

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 69 (1977)
Heft: 1-2

Artikel: Natürliche Kernreaktoren in Westafrika
Autor: [s.n.]
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941475>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Baden

Als Enrico Fermi und seinen Mitarbeitern 1942 in Chicago die erste kontrollierte Kettenreaktion gelang, war jedermann davon überzeugt, dass sich dieser Vorgang erstmalig auf unserem Planeten abspielte. Doch bereits 1956 wies Prof. Kuroda in den USA darauf hin, dass solche Vorgänge in der Natur schon früher in Pechblende-Erzen möglich gewesen seien. Entsprechende Gesteinsuntersuchungen in Pechblende-Vorkommen in Kanada und der Tschechoslowakei vermochten diese Theorie jedoch vorerst nicht zu bestätigen. Erst 1972 gelang den Wissenschaftlern der Nachweis, dass bereits vor dem Auftreten des «Homo sapiens» Reaktoren in Betrieb standen, die darüberhinaus in ihrer Funktionsweise den heute weitverbreiteten Leichtwasserreaktoren verblüffend ähnlich waren. Ihre Erbauer waren nicht etwa irgendwelche ausserirdische Wesen, sondern Mutter Natur selbst.

In Oklo, im westafrikanischen Gabun, wird seit einigen Jahren Uran von einer französischen Bergbaugesellschaft abgebaut. Das abgetragene Material wurde regelmässig untersucht. Dabei stellte der Franzose H. Bouzigues, der als Analysentechniker in der Urananreicherungsanlage Pierrelatte in Frankreich tätig ist, fest, dass das in Oklo geschürfte Uran teilweise eine weit geringere Konzentration an Uran-235 aufweist, als dies normalerweise in der Natur der Fall ist. Das natürliche Element Uran setzt sich aus dem Isotop Uran-238 (mit einer Häufigkeit von 99,274 %), Uran-235 (mit einer Häufigkeit von 0,72 %) und in sehr kleinen Mengen Uran-234 (mit einer Häufigkeit von 0,006 %) zusammen. Diese Zusammensetzung ist in unserem ganzen Sonnensystem konstant. In Oklo aber ergaben die umfangreichen und sehr genauen Analysen diesbezüglich teilweise enorme Abweichungen. Je höher der Gehalt an Uran in den Erzproben war, desto geringer war der prozentuale

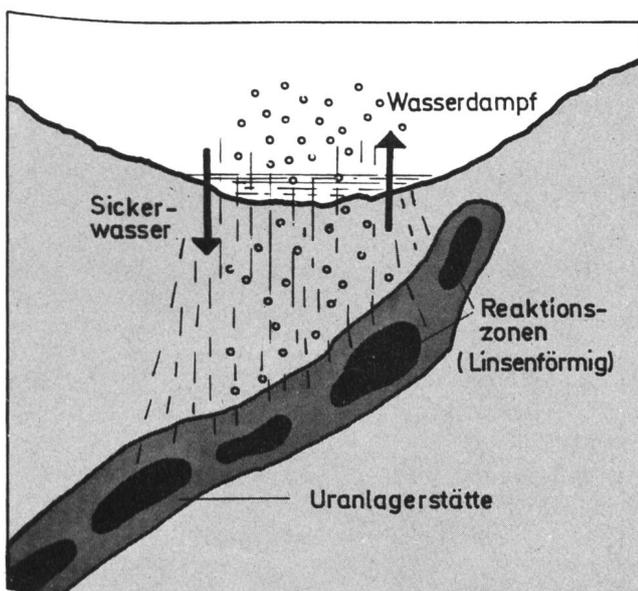
Anteil an Uran-235. Solche Verhältnisse findet man normalerweise nur in den gebrauchten, abgebrannten Brennelementen der heutigen Kernreaktoren. Sicherheitshalber wurden daher sämtliche Proben bis zu ihrem Ursprung zurückverfolgt. Eine Vermischung der Proben mit verbrauchtem oder abgereichertem Uran aus einer Anreicherungsanlage konnte ausgeschlossen werden. Diese Tatsache war schon ein klarer Hinweis, dass in Oklo wirklich natürliche Kettenreaktionen stattgefunden haben.

