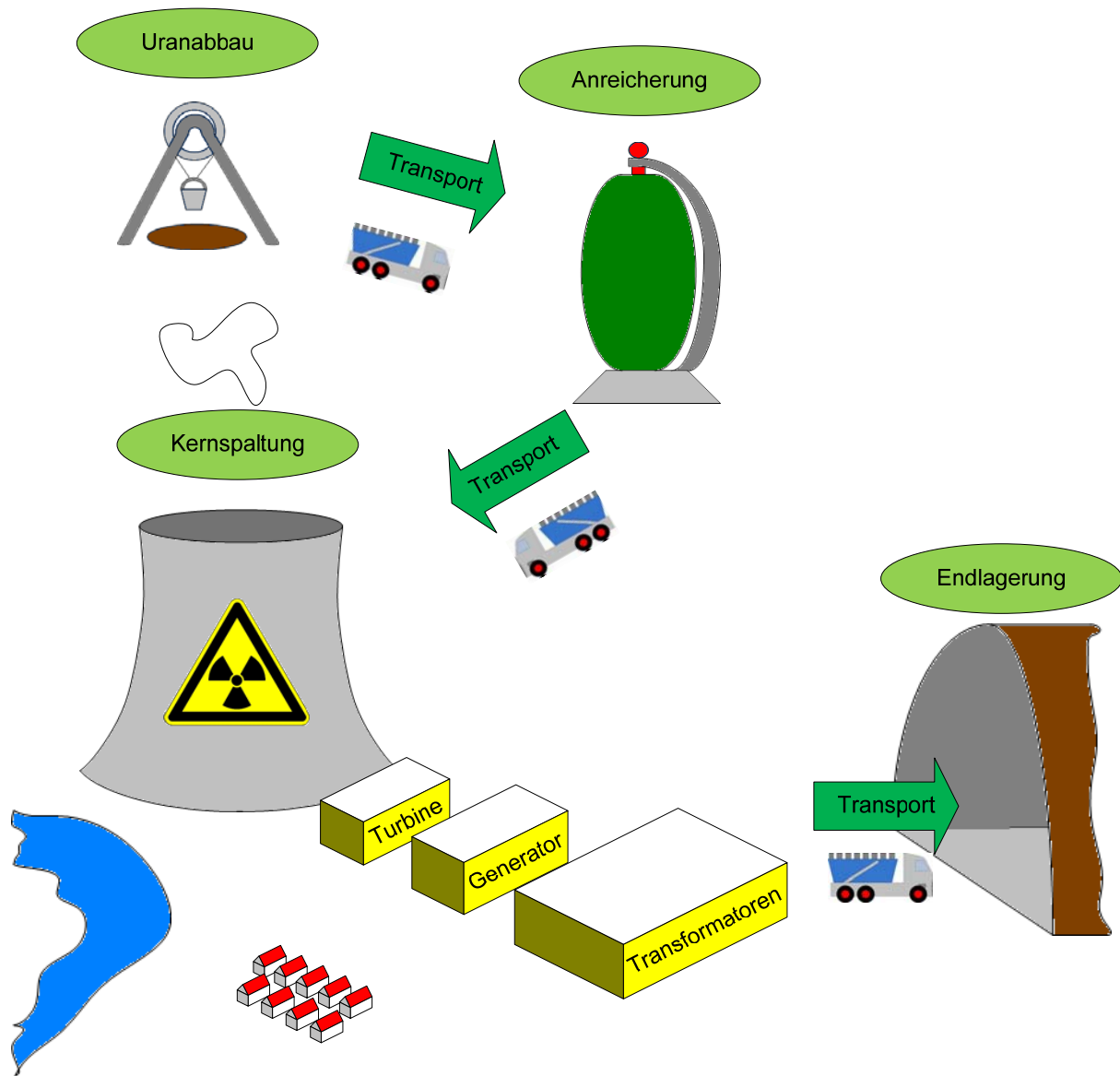


Abb. 27 Skizze Energieeffizienzüberlegung

Alle Berechnungen die nun folgen beziehen sich auf eine Zeitspanne von einem Jahr.

8 Bau

Das Kernkraftwerk Mühleberg steht seit 1972 in Betrieb. In den sechziger Jahren erkannte man, dass die damaligen Wasserkraftwerke den wachsenden Energieverbrauch nicht mehr alleine decken können. Damals wollten die Stromproduzenten auf fossile Brennstoffe setzen. Doch es kam anders. 1963 gab der Gesamtbundesrat eine neue Richtung vor: „Der Augenblick ist in der Tat gekommen, da ernsthaft und unverzüglich zu prüfen ist, ob auf die kurzfristig gedachte Zwischenstufe von konventionellen thermischen Kraftwerken nicht verzichtet und unmittelbar auf den Bau und die Inbetriebnahme von Kernkraftwerken zugesteuert werden sollte.“ Die bernischen Kraftwerke (BKW) entschlossen sich für den Bau eines Kernkraftwerkes 14 km westlich von Bern.⁶²

8.1 Berechnung

Konkrete Angaben zum Energieverbrauch beim 4-jährigen Bau (1968 - 1972) des KKW Mühleberg hat es nie gegeben. Dies, in so kurzer Zeit, realistisch nachzuvollziehen war für uns unmöglich. Deshalb suchten wir Rat bei Swiss Nuclear. Sie machten uns auf eine detaillierte Studie des KKW Forsmark in Schweden aufmerksam.

$$W_{Forsmark} = 4.1PJ = 1.139TWh$$

Das KKW Forsmark ist, wie auch das KKW Mühleberg, ein Siedewasserreaktor und besitzt ebenfalls keinen Kühlturm. Doch in Forsmark hat es drei Reaktorblöcke und Mühleberg bekanntlich nur einen. Einfachheitshalber entschlossen wir uns, deshalb für Mühleberg einen Drittel anzunehmen.

$$W_{Mühleberg} = \frac{1}{3} \cdot W_{Forsmark} = \frac{1}{3} \cdot 1.139TWh = 379.63GWh$$

Das KKW Mühleberg wurde auf einen Betrieb von ungefähr 50 Jahre⁶³ ausgelegt. Bis heute war es bereits 37 Jahre in Betrieb. Laut Bundesamt für Energie sollte es aber bereits im Jahre 2020 abgeschaltet werden, das sind zwei Jahre zu früh. Deshalb rechnen wir hier vorsichtig mit 48 Betriebsjahren.

$$W_{\text{Pr oJahr}} = \frac{W_{Mühleberg}}{48} = \frac{379.63GWh}{48} = \underline{\underline{7.91GWh}}$$

8.2 Fehlerabschätzung

Da genaue Angaben für das KKW Mühleberg nicht existieren, nahmen wir die Zahlen von Forsmark und teilten diese durch drei, weil in Mühleberg nur ein Reaktor und nicht drei stehen. Mit dieser Berechnung werden wir sicherlich unter dem effektiven Energieverbrauch liegen, da in Forsmak nicht alle Gebäude (Kontrollzentrum, Empfang, Lager und Garderoben) dreifach gebaut wurden.

⁶² <http://www.kernenergie.ch/de/akw-muehleberg.html>, (8. Dez. 09)

⁶³ http://kernenergie.ch/de/wirtschaft-zahlen-fakten.html#anchor_JIMNHT, (13. Dez. 09)

9 Abbau von Uran

Das Uran, welches im KKW Mühleberg eingesetzt wird, wurde in den USA und Kanada abgebaut⁶⁴, aufbereitet und anschliessend in die Anreicherungsanlage transportiert. Die Anreicherungsanlage benötigt viel mehr Natururan als dann schlussendlich in den Brennelementen ist. Für die 36 Brennelemente à 190 kg⁶⁵, welche pro Jahr benötigt werden, entspricht dies:⁶⁶

$$F = \frac{N_P - N_T}{N_F - N_T} \cdot P = \frac{4\% - 0.2\%}{0.7\% - 0.2\%} \cdot 36 \cdot 190 \text{ kg} = 51.98 \text{ t}$$

Die Menge von 51.98 Tonnen Natururan wird mit riesigen Baggern abgebaut. Der Urangehalt im Gestein ist nur etwa 0.3% bis 18%.⁶⁷ Somit benötigt man bei 8% Urangehalt in McArthur River in Kanada folgende Menge:

$$m_{\text{Abbau}} = F \cdot \frac{100\%}{8\%} = 51.98 \text{ t} \cdot \frac{100\%}{8\%} = 649.8 \text{ t}$$

Man unterscheidet zwischen drei verschiedenen Abbauarten:⁶⁸

- Tagebau (an der Oberfläche): Beim Tagebau können ca. 5% des Erzes aus dem Boden gebraucht werden. Das Restliche, welches nicht gebraucht werden kann, wird an der Erdoberfläche liegen gelassen. Dabei verseuchen radioaktiver Staub und freiwerdende Radongase die Luft.
- Unterirdischer Tiefbau: In unterirdischen Stollen, ca. 120 Meter unter der Erdoberfläche wird das Uranerz abgebaut. Hier ist das einsickernde Grundwasser oftmals ein Problem, da es vergiftet wird. Dieses Wasser wird deshalb abgepumpt und in den Uranmühlen gebraucht. Beim unterirdischen Tiefbau werden vor allem die Arbeiter den gefährlichen Radongasen und dem radioaktiven Staub ausgesetzt.
- Abbau mittels einer chemischen Lösung, (In-situ): Diese Variante wird nur sehr selten angewendet. Hier werden zwei Schächte mit einer Tiefe bis zu 240m gebaut. Durch den Schacht wird dem Grundwasser eine chemische Substanz beigemischt, welche das Uran aus dem Gestein herauslösen sollte. Über den zweiten Stollen wird das Grundwasser mit dem gelösten Uran hinauf gepumpt.

9.1 Berechnung Uranabbau

Um den Uranabbau zu bestimmen, haben wir einen Richtwert, der durch Modelltagebauten an der TU Bergakademie Freiberg erforscht worden ist, verwendet. Die Resultate beziehen sich auf das Vorbrechen, Transportieren, Laden, Sprengen und Bohren. Bei der

⁶⁴ Anfrage KKW Mühleberg, (18. Dez. 09)

⁶⁵ Anfrage KKW Mühleberg, (18. Dez. 09)

⁶⁶ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

⁶⁷ http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/uranreport2006_lf.pdf, (13. Dez. 09)

⁶⁸ <http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Uranabbau.html>, (13. Dez. 09)

Studie spielten besonders die Faktoren des Gesteins (Druckfestigkeit und Schichtdicke) eine wichtige Rolle.⁶⁹

$$Wp = 24.4 \frac{MJ}{t} = 6.78 \frac{kWh}{t}$$

$$W_{Abbau} = m_{Abbau} \cdot Wp = 649.8t \cdot 6.78 \frac{kWh}{t} = \underline{4.4MWh}$$

Der Uranabbau ist extrem belastend für die Menschen und die Umwelt. Uran ist ein schwach radioaktives Material. In seiner natürlichen Lagerstätte stellt es keine Gefahr für die Umwelt dar. Doch wird es abgebaut, könnte es, wie auch andere Schwermetalle, in Kontakt mit unserem Trinkwasser kommen oder sich in Form von Staub verteilen. Deshalb wird Uran heute nur in dünn besiedelten Gebieten abgebaut, wie z.B. in Kasachstan, Kanada und Australien. Von den Folgen des Abbaus sind hauptsächlich Ureinwohner und andere kleinere Völker betroffen.⁷⁰

9.2 Uranaufbereitung

Aus dem Erz muss man nun das Uran gewinnen. Dazu wird das Erz als erstes grob verkleinert und anschliessend in einer Gesteinsmühle gemahlen. Damit das Erz nicht in Form von feinem Staub verweht wird, fügt man ihm beim Mahlen Wasser hinzu.⁷¹



Abb. 28 Gesteinsmühle⁷²

⁶⁹ http://www.baumaschine.de/Portal/Aktuell_0902/Wissenschaft/gesteinsgewinnung/gesteinsgewinnung.pdf, (14. Dez. 09)

⁷⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Uranabbau>, (13. Dez. 09)

⁷¹ <http://www.mineninfo.com/home/gesteinsmuehlen.html>, (14. Dez. 09)

⁷² http://www.mineninfo.com/fileadmin/images/Mineninfo/Inhalte_Menu/firstmajestic-800-to-mills2.jpg, (14. Dez. 09)

