

## Kernreaktoren und nukleare Endlager - eine Erfindung des Menschen?

von Andreas Kronenberg (email: [kronenberg@kernenergie-basiswissen.de](mailto:kronenberg@kernenergie-basiswissen.de))



### Hier die Fakten (vereinfachte Kurzfassung)

Am 4. Dezember 1942 – 4 Jahre nach der Entdeckung der Kernspaltung – setzten Enrico Fermi und seine Mitarbeiter in Chicago die erste, sich selbst erhaltende Kettenreaktion in Gang. Der erste Kernreaktor der Welt war in Betrieb gegangen. So haben wir es jedenfalls in der Schule gelernt, aber das war eindeutig falsch. Oder zumindest nicht ganz richtig, denn – wie so oft – war die Natur der modernen Physik wieder einmal weit voraus.

- Die Natur hat den Technikern bereits vor 2 Milliarden Jahren vorgemacht, dass Kettenreaktionen, wie sie in

heutigen Kernreaktoren ablaufen, auch in der Natur auftreten können.

- Erlöschen und Wiederanspringen des Kernreaktors wurden durch natürliche Prozesse gesteuert.
- Die Endprodukte (radioaktiver Abfall) dieses Kernspaltungsprozesses findet man heute in einer ganz eng begrenzten geologischen Lagerstätte. Dies zeigt – besser als jede Computersimulation – dass Endlager über lange Zeiträume (rd. zwei Milliarden Jahre) auch ohne zusätzliche technische Barrieren sicher sind, und die Schadstoffe nicht wandern.

### Hier die Fakten (fachspezifische Langfassung):

Am 4. Dezember 1942 – 4 Jahre nach der Entdeckung der Kernspaltung – setzten Enrico Fermi und seine Mitarbeiter in Chicago die erste, sich selbst erhaltende Kettenreaktion in Gang. Der erste Kernreaktor der Welt war in Betrieb gegangen. So haben wir es jedenfalls in der Schule gelernt, aber das war eindeutig falsch. Oder zumindest nicht ganz richtig, denn – wie so oft – war die Natur der modernen Physik wieder einmal weit voraus. **Vor fast zwei Milliarden Jahren, als noch keine Menschen unsere Erde bevölkerten, betrieb Mutter Natur mehrere hunderttausend Jahre lang natürliche Kernreaktoren.** Wir kennen davon mindestens 17. Die insgesamt erzeugte Wärme betrug rund 100

Milliarden Kilowattstunden (soviel, wie ein modernes Kernkraftwerk in knapp 4 Jahren erzeugt). Dabei wurden mehr als zehn Tonnen Uran gespalten, etwa 4 Tonnen Plutonium erzeugt und mehr als zehn Tonnen Spaltprodukte gebildet. **Ein großer Teil dieser radioaktiven Stoffe** ist grundsätzlich über geologische Zeiträume bis zu ihrem vollständigen Zerfall **sicher in ihrem natürlichen Endlager eingeschlossen** geblieben.

### Wie konnte man das nachweisen?

Am 7. Juli 1972 wurde in der französischen Isotopentrennanlage Pierrelatte bei der routinemäßigen Isotopenanalyse einer angelieferten Uranerzprobe aus der Mine Oklo im westafrikanischen Staat Gabun ein Gehalt von nur 0,7171 Atomprozent des Isotops U-

235 festgestellt, anstatt der üblichen 0,7202 Atomprozent. Eine Abweichung von nur 0,003 Atom-% (0,4%), aber bei der Messgenauigkeit der Massenspektrometer von  $\approx 0,0006$  Atomprozent eindeutig eine Abweichung.

Der erste Verdacht, eine Vermischung dieser Proben mit abgereichertem Uran aus der kerntechnischen Anwendung, konnte über die Gehalte an U-236 und U-234 ausgeschlossen werden:

U-236 war in der Probe nicht vorhanden. Da es in der Natur nicht vorkommt und erst in Reaktoren entsteht, konnte die Erzprobe nicht mit Uran einer kerntechnischen Anwendung vermischt worden sein.

