

Thoriumlagerstätten - weltweit und in Deutschland

Angesichts des im Atomgesetz der Bundesrepublik Deutschland seit 2011 verankerten Atomausstiegs und der angestrebten, überwiegend wind- und solarbasierten Stromerzeugung der Zukunft, mag es anno 2016 abenteuerlich erscheinen, sich überhaupt mit der Möglichkeit einer teilweisen oder gänzlichen Stromversorgung Deutschlands aus heimischem Thorium bzw. dem daraus erbrüteten Uran 233 zu beschäftigen.

Interessant und sogar reizvoll ist es dennoch. Immerhin tritt der Brutstoff Thorium im weltweiten Maßstab durchschnittlich 3,5 mal häufiger als Uran (U235 + U238) in den Gesteinen der Erdrinde auf. Im Mittel enthält eine Tonne Erdrindenmasse 10 - 11,2g Thorium.

Zahlreiche Projekte zur Nutzung des Thoriums als Brutstoff für die Gewinnung von Uran 233, welches in der irdischen Natur nicht vorkommt, sind in den vergangenen Jahren auf den Weg gebracht worden.

Stellvertretend seien an dieser Stelle genannt:

- Steenkampskaal Ltd, Südafrika <http://www.thorium100.com/> , ausgearbeitetes Konzept eines 100MW_(el) Kugelhaufenreaktors. Das Unternehmen betreibt eine Mine zur Gewinnung von Metallen der Seltenen Erden und sitzt damit auch auf einem großen Vorrat an Thorium.
- ThorCon Power, USA <http://thorconpower.com/> , fertiges Konzept eines 250MW_(el) Flüssigsalzreaktors. Im Dezember 2015 überraschte das Unternehmen mit der Nachricht, dass es zur Unterzeichnung eines „letters of intent“ mit drei indonesischen Staatsunternehmen gekommen ist. Linzensierung, Bau und Betrieb der Reaktoren werden in Indonesien stattfinden. Das Land will bis 2025 seinen Strombedarf zu 20% mit Hilfe der Flüssigsalzreaktoren decken und dabei seine enormen Reserven an Thorium als Abfallprodukt seiner Zinngewinnung nutzen.
- Thor Energy, Norwegen <http://thorenergy.no/>. Dieses Konsortium aus norwegischen und internationalen Partnern testet seit 2012 voraussichtlich bis 2019 in einem Forschungsreaktor in Halden (Norwegen) verschiedene Thorium-Uran und Thorium-Plutonium Mischungen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit und Vorteile gegenüber herkömmlichen angereichertem Uran. Ziel ist die Erhöhung der Effizienz von schon in Betrieb befindlichen Leichtwasserreaktoren, die

Erhöhung der Sicherheit gegenüber einer Kernschmelze (ThO_2 in entsprechender Beimischung hebt die Schmelztemperatur erheblich an) und die energetische Verwertung vorhandenen Plutoniums zur Reduktion von Proliferationsrisiken und auch zur Minderung der Anforderungen an die Langzeitsicherheit geologischer Endläger.

Es folgt an dieser Stelle eine zusammenfassende Darstellung der sehr grundlegenden und mit großem Aufwand betriebenen Nuklearaktivitäten in China und Indien - auch unter Nutzung des Thoriums.

Quelle des Textes ist das Papier „Next Steps für Nuclear Innovation in the UK“ (Anhang, Seite 14) erschienen auf der Webseite der Alvin Weinberg Foundation in Großbritannien (<http://www.the-weinberg-foundation.org/2016/04/27/report-launch-next-steps-for-nuclear-in-the-uk/>),

- *China*

The China National Nuclear Corporation's is developing a multi-purpose small modular reactor, the ACP100(+) .

The Chinese have made some progress with fast reactors. A small fast neutron reactor – the Chinese Experimental Fast Reactor – achieved criticality in July 2010, and was grid-connected a year later. Based on this success, China plans to begin construction of a large fast reactor in 2017.

In 2011 China launched a Thorium Molten Salt Reactor programme. It is building a 2MW molten salt reactor, due to be operational by 2017, and a 10MW one, due to be operational by 2020. The plan is to build a 100MW MSR by 2030.

- *India*

India turned on its first advanced reactor - a Fast Breeder Test Reactor - in 1985. A 500MW Prototype Fast Breeder Reactor is due to become fully operational later in 2016 – though this timetable is far from certain.

The Indian government is also supporting research into Advanced Heavy Water Reactor, Indian Molten Salt Breeder Reactor and Indian High Temperature Reactor, all utilising thorium based fuels. (India has extensive thorium reserves.)

Thorium – globale Reserven und Ressourcen

Abb.1 zeigt die Weltthoriumreserven nach Einschätzung des US Geological Survey (1999). Indien verfügt danach allein schon über fast ein Viertel und es ist daher nicht verwunderlich, dass der Brutstoff Thorium eine zunehmend wichtige Rolle in der nuklearen Entwicklung des Landes einnimmt.