9.3 Berechnung Transport

Koordinaten: McArthur River in Kanada: 57.762421, -105.051870

GE Power Kalifornien: 38.958499, -119.726043

Die Strecke beträgt laut Google Earth 2'342 km. Der durchschnittliche Verbrauch des LKWs wurde mit Hilfe des Verbraucherdiagramms des Volvo FH16 ermittelt.⁷³

$$s = 2342 \text{ km}$$

$$d_{\text{Verbrauch}52t} = 38 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}}$$

$$H_{\text{iDiesel}} = 11.8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Diesel}} = 833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.833 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$V_{\text{hin}} = s \cdot d_{\text{Verbrauch}} = 2342 \text{ km} \cdot 38 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} = 890 \text{ l}$$

$$V_{\text{zurück}} = s \cdot d_{\text{Verbrauch}} = 2342 \text{ km} \cdot 28 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} = 655.8 \text{ l}$$

$$W = (V_{\text{hin}} + V_{\text{zurück}}) \cdot \rho_{\text{Diesel}} \cdot H_{\text{iDiesel}} = (890 \text{ l} + 655.8 \text{ l}) \cdot 0.833 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 11.8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = \underline{15.19 \text{ MWh}}$$



Abb. 29 Gemahlenes Uran⁷⁴

⁷³ Siehe Punkt 12

⁷⁴ <http://kernenergie.ch/de/ressource-uran.html>, (13. Dez. 09)

9.4 Interpretation

Beschreibung	Energieverbrauch
Abbau von 649.8 Tonnen Gestein	4.4MWh
Uranaufbereitung	Konnte nicht berechnet werden
Transport von Uranmine in McArthur River (Kanada) nach GE Power Kalifornien (USA) 2'342km mit 52 Tonnen gemahlenem Uran	15.19MWh
Summe Uranabbau	19.60MWh

10 Anreicherung

Wie bereits bekannt, gibt es verschiedene Anreicherungsverfahren, welche auch verschieden viel Energie benötigen. Der Lieferant der Brennelemente beim KKW Mühleberg ist General Electric (GE), welche nach unserem Wissen die Gasdiffusionsmethode verwenden. Dies könnte sich schon in den kommenden Jahren ändern, denn GE hat, zusammen mit Hitachi und Cameco, über Jahre hinweg eine Lasermethode entwickelt, welche viel effizienter (90% weniger Energieverbrauch gegenüber der Gaszentrifugen-Methode) ist, als die bisher bekannten. Dieses Verfahren befindet sich aber noch in der Testphase.⁷⁵

Die Brennelemente vom KKW Mühleberg werden nicht noch ein zweites Mal im Ausland aufbereitet. Dieses Vorgehen basiert auf dem Kernenergiegesetz⁷⁶ von 2003, das dies unter gewissen Umständen verbietet. Daher kann die Wiederanreicherung vernachlässigt werden

10.1 Berechnung

Das KKW Mühleberg wechselt einmal im Jahr einen Teil ihrer Brennelemente aus. Wie viele das sind, entscheiden Physiker, welche den Restgehalt an spaltbaren ²³⁵U genau berechnen. Im Durchschnitt sind dies 36 Brennelemente pro Jahr. Ein Brennelement wiegt 270 kg, wobei davon ca. 80 kg auf Kosten des Behälters gehen. Somit haben wir pro Brennelement 190 kg angereichertes Uran.⁷⁷

$$m_{\text{Uran}} = m_{\text{Brennelement}} - m_{\text{Behälter}} = 270\text{kg} - 80\text{kg} = 190\text{kg}$$

Daraus ergibt sich einen gesamt ²³⁵U Bedarf von 6840kg.

$$m_{\text{Gesamt}} = m_{\text{Uran}} \cdot n_{\text{Brennelemente}} = 190\text{kg} \cdot 36 = 6840\text{kg}$$

Daraus und dem Wissen, dass im KKW Mühleberg Uran mit einem Anreicherungsgrad von 4% verwendet wird, kann man nun ermitteln, wie viel die 6840 kg in Urantrennarbeit (UTA) sind. Mit der Urantrennarbeit wird angegeben, wie viel Arbeit geleistet werden muss, um eine Kilogramm mit der gewünschten Anreicherung zu erhalten.

⁷⁵ http://www.ge-energy.com/prod_serv/products/nuclear_energy/en/downloads/gle_tech_nov2007.pdf, (11. Dez. 09)

⁷⁶ Kernenergiegesetz Art. 9, Stand 1. Januar 2009

⁷⁷ Führung KKW Mühleberg, (14. Nov. 09)

Die Formel um die Urantrennarbeit zu errechnen, ist folgende (ideale Anreicherung):⁷⁸

$$\sigma U = P \cdot V(N_P) + V(N_T) - V(N_F)$$

- P: Benötigte Masse angereichertes Uran (in unserem Fall 6840kg)
- N_P : Anteil des ^{235}U Isotops im Uran nach der Anreicherung
- N_T : Anteil des ^{235}U Isotops im Uran nach der Abreicherung
- N_F : Anteil des ^{235}U Isotops im Uran vor der Anreicherung
- $V()$: Wertfunktion

Uns war es leider nicht möglich, dies so zu berechnen, da uns die Bedeutung einer Wertfunktion nicht klar war. Darum nahmen wir den Wert für V aus einem Diagramm. Die Wertfunktion bezieht sich dabei auf ein N_T von 0.2%, was dem heutigen Standard entspricht.⁷⁹

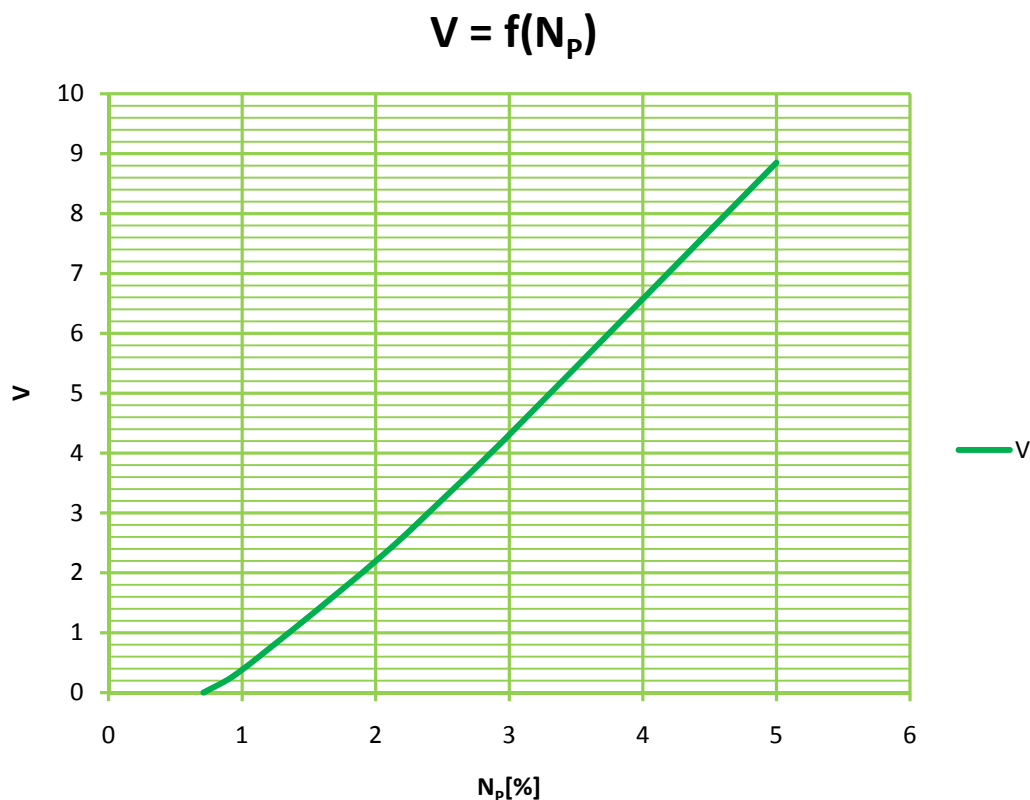


Abb. 30 Diagramm $V=f(N_P)$

Mit diesen Voraussetzungen und dem Wissen, dass der Anreicherungsgrad des Urans im KKW Mühleberg 4% beträgt, lässt sich nun die Urantrennarbeit berechnen:

$$\sigma U = P \cdot V = 6840\text{kg} \cdot 6.56 = 44870\text{kgUTA}$$

⁷⁸ <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>, (8. Dez. 09)

⁷⁹ <http://bibliothek.fzk.de/zb/kfk-berichte/KFK0859.pdf>, (11. Dez. 09)

Die Gasdiffusions-Methode für die Anreicherung benötigt sehr viel Energie. Im Schnitt 2300-2500 kWh pro kg UTA.⁸⁰ Für unsere Berechnung nehmen wir den Mittelwert dieses Energiebedarfs.

Mit den ermittelten Fakten lässt sich nun die Gesamtarbeit berechnen, welche für das KKW Mühleberg, bezüglich der Anreicherung, in einem Jahr benötigt wird.

$$W_{\text{Anreicherung}} = \sigma U \cdot W_{\text{UTA}} = 44870 \text{ kg UTA} \cdot 2400 \text{ kWh} / \text{kg UTA} = \underline{\underline{107.67 \text{ GWh}}}$$

10.2 Fehlerabschätzung

Abweichungen können bei diesen Berechnung an einigen Orten auftreten. Eine grössere Differenz könnte bei der Ermittlung der Urantrennarbeit sein, da wir den Wert der Wertfunktion $V()$ nicht nachvollziehen konnten und uns somit auf das Diagramm verlassen mussten. Man darf aber davon ausgehen, dass dieser Wert ungefähr stimmt, da ein 1000 MW Reaktor zwischen 100-200 t UTA im Jahr benötigt.⁸¹ Eine weitere Abweichung könnte beim Energiebedarf der Gasdiffusionsmethode Anreicherung auftreten, da wir auch da nur ungefähre (Idealwerte) Informationen hatten.

Zu beachten ist zudem, dass die Herstellung von Brennelemente nicht berücksichtigt wurde. Dies war uns nicht möglich, weil wir keine konkreten Zahlen dazu finden konnten. Wir wissen aber, dass der Energieaufwandanteil sich etwa auf 2% beläuft.⁸²

⁸⁰ <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Anreicherung>, (12. Dez. 09)

⁸¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Urantrennarbeit>, (12. Dez. 09)

⁸² <http://www.kernenergie.ch/de/energieeffizienz.html>, (8. Jan. 10)

11 Transport

Die fertigen Brennelemente aus der Anreicherungsanlage von GE Power in Kalifornien (USA) müssen nun nach Mühleberg gebracht werden. Der Transport der 36 Brennelemente, welche pro Jahr gebraucht werden, geschieht hauptsächlich mit einem Frachter. Das KKW Mühleberg besitzt ein Vorratslager, welches für zwei Jahre reicht, damit sie nicht jedes Jahr Brennelemente bestellen müssen.

Ein Brennelement wiegt ungefähr 270 kg und ist 4.5m hoch. Es hat eine quadratische Grundform mit einer Kantenlänge von 26cm.⁸³

$$V_{BE} = h \cdot k^2 = 4.5m \cdot (26cm)^2 = 304.2dm^3$$

Die Brennelemente werden von Kalifornien direkt mit einem Frachter nach Basel gebracht.⁸⁴

11.1 Berechnung Verbrauch des Frachters

Den Dieselverbrauch berechneten wir von einem chinesischen Frachter, der Platz für ungefähr 154800m³ aufweist.⁸⁵

$$s_{Ges} = 5830km$$

$$V_{DieselGes} = 525000l$$

$$d = \frac{V_{DieselGes}}{s_{Ges}} = \frac{525000l}{5830km} = 90.05 \frac{l}{km}$$



Abb. 31 Frachtschiff⁸⁶

Mit diesem Verbrauch berechneten wir dann den Transportweg von Kalifornien nach Basel. Den Rückweg lassen wir in unserer Berechnung absichtlich aus, da ein solch riesiger Frachter wohl kam ungeladen zurück nach Kalifornien fahren wird. Stattdessen

⁸³ Führung KKW Mühleberg, (14. Nov. 09)

⁸⁴ Anfrage KKW Mühleberg, (18. Dez. 09)

⁸⁵ <http://www.motor-talk.de/forum/wieviel-diesel-braucht-man-fuer-den-transport-nach-deutschland-t1545478.html>, (14. Dez. 09)

⁸⁶ <http://media.de.indymedia.org/images/2008/09/226939.jpg>, (14. Dez. 09)

11.3 Interpretation

Dank der extrem hohen Energiedichte von Uran müssen nur sehr kleine Mengen, im Vergleich zu den Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen, transportiert werden. Deshalb macht es auf die Energieeffizienz der Nuklearen Energie auch nicht viel aus.

