

# THORIUM- BRENNSTOFFKREISLAUF UND SALZSCHMELZE-REAKTOREN

ALTERNATIVE ENERGIEKONZEPTE DER ZUKUNFT

Stephan Moser, 15.3.2014, V1.5

---

- Einleitung: Motivation für günstige Energie
- Uran-Plutonium Brennstoff-Kreislauf
- Thorium Brennstoff-Kreislauf
- Th-MSR: Thorium-basierter Salzschnmelzereaktor
- Vergleich heutige vs. künftige Nukleartechnologie
- Kosten
- Kritik, Risiken
- Stand der Technik
- Vision & Fazit

# Einleitung: Motivation für günstige Energie

Hans-Werner Sinn: «Das grüne Paradoxon»

- Kernaussage: Bisherige Klimapolitik hilft dem Klima nicht.
- Ein unvollständiges Zertifikatsystem ist wirkungslos oder gar kontraproduktiv
- **Entweder** Zertifikatsystem **oder** staatliche Eingriffe in den Markt
- **«Grünes Paradoxon»**: Eine teilweise Beschränkung auf Nachfrage-Seite führt nicht automatisch zur Reduktion auf Angebotsseite.

Mögliche Lösungen:

1. Zertifikathandel weltweit, lückenlos; dann ermöglicht das «Nachfrage-Kartell» eine Reduktion des Verbrauchs. (Politisch kaum realistisch, siehe Kyoto etc.)
2. Günstige, saubere Energie (deutlich günstiger als Fossile) ist eine nachhaltige Lösung

# Uran-Plutonium Brennstoff-Kreislauf

«brüten»



Stoff	Anteil	Details	Anmerkungen
U 238	94,4%	-	verfügbar für weitere Brennstoffgewinnung
U 235/236	1,1%	-	unverbrauchter Brennstoff
Transurane	1,1%	Pu 239 (0,54%) Pu 240 (0,23%) Pu 241 (0,14%) ...	langlebige, radioaktive und toxische Isotope, erbrüteter Kernbrennstoff, Ursache der Endlagerproblematik <b>6400-24000 Jahre Halbwertszeit, Teils waffenfähiges Plutonium</b>
Spaltprodukte	3,4%	Xe 133 (0,54%) Nd 147 (0,37%) Zr 95 (0,35%) Cs 137 (0,28%) Ce 144 (0,27%) Ru 103 (0,25%) Ba 140 (0,14%) La 140 (0,12%) Pr 144 (0,11%) ...	hochradioaktive, kurzlebige Isotope mit Halbwertszeiten von einigen Minuten bis einigen Jahrzehnten, wandeln sich über Beta-Zerfälle in stabile Isotope der Elemente (u.a.) Molybdän, Samarium, Neodym und Palladium  <b>600 Jahre Lagerung ausreichend, für 80% davon gar nur 10 Jahre. U.a.seltene Erden als Endprodukt (=Ressourcen)</b>

**Tabelle 1.0:** Zusammensetzung eines Brennstabes nach drei Jahren Betriebsdauer

(Anfangszustand 97% U 238 und 3% U 235)

Nicht spaltbar

spaltbar

# Uran-Plutonium Brennstoff-Kreislauf

- Problematisch am Uran-Plutonium Kreislauf ist primär das Plutonium:
  - Plutonium ist radioaktiv, langlebig, giftig, bedingt waffenfähig (aus LWR)
  - Einschusszeit im Endlager wird durch Plutonium bestimmt
- Eine Wiederaufbereitung ermöglicht eine fast vollständige Verwertung des Rohstoffs und eine Reduktion der Einschusszeit auf grob 10000 Jahre.
- Ohne Wiederaufbereitung wird der Brennstoff Uran nur marginal ausgenutzt, man lagert >96% wertvolle Ressourcen ein
- Wiederaufbereitung ist in Deutschland verboten und in der Schweiz mit einem Moratorium belegt

# Thorium Brennstoff-Kreislauf

- Auf Festland sind Thorium-Vorkommen gut verteilt und ca. 3-4x häufiger als Uran resp. 150x häufiger als das heute tatsächlich genutzte U-235
- Thorium fällt u.a. bei der Gewinnung seltener Erden (u.a. für Alternativenergie-Technologien) in grossem Stil als 'Abfall' an und wird heute deponiert
- Th232 ist nicht spaltbar; schwach radioaktiv (Halbw.Zeit = 14Mrd. Jahre)
- Th232 wird durch Neutronenabsorption («brüten») und  $\beta$ -Zerfall über Protactinium zu spaltbarem U233 (dem eigentlichen Brennstoff)
- Spaltprodukte ähnlich wie beim U-Pu Kreislauf
  
