

Eigenschaften von Uran [1]

Das Element Uran ist ein silbrig-weißes Metall aus der Reihe der Actinoide und besitzt die Ordnungszahl 92. Es handelt sich um das zweitschwerste nicht-künstliche Element mit einer Dichte von $19,16 \text{ g/cm}^3$ und einer Atommasse von $238,039 \text{ u}$. Jedes der drei natürlich vorkommenden Uranisotope ist ein α -Strahler unterschiedlicher Halbwertszeit, woraus sich die heutige Verteilung der Isotope auf der Erde ergibt. Während das langlebigste $^{238}_{92}\text{U}$ -Isotop mit einer Halbwertszeit von $T_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9 \text{ a}$ etwa 99,27 % des Natururans bildet, kommen die Isotope $^{235}_{92}\text{U}$ ($T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^8 \text{ a}$ / 0,72 %) und $^{234}_{92}\text{U}$ ($T_{1/2} = 2,46 \cdot 10^5 \text{ a}$ / 0,0055%) wesentlich seltener vor. Insgesamt beträgt der Massenanteil von Uran in der Erdhülle 0,0003 %. Bei dem radioaktiven α -Zerfall der Uranisotope entstehen durch Abspaltung eines Helium-4-Kerns jeweils Thoriumisotope, welche über verschiedene Zerfallsreihen schließlich zu stabilen Bleiisotopen zerfallen. Neben der Radioaktivität besitzt Uran ebenfalls eine überragende Bedeutung für die Kernspaltung. Die Instabilität der Atomkerne, der hohe Neutroneneinfangquerschnitt von 586 b (Barns, 1 b entspricht $10^{-28} \text{ m}^2 \approx$ geometrischer Querschnitt eines Uran-Atomkerns) des $^{235}_{92}\text{U}$ -Isotops und die damit verbundene Anregbarkeit durch thermische Neutronen sowie die Aussendung weiterer Neutronen beim folgenden Kernzerfall ermöglichen den Einsatz von ^{235}U als Kernbrennstoff mit selbsterhaltender Kettenreaktion. Ebenso kann aus dem $^{238}_{92}\text{U}$ -Isotop durch Neutroneneinfang das gleichermaßen spaltbare $^{239}_{94}\text{Pu}$ -Isotop gebildet werden. Auf gleichem Weg können die sogenannten Transurane, Elemente mit höherer Ordnungszahl als Uran, durch Neutroneneinfang und anschließende radioaktive Prozesse aus Uranisotopen hergestellt werden.



Abbildung 1 - Uranmetall als Gussstück [2]

Historische Aspekte

Uran wurde 1789 von Martin Heinrich Klaproth als Uranoxid aus Pechblende isoliert und nach dem acht Jahre zuvor entdeckten Planeten Uranus benannt. Die Pechblende stammte aus einem Bergwerk in der Nähe von Johanngeorgenstadt im Erzgebirge. Die erste Reindarstellung von Uran gelang im Jahre 1841 durch Eugène-Melchior Péligot, indem er Urantetrachlorid mit Kalium zum elementaren Uran umsetzte. Bereits zu dieser Zeit kam Uran als gelbgrünlicher Farbstoff in der Glasherstellung (Uranglas) zum Einsatz. Die Erforschung des Urans begann im Jahre 1896 durch Henri Becquerel, welcher erkannte, dass Uranverbindungen Fotopapier schwärzen können. Diese Entdeckung legte den Grundstein für die wissenschaftliche Exploration der Radioaktivität. 1938 entdeckte Otto Hahn



Abbildung 2 - Uranglas [4]



durch Bestrahlung von Uran mit Neutronen das Phänomen der Kernspaltung, welches nur wenige Jahre später zum Bau und Einsatz der Atombombe führte. Erst über zehn Jahre später, im Jahre 1956 ging das erste kommerzielle Atomkraftwerk in Calder Hall, England ans Netz. Der große Nuklearunfall von Fukushima, Japan im Jahre 2011 führte zumindest in Deutschland zu einer Abkehr von der Erzeugung von Strom mittels Kernenergie. Zukünftig wird es eine zentrale Aufgabe sein, die großen Mengen radioaktiv kontaminierter Abfälle aus der Uranwirtschaft umweltgerecht aufzuarbeiten.