Beschreibung	Energieverbrauch
Transport mit dem Schiff von Kalifornien nach Basel	3.5MWh
Transport mit einem LKW von Basel zum KKW Mühleberg	608.5kWh
Summe Transport	4.11MWh

12 Dieselverbrauch Volvo FH16

Durch physikalische Grundlagen fanden wir heraus, dass der Kraftstoffverbrauch eines LKWs linear mit dessen Ladung (Masse) zunimmt.

$$F = F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Steig} + F_{Beschleunigung}$$

$$F_{Luft} = \frac{1}{2} A \cdot c_w \cdot \rho \cdot v^2$$

$$F_{Roll} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$$

$$F_{Steig} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

$$F_{Beschleunigung} = e_i \cdot m \cdot a$$

Allerdings ist der Verbrauch mit der Geschwindigkeitszunahme nicht mehr linear. Deshalb haben wir uns entschieden zwei Durchschnittswerte des Herstellers zu verwenden (einmal ungeladen und einmal vollgeladen) und davon ein lineares Verbrauchsdiagramm zu zeichnen.

Verbrauch = f(Gewicht)

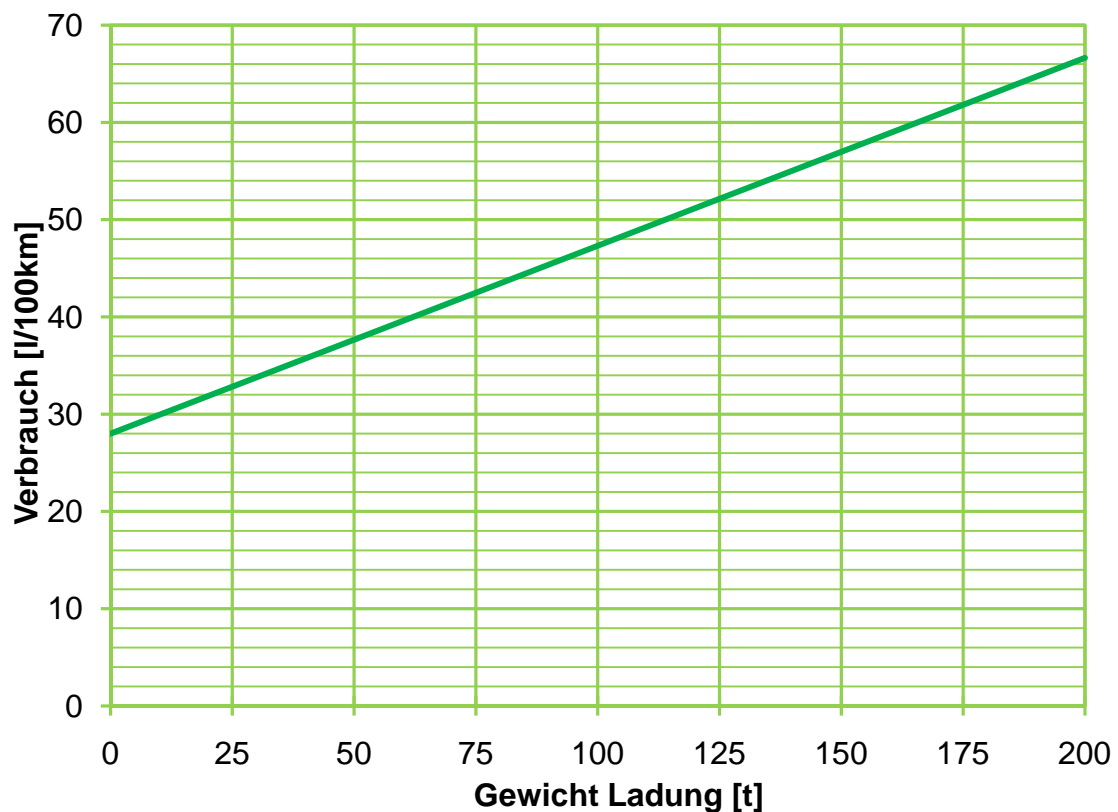


Abb. 32 Diagramm Verbrauch=f(Gewicht)

13 Kühlung

Das KKW Mühleberg wird mit Hilfe von Aarewasser gekühlt. Dies zieht den grossen Vorteil einer sehr effizienten Kühlung nach sich. Die maximale Leistung des KKW wird nur durch die maximale Aarewassertemperatur beschränkt. Diese Beschränkung führt manchmal dazu, dass das KKW seine Leistung reduzieren muss.

Aus der Tatsache, dass sich das Wasser erwärmt, kann man schliessen, dass bei der Kühlung Wärmeenergie abgebaut werden muss.

13.1 Berechnung

Zur Kühlung werden $11\text{m}^3/\text{s}$ Aarewasser in den Kondensator geleitet. Dieses Kühlwasser wird im Kondensator um rund 1.4°C erwärmt und anschliessend wieder mit den $610\text{m}^3/\text{s}$ ⁸⁸ Aarewasser gemischt. Somit können wir die Wärmeenergie berechnen, welche durch die Kühlung abgegeben wird.⁸⁹

$$P_{\text{Kühlung}} = c \cdot m_{\text{Kühlung}} \cdot \Delta T = 4187 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 11000\text{kg} \cdot 1.4\text{K} = 64.5\text{MJ} = 64.5\text{MW}$$

Da uns aber der Energieverlust über eine Zeitspanne von einem Jahr interessiert, müssen wir das erhaltene Ergebnis von 64.5 MW noch mit der Zeitspanne multiplizieren. Zu beachten sind die 4 Wochen, in denen das KKW für Wartungsarbeiten abgeschaltet ist.

$$W_{\text{Kühlung}} = P_{\text{Kühlung}} \cdot 24\text{h} \cdot (365 - 28) = 64.5\text{MW} \cdot 24\text{h} \cdot (365 - 28) = \underline{\underline{521.5\text{GWh}}}$$

⁸⁸ <http://de.wikipedia.org/wiki/Wohlensee>, (19. Nov. 09)

⁸⁹ Führung KKW Mühleberg, (14. Nov. 09)

Diese Leistung könnte theoretisch für Fernwärmesysteme verwendet werden, was im Fall des KKW Mühlebergs jedoch aus politischen Gründen nicht wahrgenommen wird.⁹⁰ Nur die Kernkraftwerke Beznau und Göschen versorgen rund 18'000 Menschen und eine Kartoffelfabrik mit Fernwärme.⁹¹

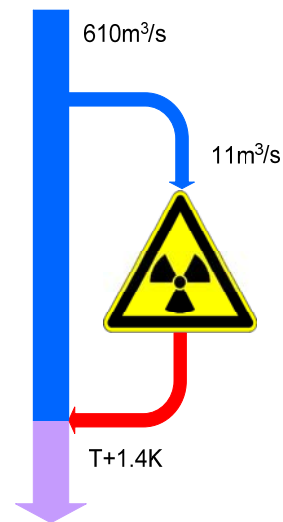


Abb. 33 Skizze Kühlung

13.2 Fehlerabschätzung

Bei dieser Berechnung ist die Fehlerquote relativ gering, da wir keine Annahmen treffen mussten. Einzig die Tatsache, dass die Aare nicht immer gleich viel Wasser mit sich führt, könnte das Resultat minimal verfälschen.

⁹⁰ Führung KKW Mühleberg, (14. Nov. 09)

⁹¹ <http://kernenergie.ch/de/energieeffizienz.html>, (6. Jan. 10)

14 Kernspaltung

Die Bruttoenergie, die ein KKW erzeugt, ist jene die bei der Kernspaltung entsteht. Die Bruttoleistung des KKW Mühleberg wird mit 390MW angegeben. Da aber bereits bei der Kernspaltung, Transformierung und Stromerzeugung (Generator, Turbine und Transformatoren) Verluste auftreten und sich die 390MW auf die erzeugte elektrische Energie beziehen, entsprechen die 390MW nicht der wirklichen Bruttoleistung.⁹²

14.1 Berechnung

Um nun die wirkliche Bruttoleistung des KKW zu ermitteln, müssen die einzelnen Verluste zu der angegebenen Bruttoleistung dazu addiert werden. Dabei muss beachtet werden, dass beim KKW Mühleberg die Energiegewinnung parallel aufgebaut ist, sprich jeweils jede Stufe zweimal vorkommt.

Folgende Stufen werden durchlaufen bis eine elektrische Energie vorhanden ist:

- Turbine (jeweils Hoch- und Tiefdruckturbinen), Wirkungsgrad=38%⁹³
- Generator (SGen-1000A), Wirkungsgrad=98.94%⁹⁴
- Transformator, Wirkungsgrad=99%⁹⁵

Der gesamte Wirkungsgrad der oben aufgelisteten Stufen beträgt 13.85%.

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Turbine}}^2 \cdot \eta_{\text{Generator}}^2 \cdot \eta_{\text{Transformatoren}}^2 = 38\%^2 \cdot 98.94\%^2 \cdot 99\%^2 = 13.85\%$$

Daraus ergibt sich ein Verlust von 86.16%, der bei der Stromerzeugung auftritt. Zudem muss noch die 64.5 MJ⁹⁶ von der Kühlung berücksichtigt werden. Addiert man nun den auftretenden Verlust zu der angegebenen Bruttoleistung hinzu, ergibt dies eine Leistung von 790.48 MW.

$$P_{\text{Stromerzeugung}} = \frac{P_{\text{BruttoKKW}}}{100\%} \cdot (2 \cdot 100\% - 13.85\%) + P_{\text{Kühlung}} = \frac{390\text{MW}}{100\%} \cdot (2 \cdot 100\% - 13.85\%) + 64.5\text{MW}$$

$$P_{\text{Stromerzeugung}} = 790.48\text{MW}$$

Als nächstes müssen wir herausfinden, wie viele Kernspaltungen von Nöten sind um diese Energie zu erzeugen

⁹² Führung KKW Mühleberg, (14. Nov. 09)

⁹³ Siemens Schweiz, W. Portmann E-Mail: werner.portmann@siemens.com, (14. Dez. 09)

⁹⁴ <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/generators/sqen-1000a-series.htm>, (8. Jan. 10)

⁹⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad>, (8. Jan. 10)

⁹⁶ Siehe Punkt 13.1

Aus der Berechnung bei Punkt 5.4.2.1 wissen wir, dass bei einer Kernspaltung 218.8 MeV Energie entsteht. Davon lässt sich aber nur die kinetische Energie verwenden, die den Moderator erhitzt. Die kinetische Energie beträgt etwa 82%⁹⁷ der gesamten Spaltungsenergie, was eine nutzbare Energie von 180.5 MeV ergibt.

$$E_{\text{Kinetisch}} = \frac{E_{\text{Kernspaltung}}}{100\%} \cdot 82\% = \frac{218.8 \text{ MeV}}{100\%} \cdot 82\% = 180.5 \text{ MeV}$$

Um diesen Wert auch brauchen zu können, muss er in Joule umgerechnet werden. 1 Joule entspricht einem Watt (wir betrachten die Leistung während einer Sekunde) und 180.5 MeV sind $28.91 \cdot 10^{-12}$ Joule.

$$E_{\text{Joul}} = E_{\text{Kinetisch}} \cdot e = 180.5 \text{ MeV} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ As} = 28.91 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 28.91 \cdot 10^{-12} \text{ W}$$

Nun lässt sich ermitteln, wie viele Kernspaltungen von Nöten sind, um die 790.48 MW Leistung zu erhalten.

$$n_{\text{Kernspaltungen}} = \frac{P_{\text{Stromerzeugung}}}{E_{\text{Joul}}} = \frac{790.48 \text{ MW}}{28.91 \cdot 10^{-12} \text{ W}} = 27.34 \cdot 10^{18}$$

Geht man davon aus, dass die gesamte Energie welche bei der Kernspaltung entsteht genutzt werden könnte, so ergäbe das eine Bruttoleistung von 958.42 MW.

$$P_{\text{Brutto}} = E_{\text{Kernspaltung}} \cdot e \cdot n_{\text{Kernspaltungen}} = 218.8 \text{ MeV} \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \cdot 27.34 \cdot 10^{18} = 958.42 \text{ MW}$$

Unter Berücksichtigung der 4-wöchigen Wartungspause, könnte so im idealen Fall in einem Jahr 7.75 TWh Strom erzeugt werden.

$$W_{\text{Jahr}} = P_{\text{Brutto}} \cdot 24 \text{ h} \cdot 337 \text{ a} = 958.42 \text{ MW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 337 \text{ a} = \underline{\underline{7.75 \text{ TWh}}}$$

14.2 Fehlerabschätzung

Diese Berechnung könnte sehr ungenau sein, da wir auf dem Gebiet der Kernspaltung keinerlei Erfahrungen haben. So wird es noch eine Vielzahl von weiteren Variablen geben die die Energieeffizienz beeinträchtigen.