- Entstehung von vernachlässigbar viel Plutonium ( $10^{-4}$ )
- U233 ist kaum verwertbar als waffenfähiges Material, da durch U232 stark verunreinigt, was das Handling massiv erschwert und eine gute Nachweisbarkeit mit sich bringt.
- Massiv verkürzte Lagerung (600-1000 Jahre)

-> *Thorium als «alternativer nuklearer Brennstoff» mit einigen Vorteilen gegenüber heutigem U-Pu*

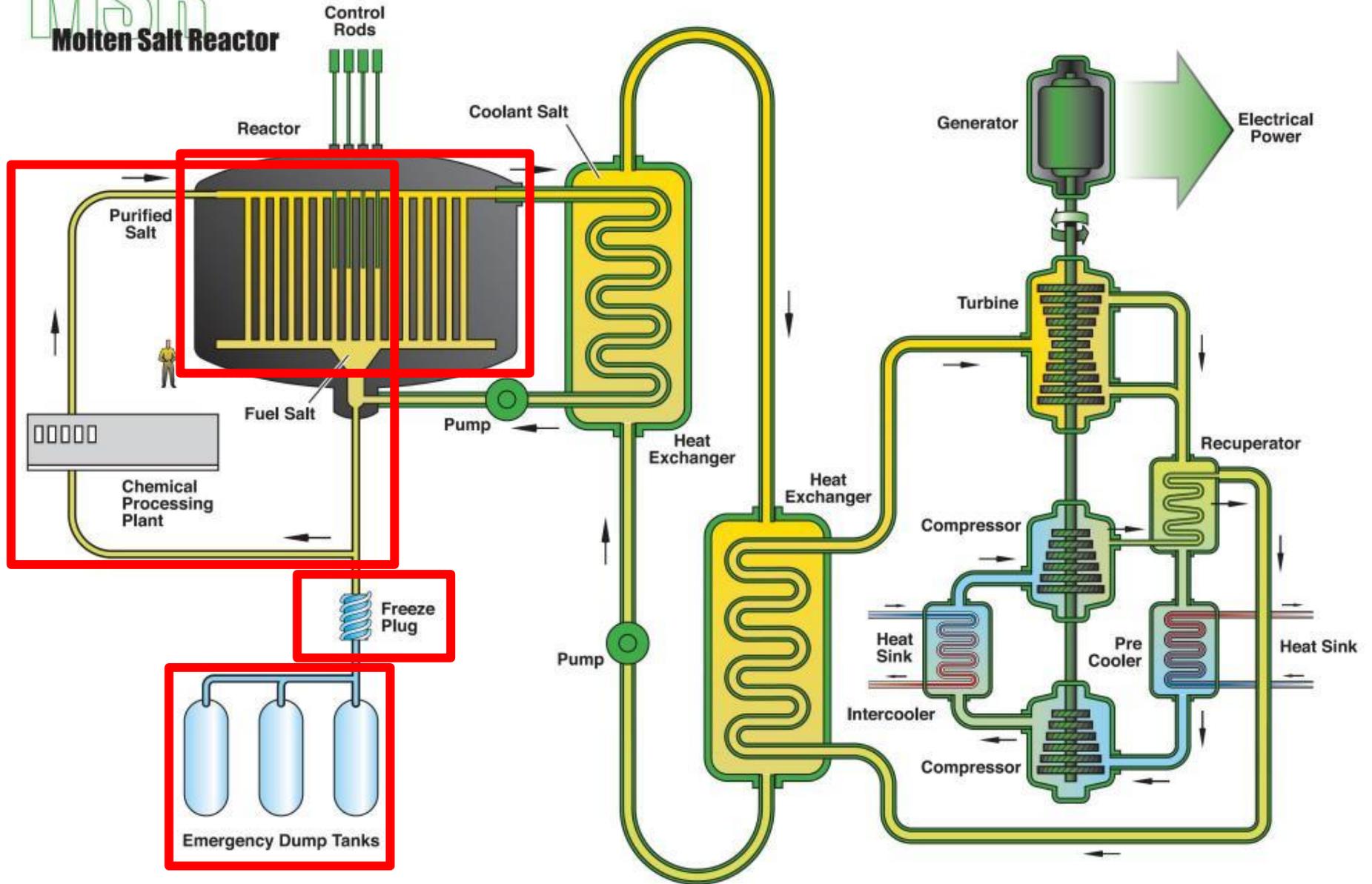
# Thorium Brennstoff-Kreislauf

Wieso wurde Thorium als Energiequelle nicht weiter verfolgt?