Das Projekt «Franceville»

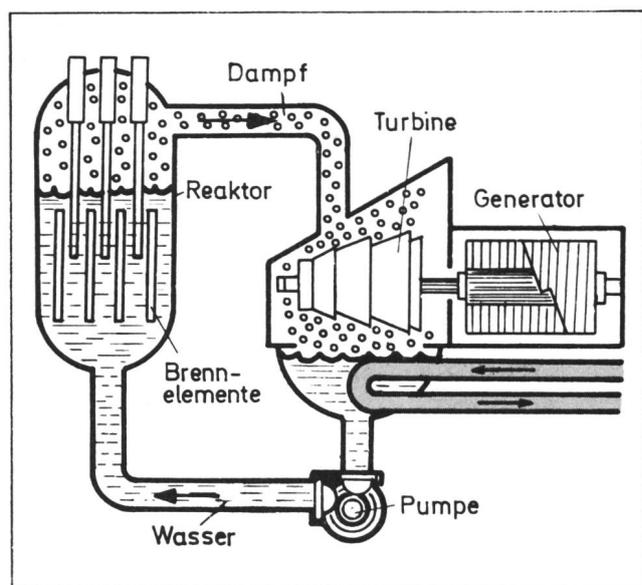
Diese Funde in der ehemaligen französischen Kolonie Gabun veranlassten die Atomenergiebehörde Frankreichs zu einer eingehenden Untersuchung der ganzen Angelegenheit. Wissenschaftler verschiedener Fachrichtungen starteten das Projekt «Franceville». Aus der Uranmine wurde eine «Archäologen-Grube». Das fossilienfreie Sedimentgestein und die stark uranhaltigen Zonen wurden genauestens untersucht. Dabei stellte sich bald heraus, dass offensichtlich mehrere «Reaktoren» in der gleichen Region in verschiedenen Zonen in Betrieb gestanden haben.

Umfassende Beweisführung

Der Beweis, dass in Oklo natürliche Kettenreaktionen stattgefunden haben, erfolgte durch den Nachweis verschiedener Spaltprodukte am Ort der vermuteten Reaktionszonen. Die Zusammensetzung dieser Elemente ist gegenüber den normalen Vorkommen in der Natur völlig verschieden. Bei Kernspaltungen entstehen rund 200 verschiedene Isotope. Viele davon sind nur kurzlebig und fallen daher für die Beweisführung nicht in Betracht. Andere hingegen sind sehr langlebig und spielten für den endgültigen Nachweis



Schnitt durch die Oklo-Reaktoren vor dem Uran-Abbau.



Siedewasserreaktor

Die Oklo-Reaktoren lassen sich am besten mit dem Siedewasserreaktor vergleichen. Im heutigen Reaktor wird das im geschlossenen Kreislauf mittels einer Pumpe zugeführte Wasser in den Reaktor gepumpt. Dort wird es durch die bei der Kernspaltung entstehende Wärme erhitzt, verdampft und gibt diese Energie an die Turbine ab. In den Oklo-Reaktoren versickerte natürlich vorhandenes Wasser (Pumpe) in die Reaktionszonen (Reaktor), erhitze sich, verdampfte und stieg als Nebelschwade hoch.