Dasselbe gilt auch bei der Stromerzeugung. Allein bei den Turbinen können Faktoren wie die Kühltemperatur, Dampfqualität, etc. den Wirkungsgrad stark beeinflussen. So haben wir auch bei der Stromerzeugung, nach Anfragen bei den Herstellern, möglichst realistische Werte angenommen.

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass wahrscheinlich noch diverse weitere Verluste hinzugekommen wären.

⁹⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung>, (8. Jan. 10)

15 Betriebsunterhalt

Der Betrieb eines Kernkraftwerks benötigt ebenfalls Energie. Das Kernkraftwerk nimmt für seinen Unterhalt die elektrische Energie direkt von den Transformatoren. Diese Energie wird zum Beispiel für die vielen Rechner in der Überwachungszentrale, für die verschiedensten der 12'000 Messgeräten und den automatischen Sicherheitsbarrieren verwendet. Aber nicht zuletzt wird auch elektrische Energie für die Überwachung des Geländes durch eine Sicherheitsfirma, für Beleuchtung und Kantine gebraucht. Im Kernkraftwerk arbeiten insgesamt 300 Mitarbeiter⁹⁸ in diversen Bereichen.

Die Kraftwerksbetreiber von Mühleberg legen ihre Zahlen für den Betriebsunterhalt offen. Die Eigenleistung beträgt 17 MW.⁹⁹

15.1 Berechnung Betriebsunterhalt in einem Jahr

$$W = P \cdot t = 17\text{MW} \cdot (365 \cdot 24\text{h}) = \underline{\underline{148.92\text{GWh}}}$$

15.2 Fehlerabschätzung

Der angegebene Energieverbrauch bezieht sich auf den Normalbetrieb im KKW. Doch für vier Wochen, in der die jährlichen Revisionsarbeiten erledigt werden, wird der Eigenverbrauch bestimmt nicht mehr gleich sein. Bei der Berechnung nahmen wir aber an, dass dieser ungefähr gleich sein würde.



Abb. 34 Überwachungszentrale¹⁰⁰

⁹⁸ http://www.bkw-fmb.ch/de/energie/energiequellen/kernkraft/kernkraft_muehleberg.html, (13. Dez. 09)

⁹⁹ Führung KKW Mühleberg, (11. Nov. 09)

¹⁰⁰ http://www.bkw-fmb.ch/de/unternehmen/besucher/kkw_m_hleberg/detailsangaben.html, (10. Dez. 09)

16 Entsorgung

Wie bereits beim Punkt 7.2 erwähnt, ist die einzige Methode zur sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle, nach heutigem Wissen, ein geologisches Tiefenlager. Doch in der Schweiz existieren noch keine geologischen Tiefenlager. Deshalb werden momentan noch alle Abfälle im Nationalen Zwischenlager ZWILAG in Würenlingen im Kanton Aargau zwischengelagert.

Für die sichere Entsorgung eines Brennelements muss mit Kosten in Höhe einer halben Million CHF¹⁰¹ gerechnet werden. Für diese Kosten müssen die Profiteure der Kernenergie aufkommen.¹⁰² Das sind die Verbraucher der Energie aus den KKWs. Dies bezahlen wir heute über den Strompreis, davon betragen die Gebühren für die Entsorgung 1Rp. pro kWh¹⁰³. Das Geld für die Endlagerung und Überwachungsphase, die erst in mehreren Jahren gebraucht wird, zahlen die KKW Betreiber in den Entsorgungsfonds ein.¹⁰⁴

Die Brennelemente, welche in der jährlichen Revision ersetzt werden, lagern für sieben Jahre im Reaktorbecken unter Wasser. Dort verlieren sie einen Grossteil an Wärme. Danach werden sie in spezielle Behälter Namens CASTOR (cask for storage and transport of radioactive material)¹⁰⁵ verpackt und ins ZWILAG gebracht. Der CASTOR bietet Platz für 52 Brennelemente und wiegt etwa 120 Tonnen¹⁰⁶. Im ZWILAG befinden sich heute insgesamt 20 solche Behälter.¹⁰⁷

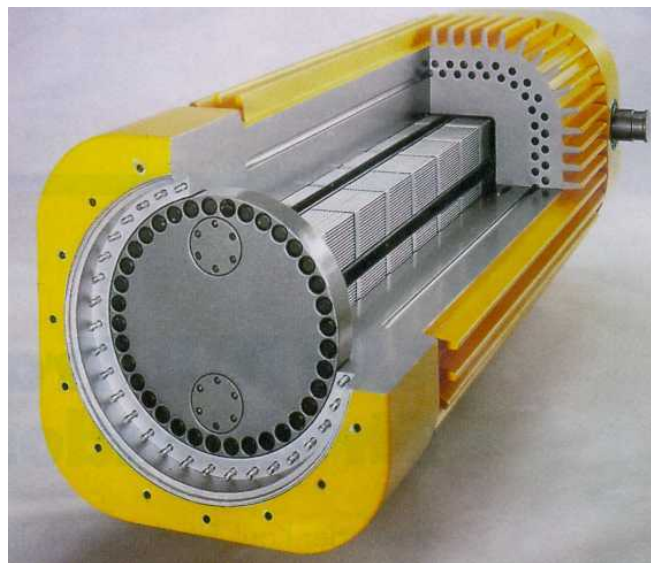


Abb. 35 Modell eines CASTOR Behälters¹⁰⁸

¹⁰¹ Führung KKW Mühleberg, (11. Nov. 2009)

¹⁰² Art. 31.1 Kernenergiegesetz Stand 1. Jan. 09

¹⁰³ Führung KKW Mühleberg, (11. Nov. 2009)

¹⁰⁴ www.entsorgungsfonds.ch, (16. Dez. 09)

¹⁰⁵ [http://de.wikipedia.org/wiki/Castor_\(Kerntechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Castor_(Kerntechnik)), (12. Dez. 09)

¹⁰⁶ [http://de.wikipedia.org/wiki/Castor_\(Kerntechnik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Castor_(Kerntechnik)), (12. Dez. 09)

¹⁰⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Plasmaschmelzanlage>, (13. Dez. 09)

¹⁰⁸ <http://www.old.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/radioabfall/Castor2.jpg>, (19. Dez. 09)

16.1 Berechnung Transport nach Würenlingen

Koordinaten: KKW Mühleberg 46.969118,7.26914

ZWILAG Würenlingen 47.537761,8.244671

Berechnung der Strecke mit dem Map24 Routenplaner: 125.6 km in 2 Stunden und 14 Minuten mit dem LKW. Der durchschnittliche Verbrauch des LKWs wurde mit Hilfe des Verbraucherdiagramms des Volvo FH16 ermittelt.¹⁰⁹

16.1.1 Abgebrannte Brennelemente

$$s = 125.8 \text{ km}$$

$$H_{i\text{Diesel}} = 11.8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Diesel}} = 833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.833 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$V_{\text{hin}} = s \cdot d_{\text{Verbrauch}120t} = 125.6 \text{ km} \cdot 51.18 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} = 64.28 \text{ l}$$

$$V_{\text{zurück}} = s \cdot d_{\text{Verbrauch}0t} = 125.6 \text{ km} \cdot 28 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} = 35.17 \text{ l}$$

$$W = (V_{\text{hin}} + V_{\text{zurück}}) \cdot \rho_{\text{Diesel}} \cdot H_{i\text{Diesel}} = (64.28 \text{ l} + 35.17 \text{ l}) \cdot 0.833 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 11.8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 977.54 \text{ kWh}$$

Da in einem solchen Behälter aber mehr als 36 Brennelemente, nämlich genau 52, Platz haben, muss dies ebenfalls noch berücksichtigt werden.

$$W_{\text{proJahr}} = \frac{36}{52} \cdot W = \frac{36}{52} \cdot 977.54 \text{ kWh} = \underline{676.76 \text{ kWh}}$$



Abb. 36 Schwertransporter mit abgebrannten Brennelementen¹¹⁰

¹⁰⁹ Siehe Punkt 12

¹¹⁰ <http://kernenergie.ch/de/transporte-sicherheit.html>, (13. Dez. 09)

16.1.2 Schwach- und Mittelaktive Abfälle

Im Jahre 2008 entstanden im KKW Mühleberg insgesamt 125 Fässer mit schwach- und mittelaktiven Abfällen. Ein Fass mit 200l Inhalt besteht aus einem Gebinde mit Beton. Alle diese Fässer müssen mindestens zwei Jahre im KKW gelagert werden, bevor sie ins ZWILAG transportiert werden dürfen.

$$\rho_{\text{Beton}} = 2.2 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \quad 111$$

$$m = V \cdot \rho = (125 \cdot 200\text{l}) \cdot 2.2 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 55\text{t}$$

Pro Jahr werden insgesamt sieben Fahrten in das ZWILAG nach Würenlingen getätigt.

$$m_{\text{proFahrt}} = \frac{m}{7} = \frac{55\text{t}}{7} = 7.86\text{t}$$

$$s = 125.8\text{km}$$

$$H_{\text{iDiesel}} = 11.8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\rho_{\text{Diesel}} = 833 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0.833 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$V_{\text{hin}} = s \cdot d_{\text{Verbrauch}7.9\text{t}} = 125.6\text{km} \cdot 29.52 \frac{\text{l}}{100\text{km}} = 37.08\text{l}$$

$$V_{\text{zurück}} = s \cdot d_{\text{Verbrauch}0\text{t}} = 125.6\text{km} \cdot 28 \frac{\text{l}}{100\text{km}} = 35.17\text{l}$$

$$W_{\text{proFahrt}} = (V_{\text{hin}} + V_{\text{zurück}}) \cdot \rho_{\text{Diesel}} \cdot H_{\text{iDiesel}} = (37.08\text{l} + 35.17\text{l}) \cdot 0.833 \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 11.8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 710.13\text{kWh}$$

$$W = 7 \cdot W_{\text{proJahr}} = 7 \cdot 710.13\text{kWh} = \underline{4.97\text{MWh}}$$

16.2 Plasmaverbrennungsanlage

Die Plasma-Anlage dient hauptsächlich dafür, das Volumen des schwach- und mittelaktiven Abfalls zu verringern. Im ZWILAG steht die weltweit erste Anlage solcher Art, welche das Volumen des Abfalls auf rund 20% reduzieren kann.¹¹²

Der Plasmabrenner arbeitet mit einer Temperatur von 15'000 bis 20'000°C. Dazu benötigt er eine Leistung von 1200 kW.¹¹³

$$W = P \cdot t = 1200\text{kW} \cdot (125 \cdot 2\text{h}) = \underline{300\text{MWh}}$$

Heute stehen im ZWILAG rund 723 solche Fässer mit je 200l Inhalt bereit, um in einem Tiefenlager endgelagert zu werden.¹¹⁴

¹¹¹ http://home.datacomm.ch/thoeni.spiez/Mathematik/8. Klasse/8.26 Dichte/body_8.26_dichte.html, (19. Dez. 09)

¹¹² http://www.zwilag.ch/infocenter/news_media_detail.asp, (13. Dez. 09)

¹¹³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Plasmaschmelzanlage>, (13. Dez. 09)

16.3 Geologisches Tiefenlager

Die Endlagerung steckt noch in den Kinderschuhen. Interessanterweise hat man sich beim Bau in den 70er Jahren noch keine konkreten Vorstellungen gemacht, wo und wie man die Abfälle entsorgen könnte. Hochaktive Abfälle benötigen 300'000 Jahre, bis die Radioaktivität auf einen natürlichen Normalwert abgeklungen ist. Der Bundesrat hat sich für das Konzept des Tiefenlagers der Nagra entschieden. Doch die Standortwahl ist eine extrem schwierige Aufgabe der Nagra, da die Anwohner in der Schweiz immer Mitspracherecht haben.

Die schwierige Frage der Energiebilanz der geplanten geologischen Tiefenlager leiteten wir Nagra weiter. Die Kommunikationsverantwortliche der Nagra, Frau Jutta Lang, antwortete uns darauf wie folgt: „Die Erstellung einer Umweltbilanz für ein geologisches Tiefenlager macht im Moment noch keinen Sinn. Man müsste zu viele Annahmen treffen und auf zu viele verallgemeinernde Schätzungen zurückgreifen, so dass das Ergebnis wenig aussagekräftig und mit einer grossen Unsicherheit behaftet wäre. Zum Beispiel weiss man aus Erfahrungen solcher Umweltbilanzierungen, dass Transporte einen grossen Teil der sogenannten sekundären Umweltauswirkungen ausmachen. Um die Transporte realistisch bilanzieren zu können, müsste man aber zumindest den Standort kennen. Dies ist zurzeit jedoch noch nicht der Fall. Generell kann man aber annehmen, dass die Umweltbelastungen (Energieaufwand) für den Lagerbau und -betrieb kleiner sind, als der Energiegewinn durch die Kernkraftwerke. Umweltbilanzierungen für geologische Tiefenlager werden mit grosser Wahrscheinlichkeit zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt.“¹¹⁵

16.4 Fehlerabschätzung

Bei der Berechnung wurde der Bau des Tiefenlagers, die Transporte dorthin, die Einlagerung und Überwachung nicht berücksichtigt, da dies erst auf dem Papier steht. In der ganzen Welt gibt es noch kein einziges geologisches Tiefenlager, aber es wurden bereits mehrere Milliarden für die Forschung ausgegeben und dennoch kann niemand behaupten, dass dieses Konzept wirklich standhalten wird.