Andererseits hätte der Gehalt an U-234 höher sein müssen, wenn Anteile des Materials aus eben einer solchen Anwendung gestammt hätten. U-234 wird während der Isotopentrennung mit der U-235-Fraktion angereichert. Da er aber niedrig war, stammt das Material tatsächlich aus einer Erzmine und wurde nicht mit anderem Material vermischt.

Der Techniker, der diese Analyse durchführte, war sehr genau und kontrollierte die Analysenbücher von früheren Chargen aus derselben Mine. Dabei wurden weitere Abweichungen bemerkt. Es zeigte sich, dass diese Isotopenanreicherung um so stärker war, je höher der Gesamturangehalt im Erz war. Da Verschiebungen der Isotopenanteile durch geochemische Effekte bei so schweren Elementen ausgeschlossen werden können, blieb nur die Erklärung der Kernspaltung übrig. Daraufhin wurden Analysen von Begleitelementen, wie z.B. Neodym, das bei der Kernspaltung in hohen Ausbeuten gebildet wird, vorgenommen. Hier zeigten sich Anomalien in den Isotopenzusammensetzungen gegenüber normalem Neodym, die auf Basis der Kernspaltungsausbeuten zu erklären sind. Eindeutige Beweise für Kernspaltungen ließen sich auch bei anderen Elementen von Zink (Ordnungszahl  $Z=30$ ) bis Dysprosium ( $Z=66$ ) zeigen.

### Wie hat der Naturreaktor funktioniert?

Für eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion müssen grundsätzlich vier Bedingungen erfüllt sein:

1. genügend Uran (Urangehalte von ca. 50 %)
2. ausreichende Anreicherung (einige Atomprozent U-235)
3. genügend Wasser (mindestens 6 %) zum Abbremsen der schnellen Spaltungsneutronen
4. hinreichend wenig Neutronengifte (z.B. Lithium, Bor und Seltene Erdmetalle).

Eigentlich gibt es noch eine fünfte Bedingung, nämlich das Vorhandensein von Neutronen. Diese ist aber in Uranlagerstätten stets erfüllt, da Uran zu einem kleinen Teil Spontanspaltungen erfährt und dabei immer Neutronen entstehen. Außerdem werden Neutronen laufend als Sekundärprodukte der Höhenstrahlung gebildet. Um diese fünfte Bedingung muss man sich also nicht weiter kümmern.

Bedingung 1 war in Oklo sehr gut erfüllt, da die Uranlagerstätte sehr reichhaltig ist und Urangehalte bis zu 80 % ausweist.

Für die Bedingung 2 ist entscheidend, dass alle Uranisotope instabil sind und deutlich unterschiedliche Halbwertszeiten haben.

Die Halbwertszeit des spaltbaren Isotops U-235, das heute zu etwa 0,707 % im Uran vorhanden ist, beträgt rund 700 Millionen Jahre, die des (heute) zu 99,3 % vorhandenen, nicht spaltbaren Isotops U-238 ist mit rund 4,5 Milliarden Jahren etwa 6 mal so lang. In erdgeschichtlichen Zeiten (die Erde ist etwa 5 Milliarden Jahre alt) ist ein Großteil des Isotops U-235 bereits zerfallen, während das Isotop U-238 nur relativ wenig abgenommen hat.

**Vor rund zwei Milliarden Jahren, als die Naturreaktoren in Oklo arbeiteten, betrug der U-235 Anteil etwa 3 %** (Bedingung 2 war also auch erfüllt).

Da die Uranlagerstätte Oklo aus sehr porösem Gestein besteht, konnte bei Regen viel Wasser in die Lagerstätte eindringen und so auch Bedingung 3 erfüllen.

Für die Bedingung 4 schließlich sind in Oklo ebenfalls günstige Randbedingungen vorhanden: Das Wirtsgestein und auch das Uranerz selbst enthalten nur sehr wenige neutronenabsorbierende Materialien.

In der Lagerstätte in Oklo ist an mindestens 17 Stellen genau das passiert, was bei Einhalten der Bedingungen passieren muss: **Eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion kam in Gang, die Natur hat selbst Reaktoren betrieben!** Die Leistung der Reaktoren war wahrscheinlich relativ gering, aber doch ausreichend, um die Anordnungen so heiß werden zu lassen, dass das Wasser verdampfte und die Reaktoren sich damit immer wieder selbst abschalteten (Entfall der dritten Bedingung). Beim nächsten Regen drang Wasser wieder ein und die Reaktion begann von neuem.