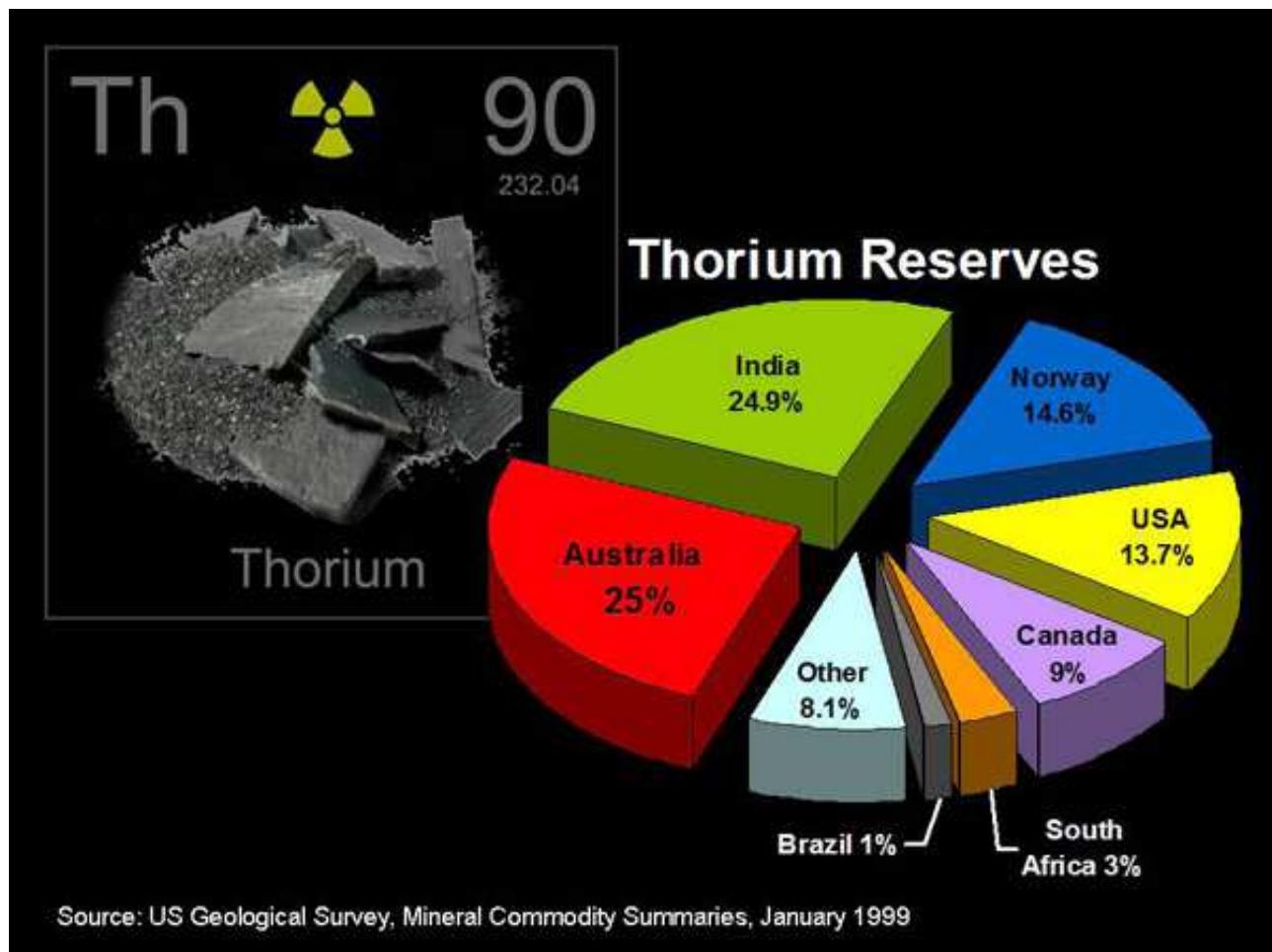


Abb.1: prozentuale Thorium Reserveanteile einiger Länder

Als Reserven werden grundsätzlich die hinsichtlich ihrer Menge und (heutigen) technischen und ökonomischen Gewinnbarkeit eingeschätzten Massen angegeben.

Schon hinter dieser Verteilung verbirgt sich ein geologischer Hinweis. Es erscheinen zumeist territorial große und sehr große Länder, welche über einen erheblichen Anteil an proterozoischem Grundgebirge verfügen. Dort treten größere Gebiete mit massiven granitoiden Intrusionen und daraus im Zuge der metamorphen Überprägung entstandenen Orthogneisen auf: Die sogenannten Kratone oder „Urkontinente“. Brasilianischer-, kanadischer-, südafrikanischer-, australischer-, indischer- Schild sind in diesem

Zusammenhang zu nennen. Es sind sehr alte konsolidierte Kontinente (<ca. 600 Mio Jahre). Abtragungsmassen, z.B. in Form von „Strandseifen“, welche schwere Minerale konzentriert enthalten, treten hinzu.

Die Abb. 2 der OECD Nuclear Energy Agency (2014) zeigt die indirekt unter Zuhilfenahme von Erkenntnissen aus dem Abbau Seltener Erden und Uran geschätzten globalen Ressourcen, welche z.T. deutlich unsicherer sind und zudem noch zu einem erheblichen Maß unter dem Vorbehalt stehen, erst bei zukünftigen veränderten technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen zu „Reserven“ zu werden.