der Natur-Reaktoren eine wichtige Rolle. Die wichtigsten Isotope sind diejenigen des Elementes Neodym. Aber auch die Isotopenzusammensetzungen einiger weiterer Elemente wie Yttrium, Zirkonium, Niob, Ruthenium, Rhodium, Palladium, Silber, Tellur und Barium deuteten unmissverständlich auf kontrollierte Kettenreaktionen hin. Durch die quantitative Bestimmung der Spaltprodukte wurde es auch möglich, das Alter der Reaktoren sowie ihre «Lebenszeiten» zu bestimmen. Das bei einer Kettenreaktion anfallende Uran Isotop 236 fehlt in Oklo. Das Fehlen dieses Isotops und einer Halbwertszeit von rund 24 Millionen Jahren (in dieser Zeit zerfällt die Hälfte in eine andere Substanz) sowie die Gesteinsuntersuchungen deuten darauf hin, dass die «Oklo-Reaktoren» vor etwa 1,8 Milliarden Jahren in «Betrieb» gingen. Menschen gab es damals noch keine, lediglich primitive Einzeller bewohnten unsere Weltmeere.

Aus der Isotopenzusammensetzung des Neodyms lässt sich auch berechnen, wieviel Spaltstoff (Uran-235) verbraucht wurde. Dabei muss berücksichtigt werden, dass Uran 235 nicht nur verbraucht, sondern bei einer Kettenreaktion auch neu gebildet wird. Dies geschieht durch Neutroneneinfang des Uran-238, das dadurch zu Uran-239 wird und dann nach und nach über Neptunium-239 und Plutonium-239 zurück in Uran-235 zerfällt. Die für die Kernspaltung nötigen Neutronen verhalten sich in den modernen Reaktoren etwas anders als damals in den Naturreaktoren bei Oklo. Durch die grössere Zahl und Energie vermögen die Neutronen in den heutigen Reaktoren mehr Plutonium zu spalten, als dies in Oklo der Fall war. Die Naturreaktoren waren also, was die Menge betrifft, prozentual gesehen die besseren Plutonium-Erzeuger als ein moderner Leistungsreaktor. Zusammenfassend geht aus den entstandenen Neodym-Isotopen und der bekannten Produktion von Uran-235 hervor, dass die Oklo-Reaktoren ungefähr 1 Million Jahre in Betrieb gestanden haben und dabei etwa die gleiche Wärmeenergie abgegeben haben wie die Kernkraftwerke Beznau I und II in ca. 6 Jahren.

Automatische Steuerung

Damit überhaupt eine Kernkettenreaktion über einen längeren Zeitraum erfolgen kann, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt werden. So müssen genügend spaltbare Kerne zu einer bestimmten Masse zusammengeschlossen sein (kritische Masse). Die Uran-Konzentration betrug in den Spaltzonen zwischen 20 und 60 %. In normalen Uranminen liegt die Uran-Konzentration lediglich bei 0,1 bis 0,2 %. Wie es in Oklo zu dieser hohen Uran-Konzentration kam, konnte bis anhin noch nicht genau geklärt werden.

Die einzelnen Reaktionszonen (natürliche Reaktoren) bestanden aus linsenförmigen Anordnungen von 10 bis 20 m Länge und 1 m Dicke. Die eigentlichen Spaltzonen im Zentrum der Linsen waren jedoch lediglich 10 bis 30 cm dick.

Allein diese Anordnungen mit der hohen Uran-Konzentration genügen noch nicht, um eine Kettenreaktion aufrechterhalten. Hierzu müssen noch weitere Voraussetzungen erfüllt werden. Der Isotopenanteil des Uran-235 muss wie bei heutigen Leichtwasserreaktoren — wo er künstlich erhöht wird — bei 2 bis 4 % liegen. Dies war jedoch vor 1,8 Milliarden Jahren aus den nachstehenden Gründen aber auch tatsächlich der Fall. Bei der Entstehung unserer Erde vor ca. 4,6 Milliarden Jahren betrug der Anteil des Uran-235 an der Gesamtmenge des Elementes Uran rund 25 %. Wegen der kürzeren Halbwertszeit als der des Uran-238 ging der Anteil an Uran-235 ständig zurück. Heute liegt er — wie eingangs erwähnt — noch bei 0,72 %. Vor

1,8 Milliarden Jahren jedoch lag er bei ziemlich genau 3 %, so dass die Bedingungen für eine kritische Anordnung gegeben waren.