Vorkommen

Das Element Uran ist in seinem Vorkommen weltweit verbreitet, wobei es mehrheitlich als Spurenelement auftritt. Uran kommt an keiner Stelle gediegen vor, stattdessen ist es in der Regel gebunden an Sauerstoff in den Oxidationsstufen +4 und +6 anzutreffen [1]. Das Vorkommen von Uranmineralien ist stark an die Reaktionsbedingungen des umgebenden Mediums geknüpft. Die Akkumulation der Uranverbindungen kann nur in einer reduzierenden Umgebung erfolgen, da nur Uran(IV)-Verbindungen wasserunlöslich sind. Uran(VI)-Verbindungen sind demgegenüber sehr gut wasserlöslich und bilden stabile Uranylkomplexe, weswegen Uran unter oxidierenden Bedingungen ein sehr mobiles Element darstellt. Wird Uran durch Niederschläge ausgewaschen, stellt es aufgrund seiner radioaktiven Wirkung eine Gefahr für die umliegende Biosphäre dar [5]. Die natürlichen Uranminerale können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Uran kommt sowohl als reines Oxid, wie beispielsweise Uraninit (UO_2), aber auch als Silikat, Phosphat, Arsenat oder Vanadat vor. Das abgebildete Torbernit ($\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$) stellt einen Vertreter der Uran-Phosphat-Verbindungen dar.



Abbildung 3 – Uraninit [6]



Abbildung 4 – Torbernit [7]

Betrachtet man Uran als strategischen Rohstoff, so besteht global gesehen eine große Diskrepanz zwischen den vorhandenen Ressourcen und Reserven an Uran. Während die weltweiten Uranressourcen etwa 13,7 Mt betragen, sind die zum heutigen Zeitpunkt wirtschaftlich förderbaren Uranreserven auf lediglich ein Zehntel dessen, etwa 1,3 Mt beziffert (2015, [8]). Dabei gelten diejenigen Uranvorkommen als wirtschaftlich, welche die Uranproduktion zu einem Preis von unter 80 US-Dollar pro Kilogramm Natururan ermöglichen. Da der weltweite Uranverbrauch im Jahr 2015 lediglich 60.497 t betrug, ist zumindest kurzfristig kein Uranmangel abzusehen.

Aus Abbildung 5 des BGR wird deutlich, dass sich zwei Drittel der weltweiten Uranressourcen in Nordamerika und Südostasien/Australien befinden. Die größten Uranreserven hingegen befinden sich in Kanada, Kasachstan und Brasilien, welche zusammen genommen über die Hälfte der globalen Reserven verfügen. Wie in Abbildung 6 ersichtlich, wird die weltweite Produktion von Uran von wenigen Ländern dominiert. Das Quintett um Kasachstan, Kanada,



Australien, Niger und Russland ist für über 80 % der weltweiten Uranproduktion verantwortlich. Größter Einzelproduzent ist Kasachstan, welches 2015 mit 23.800 t etwa 39 % der weltweiten Uranproduktion auf sich vereinte.

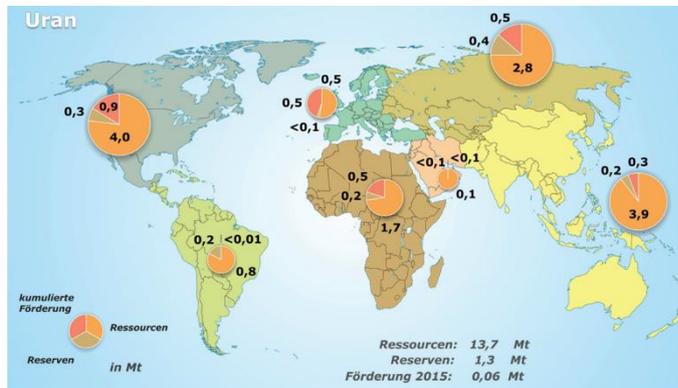


Abbildung 5 – Gesamtpotential Uran 2015: Regionale Verteilung [8]

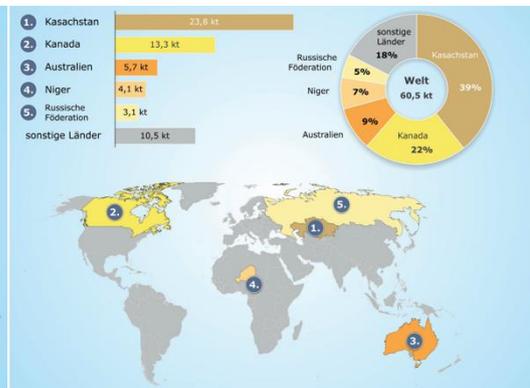


Abbildung 6 – Die größten Uranförderländer 2015 [8]