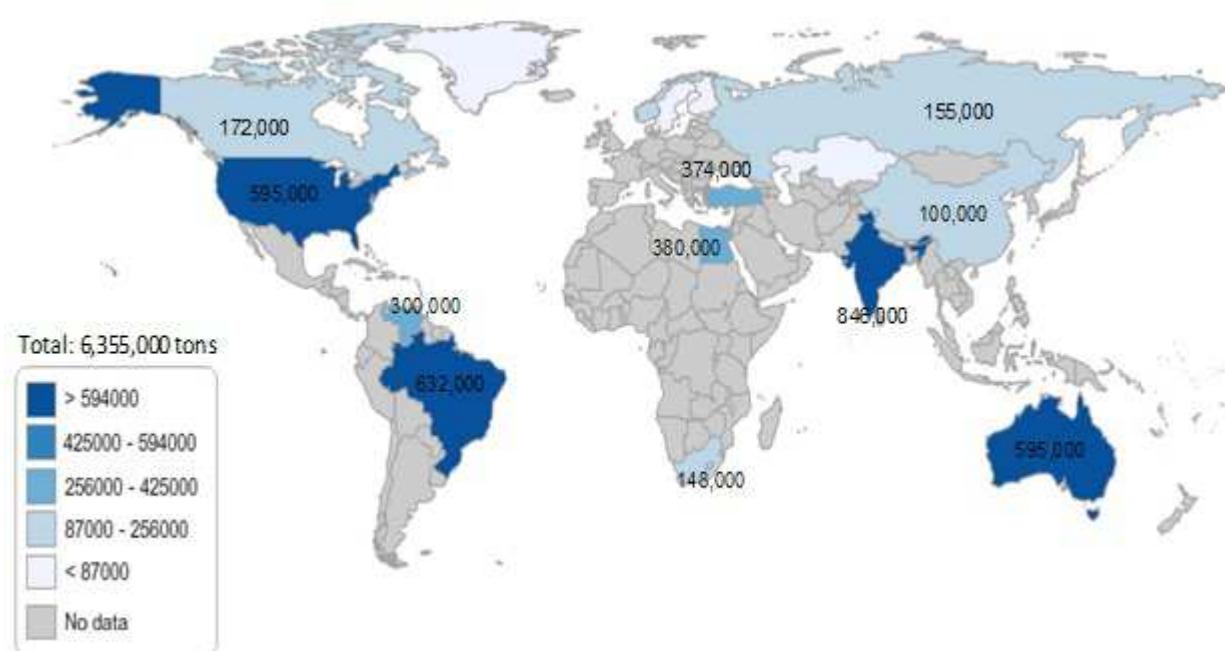


Abb. 2: OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, Uranium 2014: Resources, Production and Demand ('Red Book').
Note: these are estimates based on known uranium and rare earths resources. http://www.enerdata.net/enerdatauk/press-and-publication/energy-news-001/thorium-future-nuclear-safety-radioactive-technologies_32312.html

Deutlich erkennbar wird schon in diesen beiden Abbildungen, dass Thorium als Energierohstoff in den Kristallingesteinen und deren Abtragungsmassen sehr weit verbreitet ist.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die Einschätzungen und Berechnungen zu Reserven und Ressourcen in ständiger Bewegung befinden. In neuerer Zeit ist die die Türkei, welche in der Abb. 1 nicht erscheint, mit ihren Thoriumvorräten in die Spitzengruppe der „Thorium-Länder“ aufgestiegen. Darüber hinaus ist die Angabe von Reserven, und erst recht die der Ressourcen, insofern unsicher, als es weltweit überhaupt keinen Marktpreis für Thorium gibt. Kosten für die bergbauliche Gewinnung und

anschließende Aufbereitung sind zwar besser einzuschätzen, differieren jedoch stark nach Gewinnungsmethode, Lagerstätteninhalten und -konzentrationen sowie Arbeitskosten, Umweltstandards und vielem mehr.

Eine in vielen Fällen parallel stattfindende Mitgewinnung zahlreicher anderer Metalle, wie der Seltenen Erden, aber auch Zinn, Zirkon u.a. muss in ökonomischer Hinsicht zusätzlich berücksichtigt werden.

In ihrer Publikation „Introduction of Thorium into the Nuclear Fuel Cycle“ (2014) schätzte die OECD-NEA die globalen Thorium-Ressourcen auf zwischen 6,355 und ca. 6,373 Millionen Tonnen Thorium.

Der amerikanische Physiker Dr. Robert Hargraves, mittlerweile bei ThorCon Power an der Implementierung von Thorium-Flüssigsalz Reaktoren beteiligt, gab in seinem 2011 erschienenen Buch „Thorium – energy cheaper than coal“ (in deutschsprachiger Übersetzung erhältlich u.a. bei Amazon) folgenden Wert an:

26 Gramm Thorium ermöglichen bei Anwendung entsprechender Technologie eine Bruttoenergiefreisetzung von 250000 Kilowattstunden!

Umgerechnet auf das Kilogramm Thorium und etwas abgerundet ergibt sich eine Energiedichte von 9,5 Millionen Kilowattstunden (brutto).

Zur (vorsichtigen) Bestimmung der daraus z.B. mit einem Flüssigsalzreaktor bereitzustellenden Menge an elektrischer Arbeit (in kwh) kann der Faktor 0,4 (40%) realistisch angesetzt werden. Ein einziges Kilogramm Thorium kann somit 3,8 Millionen Kilowattstunden elektrischen Strom liefern!

Bei Ansetzung der oben erwähnten 6,355 Millionen Tonnen ermittelter globaler Ressourcen an Thorium (unterer Rand der OECD-NEA Einschätzung) ergeben sich:

$$3,8 \cdot 10^6 \text{ kwh} * 6,355 \cdot 10^9 \text{ kg} = \underline{\underline{2,4149 \times 10^{16} \text{ kwh}}}$$

Der gegenwärtige jährliche Primärenergiebedarf der Menschheit wird nach Angaben aus Wikipedia auf 140×10^{12} kwh beziffert (Stichwort „Weltenergiebedarf“). Der anteilige Strombedarf wird mit 17% veranschlagt, also auf $2,38 \times 10^{13}$ kwh.

Mit den errechneten ca. 24 Billiarden Kilowattstunden lässt sich also (theoretisch) der gegenwärtige Strombedarf der Menschheit für ca. 1014 Jahre sicherstellen.

In dem skizzierten 1014-Jahr-Thorium-Szenario tragen weder „erneuerbare“ noch fossile noch uranbasierte Energieträger zur Stromproduktion bei. Die vor der Ereichung eines geschlossenen Thorium-Uran 233 Zyklus erforderliche initiale Neutronenquelle Uran 235 bleibt dabei aus Gründen der Vereinfachung unberücksichtigt.

Aufgrund genereller geologischer Überlegungen ist von insgesamt weitaus höheren Thoriumreserven auszugehen. Die Abbildung 2 verzeichnet zahlreiche Gebiete ohne jede Angabe einer Thoriummasse. Zudem stehen die Länder mit einer Zahlenangabe unter dem Vorbehalt einer bisher nicht annähernd flächendeckenden Erhebung und Auskartierung, welche das Thorium mengenmäßig meist nur als by-product von Uran und Seltenen Erden erfasst.