Damit eine Kettenreaktion entstehen kann, darf sich in der Reaktionszone auch nicht zu viel neutronenabsorbierendes Material (Neutronengift) befinden. In den modernen Leichtwasserreaktoren wird die Reaktorleistung u.a. auch mit solchen Neutronengiften (Bor, Cadmium) geregelt. In Oklo sind nur sehr geringe Mengen von neutronenabsorbierenden Materialien zu finden.

Ein funktionstüchtiger Reaktor muss weiter einen sogenannten Moderator besitzen. Bei der Kernspaltung werden aus dem Brennstoff Neutronen mit hoher Energie emittiert. Damit diese Neutronen weitere Spaltungen machen können, muss ihre Energie kleiner werden, d.h. sie müssen Energie verlieren, also abgebremst oder, wissenschaftlich gesagt, moderiert werden. Dieser Vorgang wird erzwungen, indem man den energiereichen Neutronen ein Bremsmaterial (Moderator) anbietet. Ein guter und überall vorhandener Moderator ist normales Wasser. In Oklo gab es wasserhaltige Siliziumaluminat. Auch war das Gelände teilweise unter Wasser, so dass die wichtigsten Voraussetzungen für den Ablauf von Kettenreaktionen gegeben waren.

Die Regelung der Oklo-Reaktoren erfolgte wie folgt:

Sobald sich die Leistung des Reaktors etwas erhöhte, verdampfte durch die gleichzeitige Temperaturerhöhung mehr Wasser. Weniger Wasser aber bedeutete eine schlechtere Moderation der Neutronen, so dass auch sofort weniger Spaltungen erfolgen konnten. Die Reaktorleistung wurde damit automatisch wieder kleiner. Diese Selbstregulierung (Voideffekt) hilft auch heute noch mit, bestimmte Reaktortypen — insbesondere den Siedewasserreaktor — vor Ueberhitzung zu schützen. Nachdem die Kettenreaktionen in Oklo an den Stellen, wo die Kritikalitätsbedingungen erfüllt waren, angefangen hatte, bildeten sich durch die Kernspaltungen auch neue Substanzen, die teilweise durch ihre neutronenabsorbierenden Wirkungen ebenfalls mithelfen, die Leistung zu regulieren. So pendelte sich die Leistung selbst ein und funktionierte rund 1 Million Jahre lang, bis vermutlich die Wasserzufuhr versiegte.

Oklo-Reaktoren — Wegweiser für die Endlagerung radioaktiver Abfälle?

Während des Betriebes der Naturreaktoren wurden gesamthaft rund 1000 kg Plutonium sowie ca. 10 000 kg Spaltprodukte produziert. Heute findet man kein Plutonium mehr, da es sich im Laufe der Zeit durch Zerfälle in andere Substanzen — insbesondere Uran-235 — umgewandelt hat. Durch Ionen-Mikroanalysen konnte nachgewiesen werden, dass das aus Plutonium stammende Uran-235 an den gleichen Stellen gefunden wurde wie das Uran-238. Das Plutonium blieb also am selben Ort, wo es auch entstand.

In geologisch stabilen Formationen mit geringen unterirdischen Wasserbewegungen ist Plutonium sehr unbeweglich und könnte sogar über geologische Zeiten selbst in «normalen» Erden wie Ton oder Sandstein gelagert werden, wie Oklo gezeigt hat.