Gewinnung

Für tiefe, aber konzentrierte Uranvorkommen, wie die des inzwischen ausgebeuteten Erzgebirges, ist der Untertagebergbau unersetzlich. Oberflächennahe Vorkommen können entweder im Tagebau oder aber bei sandigem (grobporigem) Untergrund mittels In-Situ Leaching (ISL) abgebaut werden. Das Wirkungsprinzip dieser speziell für Uran angewendeten Technik besteht darin, Uranylverbindungen aus den Horizonten durch Einpumpen von oxidierenden Lösungen in den Boden direkt herauszulösen und über Brunnen die uranhaltigen Lösungen zu gewinnen. Je nach Art des Uranvorkommens versprechen die verschiedenen Abbaumethoden bessere Wirtschaftlichkeit [8;10]. Die Weiterverarbeitung der Uranerze erfolgt durch Umsetzung mit Schwefelsäure oder alkalischen Sodaauflösungen, wobei analog zum In-Situ Leaching gelöste, sechswertige Uranylverbindungen gebildet werden. Aus dieser Lösung kann durch Zugabe von Ammoniak der sogenannte Yellow Cake ausgefällt werden, welcher ein leuchtend gelbes Feststoffgemisch von Uranverbindungen, hauptsächlich aber Ammoniumdiuranat $((\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7)$ darstellt. Durch Auflösen und anschließendes Auskristallisieren des Yellow Cake in Salpetersäure werden Verunreinigungen entfernt und das Zwischenprodukt Uranylнитrat gebildet. Durch thermische Umsetzung wird anschließend Uran-VI-Oxid (UO_3 und U_3O_8) gebildet, welches mit Wasserstoff zu Urandioxid (UO_2) umgesetzt werden kann. Über das Zwischenprodukt Urantetrafluorid kann schließlich reines Uran durch die Reaktion mit Calcium oder Magnesium gewonnen werden [1].



Abbildung 7 - Yellowcake [9]



Anwendung von Uran in Kernkraftwerken

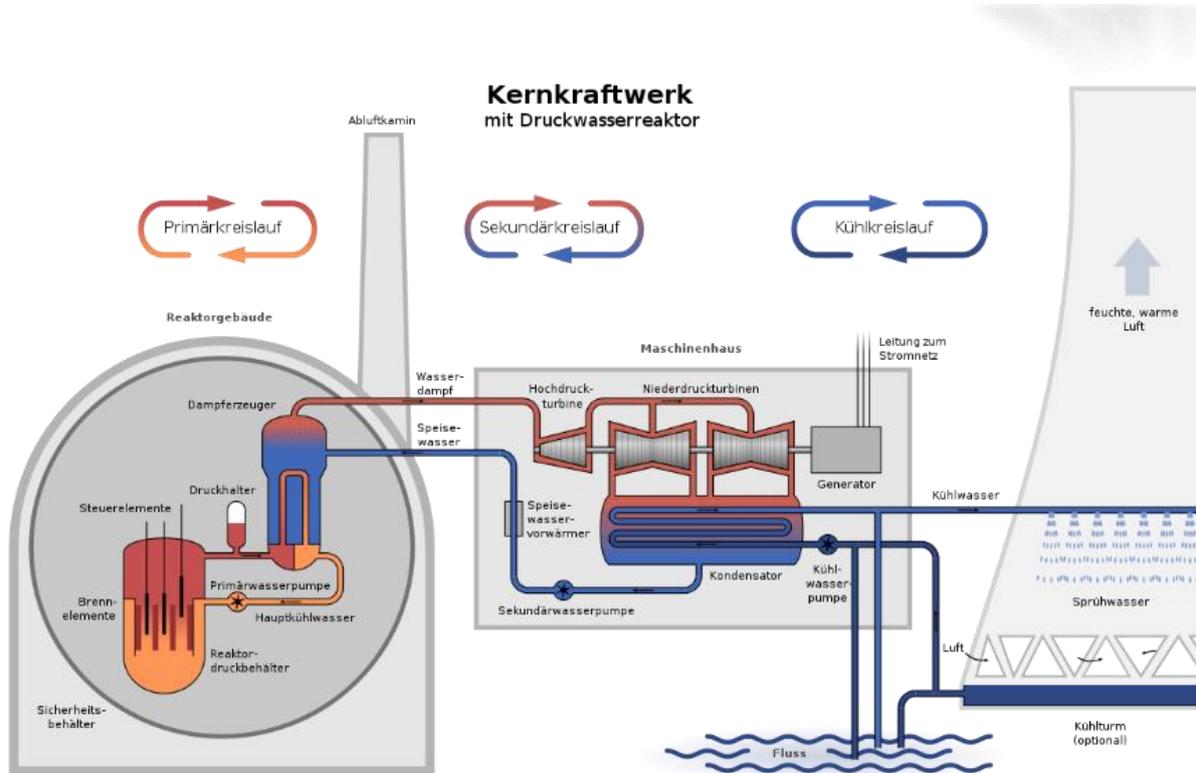
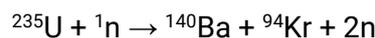