Zur Geochemie des Elementes Thorium

Das Element Thorium (232/90 Th) zählt geochemisch zur „lithophilen“ Elementfamilie. Obwohl seine originäre Heimat aufgrund der hohen atomaren Massenzahl zunächst in den Tiefen des Erdkörpers (Mantel) vermutet werden kann, deuten zahlreiche Untersuchungen auf eine im Lauf der Erdgeschichte abgelaufene Anreicherung in der Erdrinde hin. Dort ganz besonders in den „granitoiden“ Gesteinen (Granodiorite, Monzonite, Syenite, Granite i.e.S., etc.), die ihrerseits Produkte der Teilaufschmelzung vorheriger, in die Tiefe versenkter anderer Gesteine sind. Die Gesteinsfamilie der Basalte kann bei der Betrachtung von Thoriumgehalten vernachlässigt werden.

Entdeckt wurde es durch den bekannten schwedischen Chemiker Jakob Berzelius im Jahr 1829. Die ersten Gesteinsproben stammten von der norwegischen Insel Lotoya (westlicher Oslo-Fjord). Die radioaktiven Eigenschaften des Thoriums entdeckte Marie Curie im Jahr 1898. Thorium ist ein sehr schwacher Alphastrahler mit einer Halbwertszeit von 14,05 Milliarden Jahren. Vergleicht man diesen Wert mit den 4,5 Milliarden Jahren Halbwertszeit des hauptsächlichen Uranisotops U238, so erklärt sich aus der mehr als 3 mal längeren Halbwertszeit des Thoriums schon in etwa das festgestellte Massenverhältnis beider Elemente in der Erdrinde.

In den Mineralen der Erdrinde kann der Thoriumgehalt schon an der Erdoberfläche durch Anwendung der Gammaspektroskopie anhand seines spezifischen Gammaspektrums (Spektrum und Intensität) mit hinreichender Genauigkeit detektiert werden. Dies gilt in jedem Fall ab Gehalten von einem Gramm je Tonne Gestein.

Thorium ist im Gegensatz zu Uran chemisch ungiftig und in wesentlich geringerem Ausmaß wasserlöslich. Es bildet unter Bedingungen der irdischen Natur keine mobilen Komplexe analog den karbonatischen und phosphatischen Uranylkomplexen in wässriger Lösung.

Thorium tritt in der Natur in den Oxidationsstufen +II und vor allem +IV auf. Der für das Uran in natürlichen Kreisläufen zu beobachtende typische leichte Wechsel zwischen dessen vierwertiger Stufe (reduzierendes Milieu) und der sechswertigen Stufe (oxidierendes Milieu) ist beim Thorium weniger ausgeprägt. Daher ist das Thorium in wesentlich geringerem Maß in Gesteinen mit organischen Inhalten (Kohlen, bituminöse Schiefer, Alaunschiefer) anzutreffen.

Thorium verblieb auch durch diese, hier nur sehr grob skizzierten, Eigenschaften weitgehend im magmatisch-plutonischen Milieu (Granite i.w. S.). Deren Verwitterungsmassen bergen jedoch global betrachtet oft die aufkonzentriertesten Thoriumvorkommen überhaupt. Vor allem die Monazitsande sind in diesem Zusammenhang zu nennen (s.u.)

Die folgende Grafik gibt eine Zusammenstellung von weltweit verfügbaren gemittelten Gehalten an Thorium 232 (sowie Uran 238, Rubidium 87 und Kalium 40) in den verschiedenen Magmatiten und Sedimenten an.

Die Dimension parts per million (ppm) ist dabei gleichbedeutend mit Gramm je Tonne (g/t) und Milligramm je Kilogramm (mg/kg).

Table 5. Summary of concentrations of major radionuclides in major rock types and soil (NCRP 1994)

Rock type	Potassium-40		Rubidium-87		Thorium-232		Uranium-238	
	Percent total potassium	Bq/kg ^b	ppm total rubidium	Bq/kg ^b	ppm	Bq/kg ^{b,c}	ppm	Bq/kg ^{b,d}
<i>Igneous rocks</i>								
Basalt (crustal average)	0.8	300	40	30	3-4	10-15	0.5-1	7-10
Mafic ^e	0.3-1.1	70-400	10-50	1-40	1.6, 2.7	7, 10	0.5, 0.9	7, 10
Salic ^d	4.5	1,100-1,500	170-200	150-180	16, 20	60, 80	3.9, 4.7	50, 60
Granite (crustal average)	>4	>1,000	170-200	150-180	17	70	3	40
<i>Sedimentary rocks</i>								
Shale sandstones:	2.7	800	120 ^f	110	12	50	3.7	40
Clean quartz	<1	<300	<40 ^f	<40	<2	<8	<1	<10
Dirty quartz	2?	400?	90?	80?	3-6?	10-25?	2-3?	40?
Arkose	2-3	600-900	80-120 ^f	80	2?	<8	1-2?	10-25?
Beach sands (unconsolidated)	<1	<300?	<40?	<40?	6	25	3	40
Carbonate Rocks	0.3	70	10	8	2	8	2	25
<i>Continental upper crust</i>								
Average ^g	2.8	850	112	100	10.7	44	2.8	36
Soils ^h	1.5	400	65 ^f	50	9	37	1.8	66

* References cited in text unless otherwise noted; single values are averages; values estimated in absence of reference are followed by question mark.

^b 1 Bq = 27 pCi.

^c To obtain series equilibrium alpha, beta, or approximate gamma (excluding bremsstrahlung and x radiation) activity, multiply by 6, 4, or 3 respectively.

^d To obtain series equilibrium alpha, beta, or approximate gamma (excluding bremsstrahlung and x radiation) activity, multiply by 8, 6, or 3, respectively.

^e From Clark *et al.* (1966); for potassium and rubidium, the range of values for rocks within the class is given; for thorium and uranium, the median and mean values are given, respectively.

^f Estimated by application of crustal abundance ratio with respect to potassium.

^g From Taylor and McLennan (1985).

^h In-situ gamma-spectral measurements at 200 locations by Lowder *et al.* (1964).