Die heutigen Konzepte, radioaktive Abfälle in geologisch stabilen Salz- oder Anhydrit-Formationen zu lagern, sind deshalb noch sicherer und zuverlässiger, da in diesem Fall auch die unterirdischen Wasserbewegungen auszuschliessen sind. Auch die meisten anderen radioaktiven Abfälle (Spaltprodukte) blieben an ihrem Entstehungsort, so dass sie in ihrer gesamten Ausbeute in den Spaltzonen von Oklo festgestellt werden konnten und zur Abklärung des Oklo-

Phänomens dienen. Allerdings sind einige radioaktive Spaltprodukte wie Edelgase, Jod, Alkali- und Erdalkalimetallisotope von den eigentlichen Spaltzonen wegdiffundiert und haben sich mit den natürlichen Isotopen vermischt. Dies ist aus ihrem chemischen Verhalten auch zu erwarten. Mit anderen Worten, diese Spaltprodukte wären nicht geeignet, direkt in der Erde gelagert zu werden. Das ist nach der heutigen Praxis auch nicht der Fall. Vorgesehen ist, diese hochaktiven Spaltprodukte in verglaste oder keramische Form (also chemisch inert) in geologisch stabilen Formationen zu lagern.

Die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständigen Stellen haben berechnet, dass selbst schwerste Beschä-

digungen (z. B. Wassereinträge), auch langfristig gesehen, keine Gefährdung für die Umwelt ergeben. Die in Oklo gewonnenen Erkenntnisse vermögen diese so oft bezweifelten Argumente noch zu untermauern. Es bleibt zu hoffen, dass diese Tatsachen auch bei den Gegnern der Kernenergie als solche anerkannt werden.

Für weitere Information sei auf folgende Literatur hingewiesen:

- [1] G. A. Cowan: A Natural Fission Reactor. «Scientific American» 235, 36 (July 1976).
- [2] C. Keller: Die Natur baute einen Reaktor. «Bild der Wissenschaft» 12 (12), 70 (1975).
- [3] «Neue Zürcher Zeitung» (Forschung + Technik), Nr. 98, 77, (April 1976). Die fossilen Kernreaktoren von Oklo, vorgetragen am IAEA-Symposium «Oklo-Phänomen» vom Juni 1975 in Wien.

Zur energiewirtschaftlichen Bedeutung der frühzeitigen Neuregelung von ablaufenden Wasserrechtsverleihungen

Walter Pfeiffer

DK 347.247:333.9

1. Die verschiedenen Interessenlagen

Die hydraulischen Kraftwerke nützen eine von Natur aus sich stets erneuernde Energiequelle. Der Wasserkreislauf der Erde wird von der Sonne durch ihre Wärmeeinstrahlung in Gang gehalten. In der Wasserkraft tritt ein Teil der Sonnenenergie in stark gebündelter Form in Erscheinung und bietet sich mithin dem Menschen in einem wirtschaftlich relevanten Umfang zum Gebrauch an. Die Wasserkraftnutzung ist, am menschlichen Zeitbegriff gemessen, ein immerwährender Prozess. Der Ablauf eines Nutzungsrechts bedeutet, vom natürlichen Funktionieren einer Wasserkraftanlage aus betrachtet, einen willkürlichen Eingriff, dessen Begründung ausschliesslich im juristisch/ökonomischen Bereich liegt. Zur Erfassung der diesem Eingriff innewohnenden Problematik muss man sich über die einzelnen Interessenpositionen Rechenschaft geben.

Das schweizerische Wasserrecht bringt den föderalistischen Aufbau unseres Bundesstaates deutlich zum Ausdruck, indem im neuen Wasserrechtsartikel der Bundesverfassung (BV) die kantonale Gewässerhoheit einmal mehr verankert wurde. Nach Art. 24bis, Ziff. 3, BV, steht die Verfügungsgewalt und das Recht zur Nutzung der Wasservorkommen grundsätzlich den Kantonen bzw. den nach der kantonalen Gesetzgebung Berechtigten zu. Der Bau von Wasserkraftanlagen ist ein derart kapitalintensives Unterfangen, dass die Inhaber der Wasserhoheit in der Regel nicht in der Lage sind, Wasserkräfte grösseren Ausmasses selbst zu nutzen. Dazu kommt der erschwerende Umstand, dass sich grössere hydraulische Anlagen nur im Verbund mit anderen Kraftwerken und Versorgungsgebieten wirtschaftlich optimal betreiben lassen. Die direkte Nutzung durch den Inhaber der Wasserhoheit selbst ist deshalb nur in Ausnahmefällen möglich. Wo dies zutrifft, entfällt das ganze Problem der Konzessionierung und mithin der zeitlichen Befristung der Nutzungsrechte.