- Die Nutzung der Nukleartechnologie war seit der Entwicklung und über Jahrzehnte durch den (kalten) Krieg militärisch geprägt.
- Forschung und Entwicklung konzentrierte sich daher auf den U-Pu-Kreislauf (waffenfähiges Material) sowie auf Leichtwasserreaktoren, welche zuerst für atomare U-Boote entwickelt wurden.
- In den vergangenen Jahrzehnten erfuhr die Nukleartechnologie weltweit Widerstand, v.a. aufgrund von Tschernobyl; Abwanderung von Fachkräften, Stagnation des nuklearen R&D

Übrigens.... Die weltweit verbrannte Kohle enthält u.a. jährlich etwa 10.000t Uran und 25.000t Thorium, die sich in Kraftwerk-Asche und Filtern anreichern.

# MSR Molten Salt Reactor



# Th-MSR (Thorium molten salt reactor): Prinzip

- Geschmolzenes Fluorid-Salz im Reaktor enthält nur soviel Brennstoff wie für die Aufrechterhaltung der Kettenreaktion bei Betriebstemperatur notwendig ist. Kritikalitätsstörfälle sind daher sehr unwahrscheinlich.
- Die Salzschnmelze (Schmelzpunkt  $> 500^{\circ}$ ) zirkuliert unter Umgebungsdruck. Die Kernreaktionen finden in der Salzschnmelze statt. Leckstörfälle können bei Pool-Bauweise ausgeschlossen werden.
- U233 wird laufend aus Thorium232 erbrütet. Die Spaltung von U233 liefert die eigentliche Energie und die für das Brüten notwendigen Neutronen.
- MSR können sowohl als thermische wie auch als schnelle Reaktoren ausgelegt werden. Mit schnellen Neutronen kann normaler U-Pu-Abfall transmutiert werden. Auch kann dann leichter Pu als Spaltstoff in einer Übergangsphase eingesetzt werden, die notwendig ist, um erst mal eine Mindestmenge U-233 zu erbrüten.
- In einem chemischen Kreislauf können kontinuierlich Zerfallsprodukte entnommen und neuer Brennstoff beigefügt werden. Radiotoxische/flüchtige Spaltprodukte werden damit räumlich getrennt von der Anlage, welche potentiell havariieren kann.
- Die Temperatur der Salzschnmelze regelt sich selber (ca.  $650^{\circ}$ ); bei Erwärmung dehnt sie sich aus, was die Reaktion hemmt -> negativer thermischer Reaktionskoeffizient = Selbstregelung

# Th-MSR (Thorium molten salt reactor): Prinzip

- Bei zu starker Erwärmung oder Stromausfall schmilzt ein aktiv gekühlter Salz-Verschluss-Pfropfen am tiefsten Punkt des Systems und lässt die Salzlösung in geometrisch unkritische Behälter auslaufen und erhitzen. Behälterwände enthalten Neutronenabsorber, die Kernreaktion stoppen. Die geringe Nachzerfallswärme kann passiv abgeführt werden.
- Der Brennstoff wird fast vollständig «verbrannt». Spaltprodukte fallen etwa gleich viele an pro Energieeinheit wie in anderen Reaktoren.
- Es existieren verschiedene ähnliche Reaktor-Konzepte, u.a. solche mit zwei Kreisläufen (U233-Kern und Thorium «Blanket» außen rum für Erbrütung des U233)
- Es gibt einige Varianten von Salzschnmelzereaktoren, die das Abbrennen heutiger nuklearer Abfälle ermöglichen. Dadurch wird der Abfall zur Ressource und die Endlagerungsproblematik lässt sich deutlich entschärfen. Insbesondere Plutonium lässt sich via Energiegewinnung vernichten.
- Das Oak-Ridge Lab Experiment (funktionierender Salzschnmelzereaktor mit U-233) wurde aus politischen Gründen nicht weiterverfolgt. Der Reaktor war 1965-1969 erfolgreich in Betrieb.
- Salzschnmelze-Reaktoren zeigen nicht die bekannten Risiken/Probleme heutiger Reaktoren.