Abb. 3: Summary of concentrations of major radionuclides in major rocktypes and soil (NCRP 1994, <http://www.tenorm.com/rocktable.gif>)

Die „felsische“ (salic) Erdkruste mit den daraus hervorzuhebenden Graniten führt die Liste der Thoriumgehalte aller aufgeführten Gesteine mit 16 bis 20 ppm bzw. 17 ppm deutlich an. Darüber hinaus kommen nur noch die tonigen (shale) Sandsteine mit durchschnittlich 12 ppm als nennenswerte Thoriumlieferanten in Frage.

Die Gruppe der durch thermische und Drucküberprägung umgeformten Gesteine (Metamorphite) ist hier leider nicht explizit aufgeführt, dürfte jedoch im dem 10.7 ppm Wert für die „continental upper crust“ enthalten sein. Bei

den Metamrphiten könnten insbesondere die aus höher thoriumhaltigen Graniten entstandenen Orthogneise sowie bestimmte umgeformte tonige Sandsteine mit höheren Thoriumgehalten in den Fokus rücken.

Die insgesamt höchsten Konzentrationen an Thorium sind innerhalb „granitischer“ Gesteinskomplexe in deren sogenannten Pegmatiten zu erwarten. Darunter sind Bereiche im Gestein zu verstehen, die erst nach der Erstarrung der Hauptschmelze durch Auskristallisation aus hochtemperierten, bis ca. 630°C heißen, überkritischen Fluiden entstanden. Gänge, aber auch unregelmäßige Strukturen können vorliegen. Alle Übergänge zum eigentlichen Gestein kommen vor. Die Größe der Einzelkörper kann erheblich größer sein als im übrigen „Granit“. Nachträgliche chemisch-mineralogische Veränderungen schon weitgehend erstarrter Gesteinspartien durch sehr reaktive Komponenten, wie z.B. Metall/Chlorid oder Metall/Fluorid Lösungen sind möglich.

In den Pegmatiten scheiden sich insbesondere diejenigen Elemente ab, welche bei der Abkühlung des Hauptgesteinsskörpers nicht oder nur in geringem Umfang in die mineralischen Hauptkomponenten der Alkalifeldspäte, der Kalk-Alkalifeldspäte, der Glimmer und des Quarzes eingebaut werden konnten. Dazu zählen zahlreiche Metalle, oft als Oxide und auch das hier betrachtete Thorium.

PETRASCHECK, W. (in PETRASCHECK / POHL; Lagerstättenlehre – eine Einführung in die Wissenschaft von den mineralischen Bodenschätzten, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller) Stuttgart 1982) schreibt:

„Das wichtigste Mineral für die technische Gewinnung von Thorium, Cer und Ceriterden ist der Monazit. Er ist CePO₄ wobei für Ce etwa 60% Ceriterden und 1-19% ThO₂ eintreten können.“

Monazit ist auch heute noch ein wichtiges Mineral zur Gewinnung Seltener Erden Metalle. In granitischen Gesteinen ist es als Akzessorium oft, jedoch meist mit weit unter 1% Massenanteil vertreten. Thorium wurde seit Ende des 19. Jahrhunderts zu verschiedenen Verwendungszwecken aus Monazit isoliert. Es sei an die „Glühstrümpfe“ erinnert, Gaslaternen, die ihr sehr helles, weißliches Licht durch eine Mischung aus Cer-Thorium-Nitrat erzeugten (Auer-Werke, Oranienburg bei Berlin).

Hier zwei Fotos, die Monazit in verschiedenen natürlichen Erscheinungsformen zeigen:



Abb. 4: Monazitkristallaggregate, aus Wikipedia/Monazit

Hier handelt es sich um sehr große Kristallaggregate, die sehr wohl eine typische „pegmatitische“ Ausprägung darstellen.

Im Kontrast dazu das zweite Foto, welches Monazitsand zeigt:



Abb. 5: Monazitsand, aus Wikipedia/Monazit

Monazit erscheint oft gelblich. Daher ist bei obigem Foto anzunehmen, dass die dunklen Partikel auch aus anderen Schwermineralen (Titanit, Ilmenit, u.a.) bestehen. Solche natürlichen Mischungen von schweren Mineralen in Form von Sanden bezeichnet man auch „Seifen“. Diese kommen oft an Küsten vor. Dort wird erodiertes und abtransportiertes Material aus z.B. Graniten im

Hinterland durch die Brandung mechanisch stark aufgearbeitet. Die einzelnen Mineralkörper reichern sich entsprechend ihrer mechanischen Widerstandsfähigkeit (Härte, Spaltbarkeit) und reziprok ihrer chemischen Löslichkeit an. Mit einer Härte von 5,5 bis 6 auf der Mohs-Skala und seiner Eigenschaft, unter natürlichen Bedingungen nahezu unlöslich zu sein, erscheint dieses Mineral angereichert z.B. in den sehr ausgedehnten Monazitseifen von Travancore nahe der Südspitze Indiens. Nach PETRASCHECK (1982) liegen die Mächtigkeiten dieser Sande zwischen 0,6m und 6m. In den Sanden erreicht die Monazitkomponente im Waschrückstand oft 10%. Die Minerale Rutil (TiO_2) und Ilmenit ($FeTiO_3$) sind häufige und ebenfalls wirtschaftlich bedeutende Begleiter. Weitere Lagerstätten dieser Art existieren vor der Westküste Sri Lankas und auf Borneo. Letztere dürften eine Rolle im Rahmen der thoriumgestützten Nuklearpläne der indonesischen Regierung spielen.

Weiterhin schreibt PETRASCHECK (1982):

„Die brasilianischen Monazitseifen liegen an der Küste des Staates Espírito Santo. Es sind zum größeren Teil marine, zum kleineren Teil fluviatile Seifen. Sie wurden von Pegmatiten mit einem relativ hohen Monazitgehalt gespeist, sodass z.B. bei Prado, wo die Pegmatitgänge direkt von der Brandung bespült werden, sich noch heute Sande mit 75% Monazit bilden. Im allgemeinen aber beträgt der Gehalt der schweren Waschrückstände 10% Monazit. Als schwere Mineralien kommen daneben auch Zirkon, Ilmenit, Zinnstein, Columbit, Thorit, Xenotym und Gold vor. Ce-Gehalte liegen bei 5%.“

Es ist leicht zu erkennen, dass die Thorium-Gehalte aus solchen Vorkommen um den Faktor 300 höher liegen können, als bei den weiter oben besprochenen Vorkommen in pegmatitischen Bildungen granitischer Gesteine. Zudem ist ihr Abbau auch in technisch-ökonomischer Hinsicht wesentlich weniger aufwändig..