Es ist wichtig, dass die Abfälle aus den Tiefenlagern zurückgebaut werden können, falls jüngere Generationen bessere Entsorgungslösungen haben. So übergeben wir die Verantwortung einfach unseren Nachkommen weiter, da wir momentan nicht in der Lage sind, dies selber zu erledigen.

Da bei dem Thema Endlagerung nur ein sehr kleiner Teil untersucht werden konnte, wird bei diesem Punkt eine grosse Abweichung zum tatsächlichen Energieverbrauch entstehen.

¹¹⁴ http://www.zwilag.ch/infocenter/news_media_detail.asp, (13. Dez. 09)

¹¹⁵ Anfrage Nagra, (15. Dez. 09)

16.5 Interpretation

Beschreibung	Energieverbrauch
Transport der 36 abgebrannten Brennelemente von Mühleberg nach Würenlingen	676.76 kWh
Transport von 125 Fässern mit schwach- und mittelaktiven Abfälle von Mühleberg nach Würenlingen	4.97 MWh
Plasmaverbrennungsanlage um die 125 Fässer zu verkleinern	300 MWh
Bau, Transport, Einlagerung und Überwachung der geologischen Tiefenlager	Dieser Punkt konnte nicht berücksichtigt werden.
Summe der Entsorgung	305.65 MWh

17 Fazit

Nun möchten wir alle errungenen Erkenntnisse und Resultate zusammenfassen und auswerten.

17.1 Energieerzeugung

Brennstäbe besitzen eine sehr hohe Energiedichte. Beim KKW Mühleberg wäre die mögliche Energie, welche die Brennstäbe entwickeln könnten, 958.42 MW¹¹⁶. Physikalisch bedingt, lässt sich aber die Energie der Brennstäbe nicht direkt nutzen. Es sind mehrere Vorgänge von Nöten um diese Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Jede dieser Umwandlungsstufen verursacht unterschiedlich hohe Verluste.

17.1.1 Eingespeiste Jahresenergie

Das Kernkraftwerk Mühleberg besitzt eine Bruttoleistung von 390 MW und ist rund um die Uhr in Betrieb. Einzige Ausnahme sind die jährlich wiederkehrenden Revisionsarbeiten von je vier Wochen.

Daraus ergibt sich eine Jahresenergie von 3.15TWh.

$$W_{\text{Brutto}} = P \cdot t = 390\text{MW} \cdot (365 - 4 \cdot 7) \cdot 24\text{h} = \underline{\underline{3.15\text{TWh}}}$$

17.1.2 Berechnung

Wie wir aus Punkt 14.1 wissen, beträgt die mögliche Jahresenergie 7.75 TWh. Somit beträgt der Wirkungsgrad des KKW Mühleberg, hinsichtlich der Energieerzeugung, 37.08%.

$$\eta_{\text{Erzeugung}} = \frac{W_{\text{Brutto}}}{W_{\text{Kernspaltung}}} \cdot 100\% = \frac{3.15\text{TWh}}{7.75\text{TWh}} \cdot 100\% = \underline{\underline{40.64\%}}$$

Der Energieverlust setzt sich aus mehreren Elementen zusammen. Zum einen die elektrische Stromerzeugung mit den Turbinen, Generatoren und Transformatoren, und zum anderen aus der Kühlung und der Kernspaltung.

¹¹⁶ Punkt 14.1

Im Detail sieht das wie folgt aus:

Beschreibung	Energieverlust	Energiegewinn
Freiwerdende Energie		7.75 TWh
Kernspaltung	1.25 TWh	
Kühlung	521.5 GWh	
Turbine	2.74 TWh	
Generator	799.7 MWh	
Transformator	711.7 MWh	
Summe	4.47 TWh	7.75 TWh

Als Kuchendiagramm (Abb. 37 Energieerzeugungs-Verluste) dargestellt, wird deutlich, wie gross die Verluste bei der Kernspaltung und den Turbinen sind.

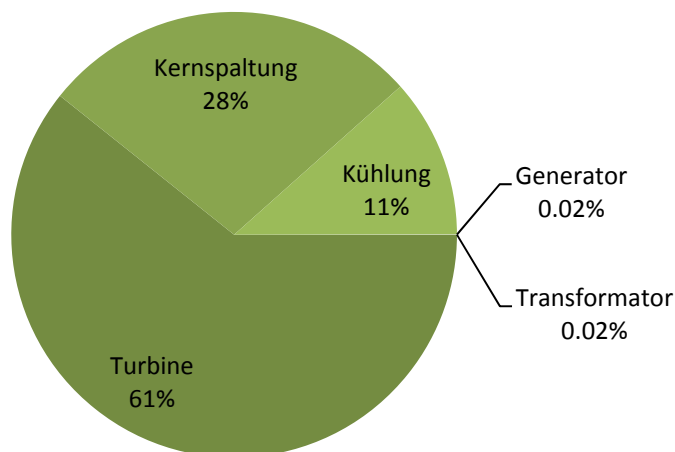


Abb. 37 Energieerzeugungs-Verluste

17.1.3 Fehlerabschätzung

Unser Resultat für den Wirkungsgrad der Energieerzeugung ist ziemlich genau. Die eingespeiste Jahresenergie ist eine bestätigte Angabe der BKW. Sie ändert jedoch von Jahr zu Jahr ein wenig, da die Leistung bei kleinen Störungen oder zu heissem Aarewasser geringfügig reduziert werden muss. Im letzten Jahr (2009) betrug die Jahresgesamtenergie 3092 GWh.¹¹⁷ Die einzige Unbekannte war die freiwerdende Energie bei der Kernspaltung. Dort könnte die einzige Fehlerquelle sein.

¹¹⁷ 20min vom 6. Jan. 10

17.2 Energieaufwand

Beim Energieaufwand haben wir die eingespeiste Energie des KKW Mühlebergs mit der Energie berücksichtigt, welche wir Menschen aufwenden müssen um die eingespeiste Energie zu produzieren. Alle vorangegangenen Ergebnisse der einzelnen Punkte des Urankreislaufs werden hier nun zusammengefasst.

Beschreibung	Energieverbrauch	Energiegewinnung
Eingespeiste Jahresenergie		3.15 TWh
Vier jähriger Bau des KKW Mühleberg	7.91 GWh	
Betriebsunterhalt in einem Jahr	148.92 GWh	
Uranabbau, Aufbereitung und Transport zu den Anreicherungsanlagen	19.6 MWh	
Urananreicherung von 6.84 Tonnen mit 4% ²³⁵ Uran	107.67 GWh	
Brennelementherstellung	5.29 GWh (2% des Energieaufwandes)	
Transport der fertigen Brennelemente von Kalifornien nach Mühleberg	4.11 MWh	
Entsorgung	305.65 MWh	
Summen	270.12 GWh	3.15 TWh

Wie beim Kuchendiagramm (Abb. 38 Energieaufwand) sehr schön ersichtlich ist, muss bei den Punkten Anreicherung und Betriebsunterhalt am meisten Energie aufgewendet werden. Die restlichen Punkte sind fast vernachlässigbar klein.

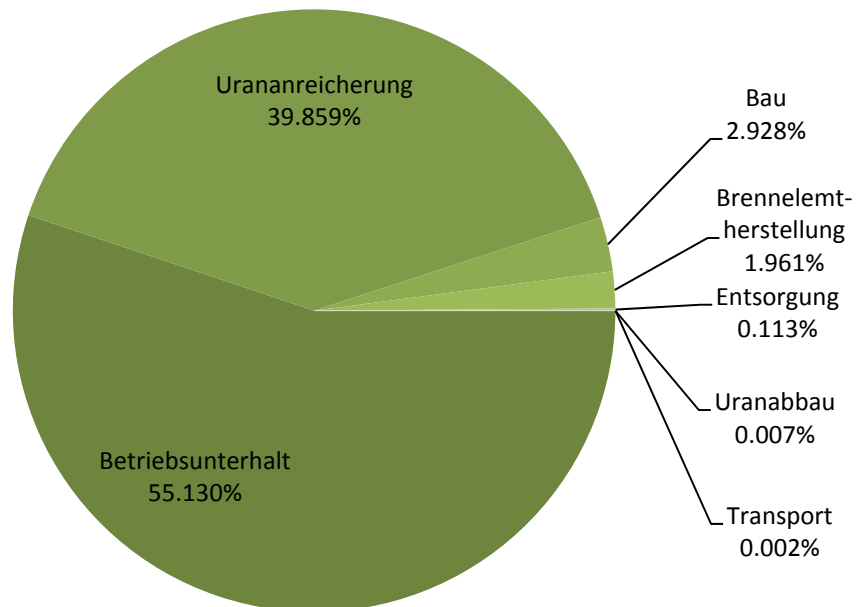


Abb. 38 Energieaufwand

17.2.1 Berechnung

Daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad von 91.42%

$$\eta_{\text{Aufwand}} = 100\% - \frac{W_{\text{Energieverbrauch}}}{W_{\text{Energiegewinnung}}} \cdot 100\% = 100\% - \frac{270.12 \text{ GWh}}{3.15 \text{ TWh}} \cdot 100\% = \underline{\underline{91.42\%}}$$

17.2.2 Fehlerabschätzung

Beim Energieaufwand sind wir mit unserem errechneten Wirkungsgrad von 91.42% viel zu hoch. Die Hauptfehlerquelle ist als erstes die Anreicherung und der Abbau. Die Energie, die für die Anreicherung benötigt wird, sollte mehr als die Hälfte des Gesamtenergieaufwandes betragen. Die Berechnungen für die Anreicherung und auch die vom Abbau wurden optimal ausgerechnet. Das heisst, dass die jeweiligen Anlagen einen Wirkungsgrad von 100% haben und dabei vollkommen wartungsfrei sein müssten. Das wird aber bei der Gasdiffusionsmethode sicherlich nicht der Fall sein. Ausserdem benötigt jedes Gebäude zusätzlich Strom für die Überwachung, Beleuchtung und Beheizung. Die zweite grosse Fehlerquelle ist die Entsorgung. In diesem Punkt konnte momentan nur das Zwischenlagern der Abfälle beachtet werden. Der Bau eines geologischen Tiefenlagers würde nicht nur viel Kosten, sondern auch eine Menge Energie verschlingen. Nicht zu vergessen sind die Überwachung und die Wahrscheinlichkeit, dass zukünftige Generationen unseren Abfall zurückbauen und anders entsorgen müssten. Unsere Ergebnisse beim Bau, Transport und Betriebsunterhalt entsprechen ziemlich genau den tatsächlichen Werten. Bei diesen Berechnungen konnten wir auf bestehende Erfahrungswerte zurückgreifen.

17.3 Energieeffizienz

Unter Energieeffizienz verstehen wir den Faktor, der entsteht, wenn man von der möglichen Energie die nutzbare Energie abzieht.

Nimmt man den Wirkungsgrad aus Punkt 17.1.2 und den aus Punkt 17.2.1 kann man den gesamten Wirkungsgrad errechnen.

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Erzeugung}} \cdot \eta_{\text{Aufwand}} = 40.64\% \cdot 91.42\% = \underline{\underline{37.1\%}}$$

In den erhaltenen **37.1%** sind nun alle, von uns berücksichtigten Verluste enthalten.

Abschliessend lässt sich sagen, dass das KKW Mühleberg zwar ein grosser Energie-lieferant ist, aber dennoch viel mehr möglich wäre. Ein sinnvoller Punkt wäre, z.B. die Nutzung der Abwärme. Nur die Kernkraftwerke Beznau und Gösgen versorgen rund 18'000 Menschen und eine Kartoffelfabrik mit Fernwärme.¹¹⁸ Würde man auch noch den Punkt Endlagerung und daraus eventuell entstehende Umweltschäden berücksichtigen, so müsste man mit grösster Wahrscheinlichkeit den erhaltenen Wirkungsgrad noch drastisch nach unten korrigieren.