Abbildung 8 - Funktionsweise eines Kernkraftwerkes [12]

Im Kernkraftwerk findet ein Kernspaltungsprozess im Brennstab innerhalb eines Reaktors statt und bildet damit den Primärkreislauf. Dabei wird ein ^{235}U -Kern (dieser muss die kritische Masse als Mindestmaß besitzen) mit einem langsamen Neutron beschossen. Langsame Neutronen sind notwendig, um den Wirkungsquerschnitt der Reaktion zu erhöhen. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit einer erneuten Kernspaltung möglichst hoch ist. Bei schnellen Neutronen sinken dementsprechend die Reaktionswahrscheinlichkeiten und damit die Effektivität des Kernkraftwerkes. Das Neutron lagert sich an dem schweren Kern an, wodurch kurzzeitig der instabile ^{236}U -Kern entsteht. Dieser zerfällt und bildet in einer Kernspaltungsreaktion Spaltprodukte, wie ein Barium- und ein Kryptonisotop. Dabei entstehen zusätzlich zwei oder drei Neutronen. Dieser Vorgang kann mit folgender Gleichung beschrieben werden.



Die neu entstandenen Neutronen sind schnelle Neutronen und müssen daher erst abgebremst werden, um eine erneute Spaltreaktion in Gang zu setzen. Dafür wird im Reaktor ein Moderator

eingesetzt. Dieser nimmt die kinetische Energie der Neutronen auf und bremst diese ab und verringert somit die thermische Energie der Neutronen [11]. Es wird daher bei langsamen Neutronen auch von thermischen Neutronen gesprochen. Im Gegensatz dazu wird der Moderator erwärmt und führt zur gewünschten thermischen Energie. Der gesamte Primärkreislauf steht unter hohem Druck (Druckwasserreaktor), damit das Wasser nicht in den gasförmigen Zustand übergeht.

Die entstandene thermische Energie wird zur Wassererwärmung bzw. Wasserdampferzeugung im Dampferzeuger genutzt, wodurch der sekundäre Kreislauf des Kernkraftwerkes beschrieben wird. Mit dem entstandenen Wasserdampf wird eine Turbine angetrieben und liefert den gewünschten Strom.

Risiken und Kosten bei der Nutzung von Kernenergie

In politischen Debatten gibt es Befürworter und Gegner von Kernenergie. Befürworter sprechen bei Kernenergie von der effizientesten Methode elektrischen Strom herzustellen. Die Gewinnung von Uran ist jedoch, verglichen mit Kohle, sehr viel aufwendiger. Die Kosten für ein Kilogramm Uran liegen bei etwa 80 USD pro Kilogramm [8]. Im Vergleich dazu kostet die Förderung von Kohle 80 USD pro Tonne [8]. Aus einem Kilogramm Uran kann im Atomkraftwerk eine Energie von 36-56 MWh [8] erreicht werden. Mit einer Tonne Kohle hingegen werden lediglich 8,1 MWh erzielt [8]. Die Differenz der beiden Energieträger relativiert aufkommende Aussagen, dass Uran utopisch effizienter sei als Kohle. Lediglich eine 5-7fache Energiemenge kann Uran damit verzeichnen. Ein modernes Atomkraftwerk weist einen Wirkungsgrad von ca. 37 % auf [13]. Damit liegt dieser deutlich unter modernen Kohlekraftwerken, denn diese erreichen einen Wirkungsgrad von bis zu 45-47 % [14]. Grund dafür ist die hohe Wärmeentwicklung im Kernkraftwerk. Die Brennstäbe müssen permanent durch Kühlkreisläufe gekühlt werden, auch wenn das Atomkraftwerk gestoppt wurde. Spaltprodukte zerfallen weiter und erzeugen die hohen Temperaturen.