Dieser zyklische Reaktorbetrieb hat mehrere hunderttausend Jahre angehalten. Beendet wurde er wahrscheinlich, als der vorhandene Spaltstoff so weit aufgebraucht war bzw. neutronenabsorbierende Spaltprodukte in einer solchen Menge gebildet worden waren, dass die o. g. Bedingungen nicht mehr ausreichend erfüllt waren. Die radioaktiven Produkte zerfielen zu stabilen Isotopen, ein normaler Vorgang.

Es wurde errechnet, dass insgesamt etwa 100 Milliarden Kilowattstunden Wärme erzeugt worden sind. Dabei wurden über 10 Tonnen Uran-235 gespalten und in praktisch die gleiche Menge (größtenteils radioaktive) Spaltprodukte umgewandelt. Außerdem sind etwa 4 Tonnen Plutonium durch Neutroneneinfang aus dem U-238 gebildet worden. Zum Teil wurde dieses Plutonium in den Reaktoren gleich wieder gespalten (wobei es unter Energiefreisetzung ebenfalls in Spaltprodukte umgewandelt wurde), zum Teil blieb es nach Auslaufen der Kettenreaktion als Plutonium zurück.

### **Oklo ist auch ein natürliches Endlager für radioaktive Spaltprodukte und für Plutonium.**

Die Spaltprodukte und das Plutonium lassen sich heute nur indirekt nachweisen, da sie sich in den langen Zeiträumen über den radioaktiven Zerfall längst in stabile Isotope umgewandelt haben. Aber

diese lassen sich Dank der modernen [Massenspektrometrie](#) sehr genau nachweisen. **Hier ist sozusagen der Blick in ein Endlager nach vielen Millionen Jahren möglich**, besser als es jede Computersimulation nachzustellen erlaubt. Aus der ortsabhängigen Verschiebung von Isotopenverhältnissen kann man die **Ausbreitung** (Migration) der Spaltprodukte sehr gut rekonstruieren. Und diese war erstaunlich gering, nämlich im Allgemeinen **nur wenige Meter!** Obwohl keinerlei technische Barrieren gegen das Ausbreiten radioaktiver Stoffe vorhanden waren und natürlich auch keine optimierten geologischen Bedingungen zum Verhindern der Ausbreitung herrschten, sind die meisten Spaltprodukte und auch das Plutonium praktisch an der ursprünglichen Stelle verblieben. Dies ist ein eindrucksvoller Nachweis, wie gut natürliche Prozesse wie Absorption und Desorption nur eine minimale Ausbreitung radioaktiver Stoffe zulassen und wie zuverlässig die Rückhaltung in einem Endlager gewährleistet werden kann.

Dieser Nachweis erhält insofern noch ein zusätzliches Gewicht, als in diesem natürlichen prähistorischen Endlager die Wärmeleistung (durch die anhaltende Kettenreaktion) von etwa 50 Watt pro m<sup>3</sup> um ein Vielfaches höher war als in den heute geplanten Endlagern für hochaktive Abfälle.

Weitere Informationen unter: <http://www.curtin.edu.au/curtin/centre/waisrc/OKLO/Where/Where.html> sowie <http://www.energyindustry.about.com/industry/energyindustry/msub25.htm>

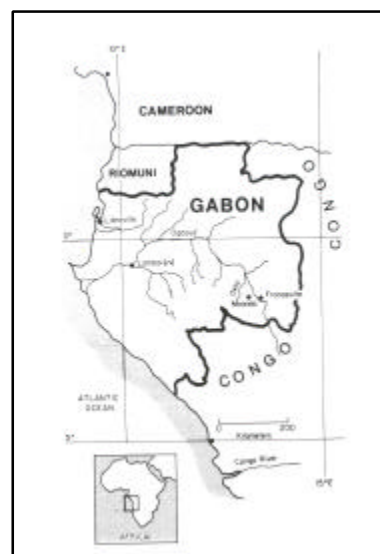


Abb. 1 Geographische Lage von Oklo