17.3.1 Fehlerabschätzung

Alle Fehler und Abweichungen der vorangehenden Berechnungen werden sich in diesem Endresultat addieren. So gesehen und in Anbetracht von bereits bekannten Abweichungen, wird dieses Resultat nur einen Annäherungswert sein und nicht ganz der Realität entsprechen. Trotzdem sind wir mit unseren Berechnungen in dem zu erwartenden Bereich von rund 30% - 40%.¹¹⁹

¹¹⁸ <http://kernenergie.ch/de/energieeffizienz.html>, (6. Jan. 10)

¹¹⁹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad#Beispiele>, (21. Jan. 10)

17.4 Vergleich zu anderen Kraftwerken

Für das bessere Verständnis sehen sie in untenstehender Tabelle den Vergleich der Wirkungsgrade anderer Energiegewinnungssysteme:

Kraftwerk	Wirkungsgrad
Photovoltaik-Anlage ¹²⁰	10% - 17%
Geothermie-Kraftwerk ¹²¹	10% - 14%
Kohlekraftwerk ¹²²	30% - 45%
Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk ¹²³	50% - 60%
Wasserkraftwerk ¹²⁴	80% - 90%
Windkraftanlage ¹²⁵	50%

¹²⁰ <http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/energieeffizienz.htm>, (21. Jan. 10)

¹²¹ <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad#Beispiele>, (21. Jan. 10)

¹²² <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad#Beispiele>, (21. Jan. 10)

¹²³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad#Beispiele>, (21. Jan. 10)

¹²⁴ <http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/energieeffizienz.htm>, (21. Jan. 10)

¹²⁵ <http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/energieeffizienz.htm>, (21. Jan. 10)

18 Schlusswort

Diese interdisziplinäre Projektarbeit war für uns sehr lehrreich und spannend. Sie zeigte uns nicht nur die Sonnen-, sondern auch die Schattenseiten der Kernenergie. Als wir mit dieser Arbeit angefangen haben, waren wir der Meinung, dass die Kernkraft eine sinnvolle und notwendige Energiequelle darstellt. Doch wir sahen unsere Annahme nicht bestätigt, dass es sich bei der Kernenergie um eine zukunftsorientierte und saubere Technik handelt. Auch diese Stromproduktion weist grosse energetische Verluste der einzelnen Produktionsschritte auf. Ausserdem sind die radioaktiven Strahlen und vor allem der Uranabbau extrem belastend für Mensch und Umwelt. Zudem ist die Problematik der Endlagerung noch immer nicht zufriedenstellend gelöst.

Trotz grossem Interesse und Engagement bemerkten wir während der Arbeit, dass unser Ziel extrem hoch gesteckt war. Es war nicht nur schwierig, die benötigten Informationen zu beschaffen, sondern auch diese auszuwerten. Unserer Meinung nach ist es uns trotzdem gut gelungen, Licht in das Thema Energieeffizienz vom KKW Mühleberg zu bringen.

Kevin Gerber

Simon Grossenbacher

Glossar & Quellen

19 Glossar

Wort	Beschreibung
Absorptions-spektrum	Ein Absorptionsspektrum ist ein elektromagnetisches Spektrum, das entsteht, wenn breitbandiges Licht Materie durchstrahlt und Lichtquanten (Photonen) bestimmter Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche dabei absorbiert werden.
Absorption	Absorption kommt vom lateinischen absorbtio und bedeutet saugen, absaugen oder aufsaugen. Man unterscheidet verschiedene Arten von Absorptionen. Physikalische, chemische und volkswirtschaftliche Absorption. Bei unserem Thema kommt vorzugsweise die Physikalische zum Zuge.
Actinoide	Actinoide ist eine Gruppe im Periodensystem. Alle Actinoide sind radioaktiv und gehören zu den Metallen.
AKW	Atomkraftwerk (Synonym für KKW)
Angebot und Nachfrage	Marktgleichgewicht nennt man in der Wirtschaftswissenschaft die Situation auf einem Markt, in der die Menge des Angebots gleich der Nachfragemenge ist.
Anreicherung	Es ist von Nöten das Natururan (99.3% ^{238}U und 0.7% ^{235}U) für die KKW auf einen 3% bis 5% ^{235}U -Gehalt anzureichern. Um dies zu erreichen, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung.
Atom	Die Atome sind Grundbausteine der Materie. Sie sind die kleinste Einheit, in die sich Materie mit chemischen oder mechanischen Mitteln zerlegen lässt.
Atomkern	Jedes Atom ist aus einem Atomkern und einer ihn umgebenden Elektronenhülle aufgebaut. Der Atomkern ist das Zentrum eines Atoms. Der Grossteil der Masse eines Atoms ist in diesem (im Verhältnis zum gesamten Atom) kleinen Atomkern konzentriert. Die Elektronenhülle ist hingegen fast masselos. Der Atomkern besteht aus Neutronen und Protonen. Er ist bei radioaktiven Isotopen nicht stabil. In diesem Fall versucht der Kern durch Aussenden von radioaktiver Strahlung oder Spaltung in einen stabilen Zustand überzugehen.
Bar (Einheit)	Veraltete aber noch häufig gebrauchte Einheit für den Druck. Ein bar sind 100.000 Pa. Ein bar (oder 10^5 Pascal) entspricht in etwa dem Atmosphärendruck auf Meereshöhe.
Bindungsenergie	Bindungsenergie ist diejenige Energie, die frei wird, wenn sich Nukleonen zu einem Atomkern verbinden (Atomkern besitzt eine

	negative potentielle Energie). Dabei entsteht ein kleiner Massenverlust, genannt Massendefekt
BKW	BKW FMB Energie AG
Bor	Bor ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 5. Es gehört zu der Gruppe der Halbmetalle. Bor wird bei Steuerstäben verwendet, da es neutronenabsorbierende Eigenschaften besitzt.
Brennstäbe	Ein Brennstab besteht aus einem dünnwandigen Rohr, in dem die Brennstofftabletten geschichtet sind. Meistens besteht das Hüllrohr aus einer Zirkoniumlegierung. Je nach Reaktortyp und Herstellerland haben die Brennstäbe einen Durchmesser von ca. 10mm. Bei Leistungsreaktoren sind sie etwa 4.5m lang.
Bruttoleistung	Diejenige Leistung die maximal erzeugt wird, ohne jegliche Abzüge wie z.B. mechanische Verluste.
Cadmium	Cadmium ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 48. Es gehört zu der Gruppe der Übergangsmetalle. Cadmium wird bei Steuerstäben verwendet, da es neutronenabsorbierende Eigenschaften besitzt.
Dichte	Die Dichte (genauer: Massendichte) eines Körpers ist das Verhältnis seiner Masse zu seinem Volumen. Formelzeichen: ρ (Roh) Einheit: kg/m^3
Diesel	Dieseldraftstoff (auch Diesel oder Dieselöl genannt) ist ein Gemisch aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen, das als Kraftstoff für einen Dieselmotor geeignet ist. Diesel wird durch Destillation von Rohöl als Mitteldestillat gewonnen.
Diffusion	Molekulare Durchmischung zweier Stoffe
Elektron	Ein Elektron ist ein Elementarteilchen, das eine negative elektrische Ladung trägt. Elektronen bilden die äussere Hülle von Atomen, die mit anderen Atomen reagiert und chemische Bindungen formt, die Moleküle zusammenhalten. Ein Elektronenfluss zwischen zwei Punkten erzeugt einen elektrischen Strom.
Elektronenvolt (eV)	Das Elektronenvolt ist eine gebräuchliche Einheit in der Welt der Teilchen und Atome. Ein Elektronenvolt ist jene kinetische Energie die ein Elektron beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von einem Volt im Vakuum gewinnt. $1 \text{ eV} = 1,60217653 (14) \times 10^{-19} \text{ J}$.
Fraktion	Auf Lateinisch fractio. Steht für Bruch oder Bruchteil.
Gadolinium	Gadolinium ist ein chemisches Element mit der Ordnungszahl 64. Es gehört zu der Gruppe der Lanthanoide. Gadolinium wird bei Steuerstäben verwendet, da es neutronenabsorbierende Eigenschaften besitzt.

GWh	1GWh = 10^9 Wh = 1'000'000'000Wh
Halbwertszeit	Die Halbwertszeit ist jene Zeitspanne, die statistisch gesehen, verstreicht, bis die Hälfte der Atome eines radioaktiven Isotops zerfallen sind. Die Halbwertszeit ist für jedes Isotop eine Konstante und kann nicht beeinflusst werden. Die Halbwertszeit kann je nach Radioisotop von Sekundenbruchteilen bis Jahrmillionen dauern. Stabile Materie hat eine unendlich lange Halbwertszeit, weil sie nicht radioaktiv zerfällt.
Ionisierung	Bezeichnet das Entfernen einzelner Elektronen aus einem Atom oder Molekül. Zurück bleiben positiv geladene Ionen oder Molekülreste.
Isotope	Die Materie wird mit Hilfe des Periodensystems der Elemente nach D. I. Mendelejew (1834–1907) und L. Meyer (1830-1895) eingeteilt. Dieses System ordnet die chemischen Elemente nach ihrer Kernladungszahl (Anzahl der positiv geladenen Protonen im Atomkern). Atome eines Elements können sich aber in der Anzahl der im Kern enthaltenen Neutronen unterscheiden. Atome mit der gleichen Anzahl von Protonen und unterschiedlicher Anzahl von Neutronen im Atomkern werden als Isotope des jeweiligen chemischen Elements bezeichnet.
Joule (J)	SI-Einheit der Energie, [kg m ² s ⁻³], benannt nach dem englischen Physiker James Prescott Joule (1818-1889).
Kaskade	Unter einer Kaskade versteht man das Gesamte einer Zusammenschliessung von mehreren Anreicherungsstufen (werden parallel und seriell zusammengeschlossen).
Kernladungszahl / Ordnungszahl	Die Kernladungszahl wird auch Ordnungszahl, Atomnummer oder Protonenzahl genannt. Sie gibt an, wie viele Protonen sich in einem Atomkern befinden. Ihr Wert entspricht dem der Ladungszahl. Weiter wird durch die Kernladungszahl der Name des chemischen Elements festgelegt.
Kernschmelze	Eine Kernschmelze tritt bei der Überhitzung der Brennstäbe eines Reaktors auf. Dies passiert beispielsweise bei Ausfall der Kühlung, wenn die Temperatur im Brennstoff auf mehr als 2.800 Grad Celsius ansteigt. Mehrmals kam es in Reaktoren bereits teilweise zu einer Kernschmelze.
Kernspaltung	Bei der Kernspaltung trennt sich ein Atom (z.B. ²³⁵ U) in zwei Teile, genannt Spaltprodukte. Dabei wird Energie frei, welche anschliessend für die Gewinnung von elektrischem Strom genutzt werden kann.
Kettenreaktion	Die Kernspaltung als kontinuierlicher Prozess verläuft in einer Kettenreaktion. Dabei spalten sich Atomkerne des Kernbrennstoffs unter Neutronenbeschuss. Sie setzen Energie und neue Neutronen frei. Diese können wieder andere Kerne des Brennstoffs spalten. Wenn die Erzeugung von Neutronen gerade

	ausreicht, um die Reaktion weiter zu erhalten, spricht man von der kritischen Masse. Im überkritischen Fall steigt die Anzahl der Neutronen und damit der Kernspaltungen pro Zeiteinheit an. Diese Form der Vervielfachung verläuft dann exponentiell.
kinetische Energie	Die kinetische Energie wird auch Bewegungsenergie genannt. Sie beschreibt diejenige Energie, die ein Objekt auf Grund seiner Bewegung besitzt. Sie ist abhängig von der Geschwindigkeit und der Masse des Objekts
KKW	Kernkraftwerk (Synonym für AKW)
Kritische Masse	Die kritische Masse ist dann erreicht, wenn in einem spaltbaren Material die Reaktivität gleich eins ist. Das heisst, jede Spaltung löst durchschnittlich eine weitere Spaltung aus.
kWh	$1\text{kWh} = 10^3\text{Wh} = 1'000\text{Wh}$
Massendefekt	Der Massendefekt beschreibt die Differenz zwischen den Nukleonen aus denen der Atomkern besteht und der tatsächlichen Masse des Atomkerns.
Massenzahl	Die Massenzahl, auch Nukleonenzahl genannt, bezeichnet die Anzahl der Nukleonen.
Materialdurchsatz	Unter Materialdurchsatz versteht man die Menge an Material, die in einem Arbeitsschritt verarbeitet werden kann.
Membran	Ein Membran ist eine Trennschicht. Man unterscheidet zwischen Membrane die für die Trennung von Stoffgemischen verwendet werden und solchen die Schwingungen erzeugen oder abändern.
Moderator	Die bei einer Kernspaltung freigesetzten Neutronen sind meistens sehr schnell. Ihre Geschwindigkeit beträgt durchschnittlich 2 MeV. Die Wahrscheinlichkeit, eine weitere Spaltung von ^{235}U auszulösen, ist bei schnellen Neutronen sehr gering. Sie steigt bei langsamen Neutronen stark an. Ein Moderator bremst die schnellen Neutronen ab (optimal sind 0,025 eV, sogenannte thermische Energie). Der Moderator umgibt in der Regel den Brennstoff und besteht normalerweise aus Wasser, manchmal aus schwerem Wasser oder Graphit.
Molekül	Kleinste Einheit einer chemischen Verbindung, die eigenständig existiert. Beispiel: Das Wassermolekül (H_2O) besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom.
MW	$1\text{MW} = 10^6\text{W} = 1'000'000\text{W}$
MWh	$1\text{MWh} = 10^6\text{Wh} = 1'000'000\text{Wh}$
Nettoleistung	Die übriggebliebene Energie nach allen Abzügen, wie zum Beispiel mechanische Verluste.
Neutron	Ein Neutron ist ein elektrisch neutrales Teilchen und Bestandteil