Zusätzlich stellt ein Atomkraftwerk ein sehr hohes Risiko für Mensch, Natur und Umwelt dar. Bei Unfällen, technischem oder menschlichem Versagen führt ein Atomkraftwerk zu einer Katastrophe. Die besten Beispiele dafür stellen die Super Gaus von Fukushima (2011) und Tschernobyl (1986) dar. Atomenergie birgt somit ein ständiges Risiko mit sich. Der Super Gau ist die größte Katastrophe, die ein Atomkraftwerk mit sich bringen kann. Der Grund dafür ist oft eine unkontrollierte Kettenreaktion (Ausfall Kühlung), wodurch sich der Reaktor permanent erwärmt. Als Folge davon kommt es zu einer Kernschmelze, wodurch die Reaktoren schmelzen und alle radioaktiven Materialien ungehindert austreten können. Jedoch gibt es auch andere Unfälle, welche mit Hilfe der INES-Skala beschrieben werden.

Die INES-Skala stellt eine Bewertungsskala dar, bei der Unfälle oder Störungen von nuklearen Ereignissen betrachtet werden. Dafür gibt es ein entsprechendes Komitee, welches die Unregelmäßigkeiten bewertet. Dabei stellen die Werte 1-3 Störungen dar. Ab der Stufe 4 wird von



Unfällen gesprochen. Dabei wird anhand von der auftretenden Strahlenexposition bewertet, ob bzw. wie viele Menschen dabei zu Schaden gekommen sind.

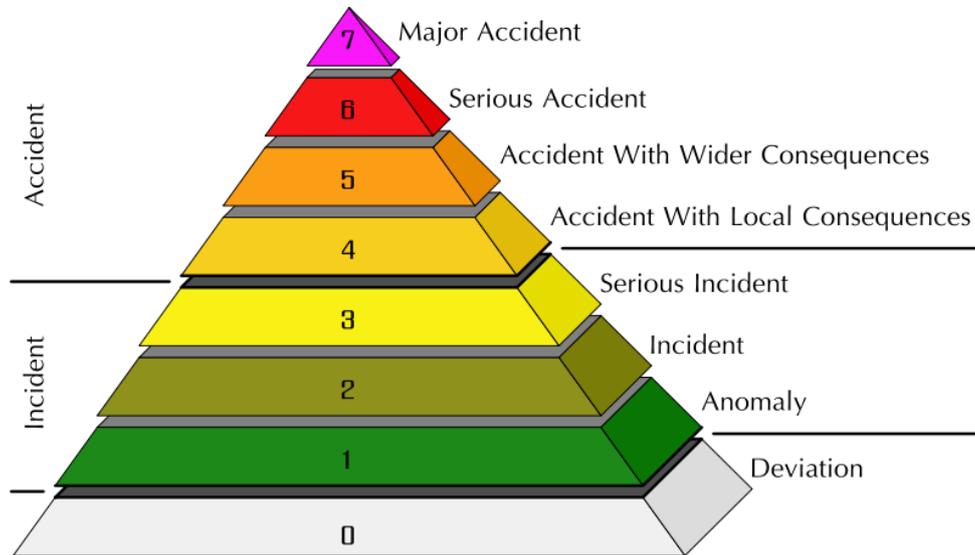


Abbildung 9 - INES-Skala [15]

In der folgenden Abbildung wird ein Verlauf von nuklearen Unfällen grafisch dargestellt.

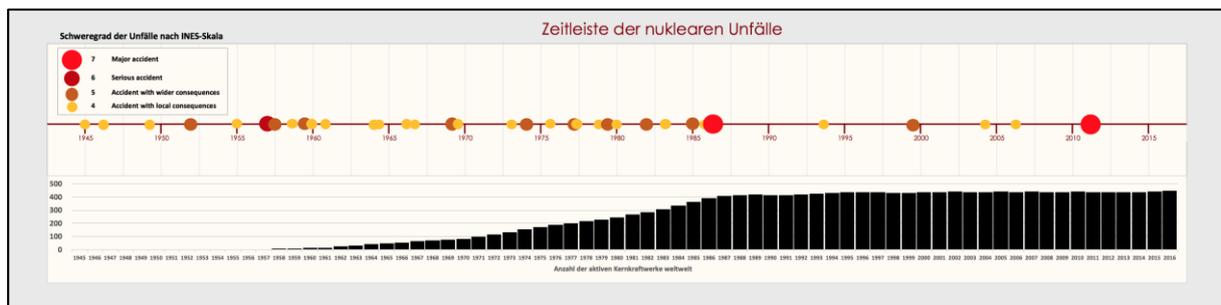


Abbildung 10 - Zeitleiste nuklearer Unfälle nach der INES-Skala[16]