Die Erwähnung von Thorit und Xenotym (andere Schreibweise: Xenotim) leitet über zu den übrigen thoriumhaltigen Mineralen, welche insgesamt eine untergeordnete Rolle für die Thoriumgewinnung spielen. Sie sind nachfolgend nur aus Gründen der Vollständigkeit aufgeführt:

Thorit $ThSiO_4$, U kann anstelle Th hinzutreten

Thorianit ThO_2 , berühmte Pegmatit-Lagerstätte Langesundfjord in Norwegen (erschöpft)

Bastnäsit $(Ce, La, Nd, Y)[(F.OH)CO_3]$, mit Spuren von U und Th und anderen Seltenen Erden, sehr wichtiges Mineral zur

	Gewinnung Seltener Erden Metalle (Mine Mountain Pass, Kalifornien, dortiges Vorkommen in Scherzonen eines Gneises)
Zirkon	ZrSiO_4 , nach RÖSLER (1991) mit bis zu 12% Th und bis zu 1,5% U_3O_8
Xenotim	$\text{Y}(\text{PO}_4)_2$, U und Th können in Spuren das Yttrium ersetzen

Festzuhalten bleibt jedoch, dass die Gewinnung Seltener Erden Metalle und anderer industriell wichtiger Elemente wie Titan, Zirkonium oder auch Zinn durch einen gesteigerten Abbau von Thorium ebenfalls befördert werden würde. Eine zunehmende Nutzung von Thorium aus den erwähnten Lagerstätten trüge unzweifelhaft auch zur Vermeidung des „Abfallproblems“, bedingt durch stärker angereicherte Thoriummassen im Gefolge der Aufbereitung bei. Diese behindert in den Ländern der westlichen Welt aufgrund der Strahlenschutzauflagen und dem damit verbundenem erhöhten Aufwand die konsequente Nutzung eigener Vorräte an Seltenen Erden Metallen und verschafft Staaten wie der VR China ein Quasi-Monopol. Das müsste nicht sein.

Thoriumvorkommen in Deutschland

Aufgrund der im vorherigen Kapitel skizzierten Geochemie des Thoriums kann mit Thoriumlagerstätten gerechnet werden. Schließlich existieren auch in Deutschland zahlreiche oberflächennahe oder sogar an der gegenwärtigen Landoberfläche freiliegende granitische Gesteine, Gneise und an manchen Stellen auch Aufarbeitungsprodukte dieser Gesteine, welche sich im Gefolge eines über Granite transgredierenden Meeres in den im Hangenden vorliegenden Sedimenten (z.B. Sandsteinen) wiederfinden. Darüber hinaus könnte die Suche nach Seifenlagerstätten fluviatiler Genese zu thoriumhaltigen Monazitvorkommen führen.

Der Geochemische Atlas von Sachsen zeigt die freistaatweite Verteilung zahlreicher Elemente in den oberflächennahen Gesteinen und Böden. Auf Seite 29 der pdf-Datei ist die folgende Karte zur Konzentrationsverteilung des Elementes Thorium zu sehen:

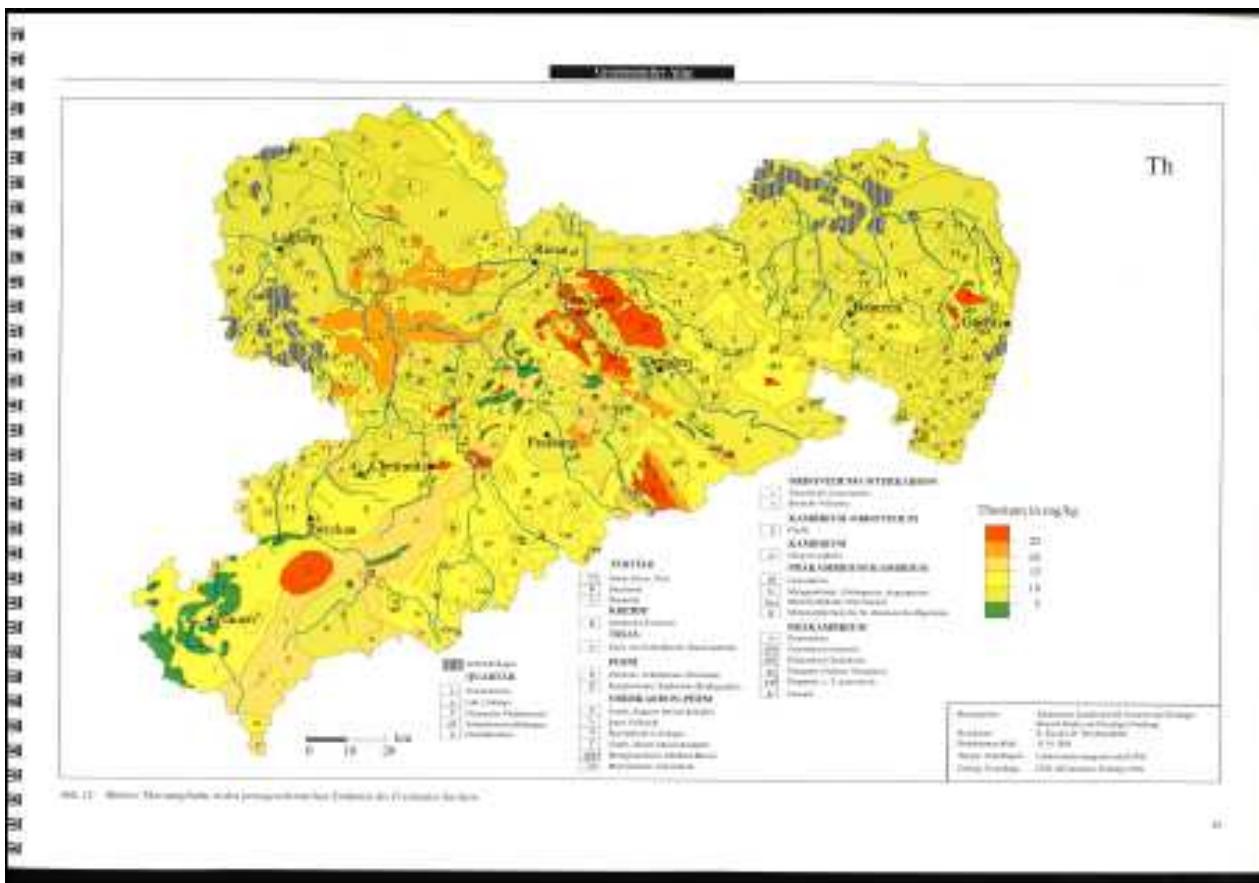


Abb. 6: Thoriumkonzentrationen (mg/kg) in Gesteinsformationen des Freistaates Sachsen, aus Geochemischer Atlas Sachsen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Bereich Boden und Geologie Freiberg (1995), <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13844>; S.28 - 29

Auf den ersten Blick fallen die orangeroten Flecken auf. Laut Legende handelt es sich dabei um geologische Einheiten, die durchschnittlich mehr als 25 ppm (mg/kg oder g/t) Thorium enthalten.

Verglichen mit den globalen Durchschnittswerten in Abb.3 handelt es sich bei diesen Gebieten eindeutig um Träger positiver Thorium-Anomalien.

Dies relevanten Werte sind hier noch einmal zusammen gestellt:

- Durchschnitt Kontinentale Oberkruste 10.7 ppm
- Durchschnitt „saure“ (felsische) Gesteine 16 – 20 ppm
- Durchschnitt Granite (i.w.S.) 17,0 ppm

Die flächenmäßig größeren Bereiche der positiven Thorium-Anomalien im Detail:

- oberkarbonisch-permischer Granit südlich von Zwickau
- oberkarbonisch-permische Granite östlich und nördlich von Chemnitz
- ältere Granite (Tremadoc) und saure Vulkanite oberkarbonisch-permisch südwestlich Freiberg bzw. südlich von Dresden an der Grenze zur Tschechischen Republik
- Meißen Massiv: oberkarbonisch-permischer Biotitgranodiorit sowie ebenfalls oberkarbonisch-permische Syenodiorite und Monzonitoide
- oberkarbonisch-permischer Markersbacher Granit, z.T. liegend unter kreidezeitlicher Sedimentdecke (Uranlagerstätte Königstein, 1990 stillgelegt), am westlichen Rand der Elbtalzone südwestlich von Dresden
- oberkarbonisch-permischer Ostlausitzer Granodiorit nordwestlich von Görlitz,

Die für einen Tagebau auf Thorium (und seine typischen Begleiter) zur Verfügung stehende anstehende Fläche (ohne Betrachtung von Siedlungsflächen, Gewässern, Wald, Biotopen, etc.) dieser Vorkommen kann - sehr vorsichtig aus der Karte ermittelt und mit einem 20%igen Sicherheitsabschlag versehen – mit 500 km² angegeben werden.

Unter der Annahme, dass diese Fläche im Tagebau um 50 m abgetragen und das hereingewonnene Gestein aufbereitet wird, ergibt sich folgende Rechnung:

$$500 * 10^6 \text{ m}^2 * 50\text{m} = 25 * 10^9 \text{ m}^3, \text{ also } 25 \text{ Milliarden Kubikmeter „Roherz“}.$$

Das durchschnittliche spezifische Gewicht von Granodioriten und verwandten Gesteinen mit 2,8 t je m³ veranschlagt, ergibt

$$25 * 10^9 \text{ m}^3 * 2,8 \text{ t / m}^3 = 70 * 10^9 \text{ t, also } 70 \text{ Milliarden Tonnen „Roherz“}.$$

Für die Thoriumkonzentration in g/t bzw. ppm sei der untere Randwert für die betrachteten Vorkommen aus der Karte im geochemischen Atlas, nämlich 25 g / t, zugrunde gelegt.

Somit ergeben 70 * 10⁹ t „Roherz“ bei einem Gehalt von 0,025 kg je t (25 g/t)

1,75 * 10⁹ kg Thorium

oder anders ausgedrückt: 1,75 Milliarden kg Thorium

Der bekannte Zahlenwert für den maximal nutzbaren Energieinhalt des Thoriums nach daraus vollständig erfolgter Erbrütung und Spaltung von Uran 233, z.B. in Flüssigsalzreaktoren, beträgt abgerundet ca. 9,5 * 10⁶ kwh je kg Th. Der elektrische Wirkungsgrad sei vorsichtig mit 0,4 (40%) angesetzt.

Die weitere Rechnung lautet daher:

$1,75 * 10^9 \text{ [kg Th]} * 9,5 * 10^6 \text{ kwh} * 0,4 = 6,65 * 10^{15} \text{ kwh elektrische Energie}$

Dieses unanschaulich hohe Ergebnis kann erst dann eindrucksvoll werden, sofern der gegenwärtige jährliche Strombedarf Deutschlands (600 * 10⁹ kwh) dazu in Beziehung gesetzt wird:

$6,65 * 10^{15} \text{ kwh} / 600 * 10^9 \text{ kwh / Jahr} = \text{ca. } \underline{\underline{11083 \text{ Jahre}}}$

Diese 11083 Jahre Vollversorgung Deutschlands mit elektrischer Energie aus nur einem kleinen Teil der Thoriumvorkommen sind in mehrfacher Hinsicht äußerst beeindruckend. Diese Zeitspanne reicht zurück bis zum Ende des letzten Glazials (Weichsel/Würm/Wisconsin/Valdai) und deckt zur Gänze die Geschichte und Entwicklung aller bisherigen menschlichen Zivilisationen ab!