	<p>von Atomkernen. Es hat eine Masse von $1,674.927.211 \times 10^{-27}$ kg. Die Masse des Neutrons ist etwas grösser als die Masse des Protons.</p>
Nukleonen	<p>Ein Nukleon ist ein Baustein des Atomkerns. Es handelt sich dabei um ein Proton oder ein Neutron.</p>
Nuklid	<p>Ein Nuklid ist eine Atomsorte (z.B. Uran). Es wird festgelegt durch die Massenzahl und Kernladungszahl.</p>
Proton	<p>Ein Proton ist ein elektrisch positiv geladenes Teilchen. Es ist Bestandteil von Atomkernen mit einer Masse von $1,67262171 (29) \times 10^{-27}$ Kilogramm. Die Anzahl der Protonen im Atomkern bestimmt das Element und seine chemischen Eigenschaften.</p>
Radioaktivität	<p>Radioaktivität ist die Eigenschaft mancher Substanzen, unsichtbare Strahlen mit hoher Energie auszusenden. Es gibt unterschiedliche Arten von Radioaktivität. Die ausgesendeten Strahlen können Lichtquanten, Neutronen, Heliumkerne, Elektronen, Positronen, Protonen oder Bruchstücke von Atomen sein. Radioaktivität ist ein Naturphänomen, das im Universum allgegenwärtig ist. Der menschliche Körper ist durch die Evolution an ein gewisses Grundmass an radioaktiver Bestrahlung aus dem Kosmos und von der Erde angepasst. Regional kann diese natürliche Dosisbelastung stark unterschiedlich sein (zum Beispiel je nach der geologischen Beschaffenheit). Durch die moderne Medizin und die technischen Anwendungen der Radioaktivität (zum Beispiel in Reaktoren) ist der Mensch einer zusätzlichen radioaktiven Belastung ausgesetzt. Diese kann negative Effekte auf die Gesundheit haben, wenn ein bestimmtes Niveau überschritten wird.</p>
Radongase	<p>Radon ist ein radioaktives, chemisches Element. Sein Symbol ist Rn und seine Ordnungszahl 86. Im Periodensystem der Elemente findet man es in der Hauptgruppe der Edelgase. Unter Normalbedingungen ist Radongas farblos, geruchlos, geschmacklos.</p>
Reaktor	<p>Ein Reaktor ist eine Anordnung von Kernbrennstoff, die kritisch gemacht werden kann. In einem Reaktor finden Kernspaltungen statt. Dabei werden Neutronen freigesetzt. Ein Bruchteil dieser Neutronen wird wiederum in spaltbaren Nukliden absorbiert und kann so weitere Kernspaltungen auslösen. Durch geeignete Anordnung der Reaktormaterialien kann erreicht werden, dass von den pro Spaltung freigesetzten zwei bis drei Neutronen exakt eines wieder eine Spaltung auslöst. Die kontinuierliche Abfolge von Kernspaltungen in einem Reaktor bezeichnet man als Kettenreaktion. Diesen Reaktorzustand nennt man den „kritischen Zustand“ - der Reaktor ist „kritisch“ seine Energieabgabe also damit gleichbleibend über die Zeit.</p>
Rotor	<p>Der Rotor (lat. roatre für kreisen) ist ein sich drehender Teil einer Maschine.</p>

Schweres Wasser	Im Gegensatz zum normalen, leichten Wasser (H ₂ O) besteht schweres Wasser aus Wasserstoffisotopen mit einer höheren Massenzahl. Anstelle des Wasserstoffmoleküls ¹ H im leichten Wasser, verwendet man beim schweren Wasser das nächst schwerere Wasserstoffisotop ² H. In der Fachsprache wird dieses, doppelt so schwere Isotop, Deuterium genannt.
SI-Einheit	Système international d'unités, das internationale Einheitensystem, auch als metrisches System bezeichnet.
Spaltprodukte	Nach einer Kernspaltung (z. B. von Uran) bleiben leichtere Kerne übrig. Diese besitzen gewöhnlich zu viele Neutronen, um stabil zu sein. Diese Spaltprodukte gehen über Zerfälle in stabilere Kerne über, sind aber bis dahin häufig stark radioaktiv.
Steuerstäbe	Die Steuerstäbe werden verwendet um die Anzahl Kernspaltungen kontrollieren zu können. Dabei absorbieren sie die überflüssigen Neutronen. Sie werden aus Bor, Cadmium und Gadolinium hergestellt.
Swisselectric	Organisation der schweizerischen Stromverbundunternehmen. Mitglieder sind ATEL, BKW, CKW, EGL, EOS und Axpo AG.
Swissnuclear	Fachgruppe für Kernenergie der Swisselectric
SWU	Separative Work Unit ist die englische Bezeichnung für Urantrennarbeit.
Trennfaktor	Der Trennfaktor gibt an, um wie viel das Uran pro Anreicherungsstufe angereichert wird.
Trennleistung	Die Trennleistung kann mit der Trennarbeit gleichgesetzt werden.
TWh	1TWh = 10 ¹² Wh = 1'000'000'000'000Wh
Uran	Uran ist ein radioaktives Schwermetall mit der Ordnungszahl 92.
Uranhexafluorid	Uranhexafluorid (UF ₆) ist ein Zwischenprodukt der Urananreicherung. Bei Raumtemperatur ist es weiss und kristallin. Der Siedepunkt des Materials liegt bei etwa 56 Grad Celsius. Bei der Anreicherung wird UF ₆ erhitzt und als Gas in Uranzentrifugen oder auch in Diffusionskaskaden weiter verarbeitet.
Urantrennarbeit	Die Urantrennarbeit gibt an wie viel Kilogramm angereichertes Uran unter gewissen Gegebenheiten (²³⁵ U Konzentrationen des Ursprungsurans, des abgereicherten Urans und des angereicherten Uran) hergestellt werden kann. Ihre Einheit ist angegeben in kg UTA im europäischen Raum, oder in SWU.
UTA	Urantrennarbeit auch SWU genannt.
Verfahrensgas	Als Verfahrensgas bezeichnet man ein Gas, das zur Unterstützung

	eines physikalischen Vorgangs benötigt wird.
Wartungsaufwand	Diejenige Leistung die erbracht werden muss, um eine Maschine betriebsfähig zu halten.
Watt	Das Watt (W) ist die nach dem britischen Physiker James Watt (1739-1819) benannte SI-Einheit für die Leistung. Ein Watt ist jene Leistung, welche Energie von einem Joule pro Sekunde hervorbringt.
Wattstunde (Wh)	Einheit für Energie, $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ Ws}$
Wirkfunktion	Verkettung von mehreren mathematischen Funktionen.
Wirkungsgrad	Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis zwischen aufgewendeter Energie und Energie in der gewünschten Endform. Der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine (wie zum Beispiel eines Verbrennungsmotors oder eben eines Kraftwerks) bezeichnet die Umwandlung der Primärenergie in mechanische Energie. In Einklang mit grundlegenden Theoremen der Physik (Hauptsätze der Thermodynamik) kann eine solche Maschine niemals mehr Energie freisetzen, als sie aufgenommen hat. Die Obergrenze ist durch den sogenannten Carnot'schen Wirkungsgrad gegeben. Je höher der Wirkungsgrad, desto besser ist die Energiebereitstellung.
Zentrifugalkraft	Die Zentrifugalkraft, auch Fliehkraft genannt, ist eine Trägheitskraft, welche in einem rotierenden Bezugssystem auftritt. Die Kraft wirkt dabei vom Mittelpunkt des Rotors senkrecht nach außen.

20 Quellen

In den folgenden paar Seiten werden alle Quellen, die bei dieser Arbeit verwendet wurden, genau beschrieben.

20.1 Internet

Allgemeine Informationen zum Atom Uran

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran>

Autoren: KaiMartin, Boonekamp, Orci, Funkruf, Man21, Cvf-ps, Diba, YourEyesOnly, JWBE, Xqbot, Drahhreg01, Whiteheaddragon, Antonsusi, Dr. cueppers, Aka, MerlLinkBot, Numbo3-bot, MobyDick, GenJack, Howwi, Rotkaeppchen68, Liberatus

Beschreibung: Eine ausführliche Beschreibung des Elements Uran.

BKW KKW Mühleberg

Link: http://www.bkw-fmb.ch/de/energie/energiequellen/kernkraft/kernkraft_muehleberg.html

Autor: BKW-FMB Energie AG

Beschreibung: Offizielle Seite des Kernkraftwerks Mühleberg.

Castor (Cask for storage and transport of radioactive material)

Link: http://de.wikipedia.org/wiki/Castor_%28Kerntechnik%29

Autor: Solid State, Hardenacke, S1, Morten Haan, Felix König, MorbZ-Bot, Umweltschützer, Chatter, C. Mezzo-1, Cleverboy, Staro1, Jonesey, Ede1, Wiegels, H-stt, Nummer9, Heraklitcnl, Krawi, Avoided, Jergen, Louis Bafrance

Beschreibung: Beschreibung des CASTOR Behälters für den Transport und Zwischenlagerung der abgebrannten Brennelemente.

Das geologische Tiefenlager

Link: http://www.nagra.ch/g3.cms/s_page/85450/s_name/loesungstiefenlager

Autor: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle

Beschreibung: Extrem spannende Animationsfilme über das Entsorgungskonzept der Nagra.

Detaillierte Informationen zur Uran – Anreicherung

Link: <http://www.poweron.ch/upload/cms/user/321UrananreicherungUrenco.pdf>

Autor: Urenco

Beschreibung: Sehr viele Informationen zum Thema Urananreicherung. Darunter auch Formeln um die einzelnen Faktoren der Anreicherungen berechnen zu können.

Dichte

Link: http://home.datacomm.ch/thoeni.spiez/Mathematik/8. Klasse/8.26 Dichte/body_8.26_dichte.html

Autor: Peter Thöni

Beschreibung: Angabe der Dichte von Beton und weiteren Stoffen, inkl. Berechnungsgrundlage.

Energieeffizienz

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Energieeffizienz>

Autoren: Ot, Hardenacke, Robtrob, Capaci34, Viola sonans, PeerCee, Tetris L, S1, Conny, Postbote, Dieder, ChrisHamburg, Kaisersoft, Der Rabe Ralf, Dragonv, LKD, Dellex, Praktikantbmu, Gehnichtgibtsnicht

Beschreibung: Begriffsdefinition der Energieeffizienz.

Energieeffizienz von KKW's

Link: <http://kernenergie.ch/de/energieeffizienz.html>

Autoren: Swissnuclear

Beschreibung: Übersicht über die Energieeffizienz von KKW's unter der Berücksichtigung der meisten Verlustfaktoren.

Entsorgungsfonds

Link: <http://www.bfe.admin.ch/entsorgungsfonds/>

Autor: Bundesamt für Energie BFE

Beschreibung: Informationen über die Stilllegungs- und Entsorgungsfonds der Kernanlagen in der Schweiz.

Fakten zur Kernenergie in der Schweiz

Link: http://www.nuklearforum.ch/_upl/files/2009_PDF_DATEN_FAKTEN_dt.pdf

Autor: Nuklearforum Schweiz, Roland Bilanz

Beschreibung: Quellenmaterial mit Texten, Bildern und Grafiken für Präsentationen zur Kernenergiediskussion.

Frachtschiff-Daten

Link: <http://www.motor-talk.de/forum/wieviel-diesel-braucht-man-fuer-den-transport-nach-deutschland-t1545478.html>

Autor: leofranzpower

Beschreibung: Angaben des Dieserverbrauches eines Transportschiffes.

Gasdifussionsverfahren

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gasdiffusionsverfahren>

Autoren: Mi. schaeffner, Peter in s, Blaufisch, RKBot, UvM, Okin, Liborianer, Zwobot, Boemmels, Sentry, Habakuk

Beschreibung: Kurze Beschreibung der Gasdifussionsverfahren.