	U-Pu heute (Druckreaktor)	Thorium MSR
Plutonium entsteht	Ja	Kaum ( $10^{-4}$ )
Nuklearer Abfall	96% Waste (ca. 20t/a*GW)	<1% Waste (ca. 125kg/a*GW),
Endlagerung	Mehrere 10000 Jahre (Plutonium)	600-1000 Jahre ausreichend
Druck im Reaktor	Dampfdruck bei 300°	Umgebungsdruck, kein Druckgefäß
Nachzerfallswärme	Aktive Kühlung nötig	Wenig Material, passiv gekühlt
Kühlsysteme	Zwingend, mehrfach redundant	Nicht notwendig
Gefahr von H2-Explosion	Ja	Nein (kein Zirkonium-Brennstoffmantel)
GAU, Kontamination	Möglich	Gering. Wenig Material im Kreislauf, bei Normaldruck
Kernschmelze	Möglich	Nicht möglich (bereits geschmolzen)
Systemstabilität	Im Prinzip instabil (langsam)	Stabil (neg. Temperaturkoeffizient)
Prozesslokalität	Brennstoffprozess geographisch verteilt	All-in-one Anlage, Kontrolle über gesamtes Material
Brennstoffwechsel	Abschaltung, aufwändig	Kontinuierlich im Betrieb
Wiederaufbereitung	Möglich, in externen Anlagen	Laufend im Prozess
Regelbarkeit	Bandenergie-typisch, träge	Lastgeführt, Reaktion < 60s. Somit schnelle variable Verfügbarkeit
Prozesstemperatur	Ca. 300°	600°-650° oder höher. Höhere therm. Effizienz. Brauchbar für H2-Produktion
Stromkosten	Status quo	<b>Deutlich &lt; Kohlestrom ist plausibel</b>

# Kosten

- Strom aus Th-MSR Anlagen ist günstig, aus folgenden Gründen:
  - Kompaktere Reaktor-Bauweise, weniger bauliche Massnahmen
  - Kein Druckbehälter weil Normaldruck
  - Weniger Sicherheitssysteme, da wesentliche Risikoreduktion
  - Höhere thermische Effizienz wegen höheren Temperaturen
  - Deutlich geringere Endlagerkosten (600-1000Jahre)
  - Risikoversicherung fällt nicht ins Gewicht
  - Einfachere Brennstoffbereitstellung, keine aufwändige Brennstabherstellung, keine Verpackung, weniger Transporte
  - Brennstoff ist praktisch überall auf der Welt verfügbar, Unabhängigkeit
  - Brennstoff wird fast vollständig verwertet
  - Ideale Integration ins Stromnetz, da lastgeführt; keine Speicher oder Reserveleistung wie bei Erneuerbaren notwendig; kein Ausbau der Netze
  - Serieproduktion versus individuelle Bauprojekte wie heute
- Es ist plausibel, dass Th-MSR-Strom günstiger ist als Kohle;  
**Durchbruch-Bedingung global, echter Klimaschutz wird möglich**

# Kritik, Risiken

- U233 als Zwischenprodukt ist theoretisch waffenfähig und könnte dem Kreislauf entnommen werden
  - U233 ist durch Verunreinigung mit U-232 stark radioaktiv und schwierig in der Handhabung; u.a. würde Waffen-Elektronik zerstört; leichte Detektierbarkeit
  - Andere Wege der Proliferation sind deutlich einfacher und günstiger
  - Heutige Nationen, die Thorium-Technologien verfolgen, haben bereit funktionstüchtige Kernwaffen oder keine Ambitionen dazu
- Es entstehen trotzdem Stoffe, die endgelagert werden müssen
  - Korrekt. Jedoch massive Reduktion der Einschlusszeit auf 600-1000 Jahre
  - Endlagerung ähnlich wie für heutige medizinische und industrielle radioaktive Abfälle, von denen grosse Mengen anfallen
  - Endlagerung heutiger chemischer Abfälle mindestens so problematisch aufgrund ihrer gewaltigen Mengen und Langlebigkeit
- «Thorium-Thema ist ein alter Hut, hat nie funktioniert, kommt zu spät und wird nie wirtschaftlich»
  - Diese Fragen sollte man dem Markt und dem Wettbewerb der Technologien überlassen. Lernkurven sind heute in allen Technologien notwendig und möglich (PV, Wind, Nuklear, Geothermie, etc.)