Im Normalfall verleiht der Hoheitsträger das Nutzungsrecht einer öffentlich- oder privatrechtlichen Körperschaft¹⁾ für

¹⁾ Öffentlichrechtliche Körperschaft: z. B. öffentliche Anstalt mit eigener Rechtspersönlichkeit; Gebietskörperschaft als Rechtsträger von unselbständigen öffentlichen Anstalten wie etwa kommunalen Elektrizitätswerken.

Privatrechtliche Körperschaft: z. B. Aktiengesellschaft, Genossenschaft usw., wobei die Anteile ganz oder teilweise im Eigentum der öffentlichen Hand sein können. Dagegen bildet das ausschliessliche Privateigentum an Wasserkraftwerken die grosse Ausnahme.

eine bestimmte Dauer in der Form einer Konzession. Daran erwachsen gewisse divergierende Interessen zwischen Konzedent und Konzessionär — man denke etwa an das Verhältnis zwischen dem wasserkraftreichen Alpengebiet und dem energiehungrigen Mittelland —, die in den Konzessionsbedingungen ihren Ausgleich finden müssen. Soweit der Verleiher anteilmässig an dem als Konzessionär tätigen Kraftwerkunternehmen beteiligt ist, greift gewissermassen eine institutionelle Einschränkung dieser Interessenkonkurrenz Platz. Das trifft aber angesichts des vielfältigen Aufbaus der schweizerischen Elektrizitätswirtschaft nur in Ausnahmefällen zu.

1.1 Das Landesinteresse

Neben dem Holz als Brennstoff ist die weisse Kohle der einzige heimische Energierohstoff von Bedeutung. Dazu kommen die entscheidenden ökologischen Vorteile, indem diese Art der Endenergiegewinnung lediglich im Einfangen der im fallenden Wasser sich in mechanische Arbeit umsetzenden Sonnenenergie mit anschliessender Umwandlung in die polyvalenteste aller Energieformen, nämlich in Elektrizität, besteht, womit weder eine künstliche Energiefreisetzung noch irgendwelche Schadstoffemissionen verbunden sind. Das Landesinteresse erheischt daher die so weitgehende Steigerung der Wasserkraftnutzung, als dies volkswirtschaftlich vertretbar ist und als dadurch die übrigen Interessen am Wasser wie Wasserversorgung, Fischerei, Gewässer- und Landschaftsschutz und dergleichen nicht ungebührlich beeinträchtigt werden.

1.2 Die Interessen des Konzedenten

Für den Inhaber der Wasserhoheit ist die Wasserkraft ein Rohstoff, für dessen Verwertung er ein möglichst hohes Entgelt erhalten will. Die äusserste Grenze seiner Forderungen verläuft im Prinzip durch jenen kritischen Bereich, der ohne Gefährdung der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit der fraglichen Wasserkraft gegenüber alternativen Möglichkeiten der Stromerzeugung nicht überschritten werden kann. Da der Konzedent aus naheliegenden Gründen an der möglichst kontinuierlichen und umfassenden Nutzbarmachung seiner Wasserkräfte interessiert ist, wird er im konkreten Fall bereit sein, von seinen theoretisch denkbaren Maximalforderungen zugunsten einer baldigen Realisierung bzw. der ununterbrochen weitergehenden Nutzung Abstriche zu machen.