Gesteinsmühlen

Link: <http://www.mineninfo.com/home/gesteinsmuehlen.html>

Autor: unbekannt

Beschreibung: Beschreibung des Prozesses des Gesteinsmahls.

Informationen zum Generator

Link: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/generators/sgen-1000a-series.htm>

Autor: Siemens

Beschreibung: Technische Informationen zu einem ähnlichen Generator wie er im KKW Mühleberg verwendet wird.

Ionisierende Strahlung

Link: http://de.wikipedia.org/wiki/Ionisierende_Strahlung

Autoren: Gerhardvalentin, MastiBot, Bratengeier, ³²P, Uwe Gille, Wilske, Don Magnifico, SieBot, Leuchtschnabelbeutelchabe, UvM, Qwqchris, Herbertweidner, Louperibot, Suhadi Sadono, Nallimnot, ArthurBot, Martina Steiner, Mnmngb, Uwe Gille, EisfeeNRW, Rosa Schlagfertig, JAnDbot, TXiKiBoT, Leider, DSisyphBot, Drahreg01, Avron

Beschreibung: Beschreibung, Quellen und Wirkung von ionisierender Strahlung.

Kernenergie.ch

Link: <http://www.kernenergie.ch/de/home.html>

Autor: Swissnuclear

Beschreibung: Informationsseite für Leihen, welche sich über die Kernenergie informieren möchten.

Kernenergie: hohe Wertschöpfung ohne Subventionen

Link: http://kernenergie.ch/de/wirtschaft-zahlen-fakten.html#anchor_JIMNHT

Autor: Swissnuclear

Beschreibung: Einige Zahlen und Fakten zu den wirtschaftlichen Faktoren eines KKW's.

Kernkraftwerk Mühleberg im Überblick

Link: <http://www.kernenergie.ch/de/akw-muehleberg.html>

Autor: Swissnuclear

Beschreibung: Kleiner Überblick über das Kernkraftwerk Mühleberg.

Kernreaktor

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernreaktor>

Autoren: Zaibatsu, JAnDbot, Noamik, Baird's Tapir, Dr. cueppers, Quartl, Cepheiden, Peter200, Ennimate, Olorin. o, Nobart, UvM, KaiMartin, Claus Ableiter, Bertonymus, Jshimbi, Janericloebe, Jangirke, Entlink, WAH, AtomFan

Beschreibung: Funktionsweise, Typen und Anwendungen von Kernreaktoren.

Kernspaltung

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kernspaltung>

Autoren: Dominik Vilsmeier, Orci, Leonhard Ochs, GPinareello, Dr. cueppers, Robbot, JAndBot, UvM, Chrkl, Cnagl, Jutta234, BJ Axel, Aka, Muck31, Boonekamp, Jshimbi, Kein Einstein, Janericloebe, Androl, Herbertweidner, Jengelh, Wikijourney, Fax360, DragonBot, SieBot, Jotterbot, PM3, CarsracBot, Xario, Dr. Al. K. Lisch

Beschreibung: Recht detaillierte Informationen zum Thema Kernspaltung

Kernspaltung Übersicht

Link: <http://www.kernenergie.ch/de/kernspaltung.html>

Autor: Swissnuclear

Beschreibung: Grobe Erklärung des Kernspaltungsprinzips.

Krebs & AKW

Link: <http://vorort.bund.net/suedlicher-oberrhein/krebs-kinderkrebs-akw-kkw.html>

Autor: Axel Mayer

Beschreibung: Kritische Internetseite über die Kernenergie.

Krebs & AKW (Studie)

Link: <http://www.bfs.de/de/kerntechnik/kinderkrebs/pm0711.html>

Autor: Bundesamt für Strahlenschutz

Beschreibung: Studie über Krebserkrankungen von Kindern, die in einem 5km Umkreis eines Kernkraftwerkes wohnen.

Laser Uranareicherung

Link: http://www.ge-energy.com/prod_serv/products/nuclear_energy/en/downloads/gle_tech_nov2007.pdf

Autor: Unbekannt

Beschreibung: Grobe Informationen zu der kommenden Urananreicherungs-methode Laser.

Liste der Kernkraftwerke

Link: <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/861002#Schweiz>

Autor: Unbekannt

Beschreibung: Eine Liste aller Kernkraftwerke Weltweit. (Stand Februar 2009)

Plasmaschmelzanlage

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Plasmaschmelzanlage>

Autoren: Cepheiden, Tetris L, Jutta234, MorbZ-Bot, .eXotech, Orci, Goldzahn, Weissbier, Ifrost, S1, Tönjes, Hadhuey, Video2005, NEUROtiker, Thogo, Mion

Beschreibung: Beschreibung der Plasmaverbrennungsanlage vom ZWILAG in Würenlingen.

Reichweite der Uran-Vorräte der Welt

Link: http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/atomkraft/uranreport2006_lf.pdf

Autor: Greenpeace, Peter Diehl

Beschreibung: Kritische Dokumentation zu den Uranvorräten und die Auswirkungen des Uranabbaus.

Siedewasserreaktor

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Siedewasserreaktor>

Autoren: Xqbot, Quartl, Felix König, Pittiman, Magnummandel, Logograph, Lautringer Atsche, YourEyesOnly, Entlinkt, Hardenacke, Ver-bot, Holger1974, Irmgard, FlaBot, Numbo3-bot, Stell98, Onkelkoeln, Georg-Johann, Hannes Röst, Phlo, Jon, Suicidefury, Stefan64, TZV, Samlam, Riso Galloo

Beschreibung: Detaillierter Aufbau und Funktionsprinzip eines Siedewasserreaktors.

Stromverbrauch in der Schweiz

Link: http://www.vbeschweiz.ch/medien/pdfdateien/pdf_alle/Contra_Stromfreesser.pdf

Autor: VBE (Verein der Betreiber Emissionsfreier Heizanlagen)

Beschreibung: Stromverbrauch in der Schweiz.

Typen radioaktiver Abfälle

Link: http://www.nagra.ch/g3.cms/s_page/79840/s_name/typen

Autoren: Nagra

Beschreibung: Beschreibung der Kategorien von radioaktiven Abfällen.

Transport-Sicherheit

Link: <http://kernenergie.ch/de/transporte-sicherheit.html>

Autor: Swissnuclear

Beschreibung: Sicherheitsbestimmungen für den Transport von radioaktiven Abfällen.

Trennung der Uranisotope

Link: <http://bibliothek.fzk.de/zb/kfk-berichte/KFK0859.pdf>

Autor: E. W. Becker

Beschreibung: Sehr detaillierte Informationen zur Trennung von Uran Isotopen, sowie Berechnungsbeispiele. Leider nicht sehr aktuell.

Tschernobyl Katastrophe

Link: http://de.wikipedia.org/wiki/Katastrophe_von_Tschernobyl

Autoren: Muck31, Kosebamse, Stromschnellenreiter, Leyo, Traxer, Rapreim, JD, Alofok, Nikkis, Umweltschützen, XenonX3, Yardsrules, Kalli R, Sbstn, Elya, A1bi, SucramZ, Peter200, Armin P., Daddy0815, Howwi, Ot, Nils160988

Beschreibung: Ausführlicher Bericht über die Katastrophe von Tschernobyl und ihre Folgen.

Umweltbilanzierung in der Gesteinsgewinnung

Link: http://www.baumaschine.de/Portal/Aktuell_0902/Wissenschaft/gesteinsgewinnung/gesteinsgewinnung.pdf

Autoren: Prof. Dr. Carsten Drebenstedt, Dr. -Ing. Pierre Schmieder

Beschreibung: Untersuchung der ökologischen und ökonomischen Aspekte von Abbauprozessen im Festgestein an Modelltagebauen an der TU Bergakademie Freiberg.

Uranabbau Allgemein

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Uranabbau>

Autoren: Rainald62, Markscheider, Geomartin, DonDiego, Lokad, GordonKlimm, Rul Germann, Herbertweidner, Quedel, Triebtäter, Napa, KingLion, JWBE, Ctulhu, Extensive, Thijs!bot, HeikoStamer, Zaphodia, WiWieWiki, Muck31

Beschreibung: Allgemeiner Uranabbau, Vorkommen und Aufbereitung des Erzes.

Uranabbau Methoden

Link: <http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Uranabbau.html>

Autor: Unbekannt

Beschreibung: Aufzeigung der Uranabbaumethoden und deren Gefahren.

Uran – Anreicherung

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Uran-Anreicherung>

Autoren: Quartl, Felix König, UvM, Dr. cueppers, Ulfbastel, Uwe W., Siurenn, Tarantelle, Biomenne, Pittimann, Frankee67, Extensive, MorbZ-Bot, WilfriedC, Informatik, Peter in s, Kam Solusar, Herbertweidner, LabFox, Cinecol, KiloOhk, NebMaatRe

Beschreibung: Allgemeine Daten und Fakten zum Thema Anreicherung.

Uran – Ressource mit Zukunft

Link: <http://kernenergie.ch/de/ressource-uran.html>

Autor: Swissnuclear

Beschreibung: Zusammenfassung von Uranförderländer und Uranabbau.

Urantrennarbeit

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Urantrennarbeit>

Autoren: Schlurcher, Tetris L, Alecs.bot, PixelBot, Florian1477, Mion, Allesmüller, Ixitixel

Beschreibung: Begriffsdefinition des Wortes Urantrennarbeit.

Wasserdaten Mühleberg

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wohlensee>

Autor: Anarabert, Visi-bot, KatBot, Hinterkappelen, KnopfBot, Aso, SieBot, Pincode, AHZ, ThomasPusch, Meleager, SpBot,, Mo4jolo, SteveK, Nargil, Atmarai, Sovereign, Thoemu, Löwenzahn1, Hagelhans, Voyager, SteveK, Crux, Willy on Wheels, Tschubby, LittleJoe, Prui, Achermann

Beschreibung: Unterhalb des KKW Mühleberg befindet sich der Wohlensee mit 610m³/s Wasser.

Wirkungsgrad

Link: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad>

Autoren: Inkowik32, Howwi, HaSee, Zumbo, Renekaemmerer, Micham6, Steindy, Martin Homuth-Rosemann, 1-1111, Hardenacke, UvM, Rr2000, Bla911, Zorrobot, Flo 1, Umweltschützen, PrismaNN, RonnyRidder, Zaibatsu, BMK, MobyDick, Saehrimnir, Jostar

Beschreibung: Begriffsdefinition des Wirkungsgrads.

Wirkungsgrade von Kraftwerken

Link: <http://www.agenda21-treffpunkt.de/lexikon/energieeffizienz.htm>

Autoren: Unbekannt

Beschreibung: Übersicht der einzelnen Wirkungsgrade anderer Energiegewinnungssysteme

ZWILAG Infozentrum

Link: <http://www.zwilag.ch/infocenter/medianote.asp>

Autor: unbekannt

Beschreibung: Offizieller Internetauftritt von ZWILAG (Zentralen Zwischenlager).

20.2 Buch

Druckwasserreaktor

Buchtitel Wie funktioniert das? Die Technik im Leben von heute

Auflage Zweite, vollständige überarbeitete Auflage, 1978

ISBN: 3-411-01732-5

Autor: Kurt Dieter Solf

Beschreibung: Detaillierter Aufbau und Funktionsprinzip eines Druckwasserreaktors.

Funktionsprinzip eines Steuerstabes

Buchtitel Physik

Auflage Dritte, korrigierte Auflage, 2000

ISBN: 3-86025-122-8

Autor: Paul A. Tiber

Beschreibung: Informationen zu allen grundlegenden physikalischen Gesetzen.

Anhang

Projektskizze

Datei: Projektskizze.docx

Beschreibung: Genau Beschreibung unseres Themas (Was und wie der Inhalt unserer Arbeit sein soll)

Zeitplan

Datei: Zeitplan.xlsx

Beschreibung: Unser genau geplanter Ablauf der Arbeit und das was wir erreichen

Arbeitsjournal Kevin Gerber

Datei: Arbeitsjournal_KevinGerber.docx

Beschreibung: Detaillierte Auflistung aller gemachten Schritten

Arbeitsjournal Simon Grossenbacher

Datei: Arbeitsjournal_SimonGrossenbacher.docx

Beschreibung: Detaillierte Auflistung aller gemachten Schritten

Anfragen an Fachkräfte

Datei: Anfragen.docx

Anhang: Ergaenzende_Fragen.docx

Beschreibung: Alle Anfragen die wir während der IdPA tätigten und deren Antworten

Führung KKW Mühleberg

Datei: Fuehrung_KKW_Muehleberg.docx

Beschreibung: Ein Bericht über die Führung im KKW Mühleberg, bei der wir beiwohnten.