Dabei ist zu erkennen, dass der Bau und die Inbetriebnahme von Atomkraftwerken seit Entdeckung der Kernspaltung kontinuierlich zugenommen haben. Diese Zunahme stagniert ab dem Jahre 1986. In diesem Jahr fand der Super Gau von Tschernobyl statt. Durch dieses Ereignis wurde die Menschheit mehr für die Risiken und Gefahren von Kernkraft sensibilisiert. Das aufkommende Risiko wurde sehr ernst genommen und entsprechende Sicherheitsstandards wurden verschärft. Als Ergebnis lässt sich in einem Zeitraum über mehrere Jahre kein Unfall mehr verzeichnen. Dies zeigt, dass sich mit entsprechenden Standards Kernkraft durchaus kontrollieren lässt. Der Super Gau in Fukushima negierte jedoch diesen Ansatz. Er macht deutlich, dass bei der Kernspaltung immer ein gewisses Risiko vorhanden ist, welche teilweise auf Natureinflüsse zurückzuführen ist und damit nicht vom Menschen beeinflussbar ist.



Fazit

Die Stromherstellung in einem Atomkraftwerk ist nicht nur auf den Prozess der Kernspaltung zu reduzieren. Der eigentliche Prozess innerhalb des Kraftwerkes ist CO_2 -frei. Jedoch birgt der Abbau von Uran weitaus mehr Umweltbelastungen mit sich und ist somit nicht CO_2 -frei [17]. Zusätzlich gilt es, den radioaktiven Müll zu entsorgen, welcher die Umwelt zusätzlich belastet und Kosten verursacht. Somit stellt die Kernenergie nur bedingt eine Alternative zu Kohle als Energieträger dar. Hinzu kommen die auftretenden Gefahren, welche von Kernkraftwerken ausgehen. Unfälle in Kernkraftwerken sind häufig in größerem Ausmaß und haben damit weitreichendere Folgen als in Kohlekraftwerken. Die auftretenden Probleme könnten durch alternative Energiequellen gelöst werden. Dieser Trend ist auch in Deutschland zu verzeichnen. Immer mehr Strom wird aus regenerativer Energie erzeugt und in das Stromnetz eingeleitet.



Literaturverzeichnis

- [1] Sicius, H.: „Radioaktive Elemente: Actinoide Eine Reise durch das Periodensystem“, 2015, Springer Verlag, S. 27ff
- [2] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HEUranium.jpg>, abgerufen am 13.01.2019, 20:03
- [3] <https://www.kkl.ch/kernenergie/strom-aus-uran/element-und-rohstoff-uran.html>, abgerufen am 14.01.2019
- [4] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/U_glass_with_black_light.jpg, abgerufen am 14.01.2019, 16:04
- [5] Cuney, Michel: „The extreme diversity of uranium deposits“, 2008, Springer Verlag
- [6] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Uraninite-39029.jpg>, abgerufen am 13.01.2019, 20:24
- [7] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9e/Torbernite-120981.jpg>, abgerufen am 13.01.2019, 20:29
- [8] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): „Energiestudie 2016 – Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen“, Hannover, 2016, S. 27ff
- [9] <https://www.flickr.com/photos/nrcgov/16016668166>, abgerufen am 13.01.2019, 23:12
- [10] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NRC_Uranium_In_Situ_Leach.png, abgerufen am 13.01.2019, 21:34
- [11] <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernspaltung-und-kernfusion/kettenreaktion>
- [12] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kernkraftwerk_mit_Druckwasserreaktor.svg, abgerufen 02.02.2019, 01:54
- [13] <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>, S.42
- [14] [Fossil befeuerte Großkraftwerke in Deutschland. VDI Statusreport 2013.](#)
- [15] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:INES_en.svg, abgerufen 02.02.2019, 02:34
- [16] Eigene Abbildung
- [17] Rausch, L. Treibhausgasemissionen und Vermeidungskosten der nuklearen, fossilen und erneuerbaren Strombereitstellung, 2007: Öko-Institut