# Stand der Technik im Bereich Thorium / MSR

- MSR war in Betrieb 1965-1969 am Oak Ridge National Lab, USA
- 2011: Chinesische Akademie der Wissenschaften gibt Projektstart bekannt:
  - Mehrere hundert Forscher und Entwickler, 300Mio. USD
  - Demonstrator MSR bis 2017 (2MW), Industrialisierung nach 2020
- Indien plant Thorium-Wirtschaft
- Thorium Forschung in Norwegen; u.a. Thorium für heutige Reaktoren
- Diverse Startups in den USA (z.B. Flibe Energy) und Japan; neue Generation von Kernphysikern
- Dual Fluid Reactor (Deutschland): Patent (2013) auf weit entwickeltem MSR-Konzept
- «Alternative nuclear»: Investoren wie, Bill Gates (Microsoft), Russ Wilcox (e-Ink), ex-CTO Westinghouse Regis Matzie, Sir Richard Branson (Virgin), Google etc. investieren in neue Nukleartechnologie



# Vision: Energieversorgung CH (365/24) durch Th/MSR

- **Wirtschaftliche und CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung**
  - Günstiger Strom, wirtschaftliche Vorteile
  - Ausgangspunkt für saubere Mobilität (H<sub>2</sub>, Methan, Syngas, Strom...)
  - Kein Ausbau der Stromnetze notwendig
  - Im Prinzip keine Speicherung notwendig
  - Lager von Brennstoff für Jahrzehnte möglich; umfassende «Autarkie»
  - Ein einfaches Marktdesign wird möglich, ohne komplizierte, ineffiziente Regulierung und Subventionswirtschaft
- **Ökologischer Mehrwert**
  - Sehr geringe CO<sub>2</sub>-Belastung, massive Ressourcenschonung
  - Weniger Verbau der Landschaft durch Wind- und Solaranlagen
  - Weniger intensive Bewirtschaftung der Schweizer Wälder, weniger Anbaufläche für Biofuel o.ä.; weniger Transporte
  - Denkbar ist ein Rückbau von Staumauern und Flusskraftwerken an ökologisch schwierigen Standorten. Es besteht kein Zwang, alle Standorte auszubauen wie in der geplanten Energiewende.

# Vision: Thorium/MSR-Energieversorgung weltweit

- Kohle reicht noch > 200 Jahre
- Öl reicht noch > 40 Jahre
- Gas reicht noch > 100 Jahre

Punktueeller Einsatz von Solar/Windenergie in westlichen Ländern verbilligt fossile Brennstoffe in der übrigen Welt; diese werden breitwillig und sowieso verbrannt, solange sie die billigste Energie darstellen.

Wir benötigen Energie, die **günstiger ist als Kohle**. Damit wird Kohle **unwirtschaftlich** und bleibt im Boden.

*Thorium/MSR hat dieses Potential und sollte erforscht und entwickelt werden.*

# Fazit

- Eine Gesellschaft, die fähig ist, Thorium-Technologie und MSR zu erforschen, entwickeln und betreiben, sollte dies tun.
- Es sollte ein gesunder, **nicht-ideologischer** Wettbewerb aller möglichen Lösungen im Energiebereich stattfinden
- Die Zukunft wird eine Kombination verschiedener Technologien bringen
- Weltweit wird das Thema Th/MSR diskutiert, entwickelt und Projekte sind am laufen. Es entsteht eine Dynamik.  
Nur deutschsprachigen Raum ist dies weitgehend ein Tabu-Thema.



# Einige Quellen

- Wikipedia, molten salt reactor:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Molten\\_salt\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Molten_salt_reactor)
- Wikipedia, Thorium:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium>
- Kurze Zusammenfassung Thorium-Brennstoffkreislauf:  
[http://www.novo-argumente.com/magazin.php/archiv/novo112\\_77/](http://www.novo-argumente.com/magazin.php/archiv/novo112_77/)
- Oak Ridge National Lab MSR Experiment (ca. 1965): (ORNL SMR  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Molten-Salt\\_Reactor\\_Experiment](http://en.wikipedia.org/wiki/Molten-Salt_Reactor_Experiment))
- Patentschrift (Prosa-Beschreibung) Dual Fluid Reactor:  
<http://www.google.com/patents/WO2013041085A2?cl=de>
- Flibe Energy (US-Startup): <http://flibe-energy.com/>  
Kirk Soerensen, Gründer: «Thorium in 5 minutes»: [Youtube](#)
- Energy from Thorium Blog: <http://energyfromthorium.com>
- TechTalk Kun Chen (Chinese Academy of Sciences):  
<http://www.youtube.com/watch?v=5UT2yYs5YJs>
- «Super Fuel – Thorium, the green energy source for the future», Richard Martin, Palgrave-Macmillan, 2012, 256s
- «Thorium – cheaper than coal», Robert Hargraves, 2012, 480p. ISBN 9781478161295

Kommentare, Korrekturen, Feedback etc. bitte an:

**Stephan Moser**

sm@stmoser.ch