Diese Zeitspanne ist so riesig, dass anzunehmen wäre, sie müsste aufgrund des irgendwann beginnenden Einsatzes der Kernfusion überhaupt nicht voll ausgereizt werden.

Die skizzierte elektrische Vollversorgung Deutschlands für 11083 Jahre wurde auf Basis des heutigen Strombedarfs gerechnet. Die zukünftige Entwicklung des Bedarfes kann höchstens für einige Jahrzehnte prognostiziert werden. Jedoch sind nicht nur Steigerungen, sondern eventuell auch Rückgänge möglich. Zu technischen Entwicklungen können gesellschaftliche treten.

Vollversorgung Deutschlands bedeutet übrigens auch, dass es über diese Zeitspanne hinweg keinen anderen Stromerzeuger in Deutschland geben müsste. Die Gesellschaften der Zukunft auf dem Boden der heutigen Bundesrepublik Deutschland könnten verzichten auf:

- jeglichen Import von fossilen Brennstoffen (Steinkohle, Erdgas) zum Zwecke der Stromerzeugung

- jegliche inländische Gewinnung von Braunkohle und Erdgas
- jegliche Verstromung von Stein- und Braunkohle sowie Erdgas
- jegliche Nutzung des Windes in Windkraftanlagen
- jegliche Nutzung der solaren Einstrahlung (Photovoltaik)
- jegliche Nutzung der Wasserkraft
- jegliche energetische Nutzung von Biomasse
- jegliche Nutzung von Erdwärme zu Zwecken der Stromerzeugung

Vollständige Autarkie bei gleichzeitiger Kohlenstofffreiheit (zumindest im Stromsektor) wären über lange Zeiten hinweg gewährleistet. Die Kohlenstofffreiheit könnte sogar vollständig werden, sollte die hoch temperierte Abwärme der Reaktoren zur elektrolytischen Produktion von Wasserstoff aus Wasser oder zur Herstellung synthetischen Benzins aus atmosphärischen CO₂ eingesetzt werden, um die nicht-elektrischen Antriebe, z.B. für den Abbau des Gesteins, „carbon-neutral“ zu gestalten.

Beim Thoriumabbau mitgewonnene Metalle der Seltenen Erden sowie andere Elemente könnten dem Land auch in dieser Hinsicht Autarkie gewähren.

Der an dieser Stelle zu erwartende Einwand, die Entwicklung – nicht nur im Bereich der Energieversorgung - der nächsten 11083 Jahre würde sich nicht prognostizieren lassen, ist richtig. Das Rechenbeispiel soll daher auch nur die prinzipielle Möglichkeit elektrischer Vollversorgung aus einer Quelle, nämlich dem Thorium-Uran 233 Zyklus, und vergleichsweise wenigen Lagerstätten aufzeigen.

Der Aufwand zur Gewinnung von Thorium und seinen Begleitern sowie die Wirtschaftlichkeit sind an dieser Stelle nicht abzuschätzen. Ein wichtiger Grund liegt schon in der Tatsache begründet, dass aktuell kein Weltmarktpreis für Thorium-Konzentrate (ThO₂) existiert.

In obiger Abhandlung wurde auch nicht betrachtet, dass die 500 km² Eingangsflächengröße des „Thorium-Tagebaues“ sicher mit Siedlungsflächen, Gewässern, Wald, Biotopen und landwirtschaftlicher Nutzfläche besetzt sind. Daraus erwachsende Nutzungskonflikte und Einschränkungen müssten in sehr langfristiger Denkweise genau abgewogen werden. Die Behandlung

dieser Aspekte würde den Rahmen dieser Recherche jedoch sprengen und eventuell auch nicht zu leisten sein, da niemand die Denkweise zukünftiger Gesellschaften auf dem Territorium der Bundesrepublik und das daraus erwachsende Handeln vorhersagen kann.

Andererseits sei den Kritikern des Grundgedankens eines Thoriumabbaus schon an dieser Stelle entgegengehalten, dass damit z.B der enorm große Flächenbedarf des heutigen Braunkohletagebaus ersatzlos entfallen könnte. Unter dem Stichwort „Braunkohletagebau“ schreibt Wikipedia:

„Der Flächenverbrauch der deutschen Braunkohletagebauten beträgt ca. 2400 km², was der vierfachen Fläche des Bodensees bzw. nahezu der Fläche des Saarlandes entspricht.“

Die im Rechenbeispiel genannten 500 km² an Thoriumgewinnungsflächen in Sachsen würden den bergbaulichen Flächenbedarf rechnerisch somit um knapp 80% verringern. Sofern Energielösungen, welche schon in geologische Zeitdimensionen hineinreichen, nicht gewünscht sind, wäre eine Reduktion der Thorium-Tagebauflächen auf 50 km² immer noch ausreichend für die nächsten 1000 Jahre!

Noch günstiger wird die Bilanz, wenn man die über 11000 Jahre währende Reichweite dieser sächsischen Vorkommen in Granodioriten, Monzonitsooiden, Syeniten, etc. mit einigen hundert Jahren prognostizierter Reichweite der heimischen Braunkohlevorräte im gesamten Land vergleicht.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass schon die arithmetischen Mittel der Thoriumgehalte verschiedener oberkarbonisch-permischer magmatischer Gesteine bis zu 35 g / t erreichen, während im Rechenbeispiel nur 25 g / t zugrunde gelegt wurden. Die Maximalwerte reichen von 44 g / t bis 66 g / t.

Die durch mangelhafte Datengrundlage gekennzeichnete schwierige Betrachtung der möglicherweise noch höher mit Monazit bzw. Thorium angereicherten Abtragungsmassen saurer magmatischer Gesteine in Deutschland bzw. Mitteleuropa bleibt einer gesonderten Darstellung vorbehalten.

Dipl-Geol. Dirk Weißenborn

im Mai 2016

