

# **Partitionierung & Transmutation**

## **neue Konzepte der nuklearen Abfallentsorgung**

Prof. Dr. Horst-Joachim Lüdecke  
Physiker  
EIKE-Presssprecher

Nov. 2010

# 1. Allgemeines

Die Grundzüge der Energiegewinnung aus Kernspaltung (Fission) können zahlreichen Beschreibungen entnommen werden. Empfehlenswert sind die Zusammenstellungen *Kernenergie.pdf* [2] sowie *ES-II.07.pdf* [3], sowie ein Beitrag von Schulenberg - alles Autoren der TH Karlsruhe und in der EIKE-News als pdf-Files beigelegt, ferner [10]. Über den allgemeinen heutigen Stand und die Zukunft der Kernenergienutzung informiert ein Sonderdruck der Universität Bochum [1], der ebenfalls als pdf-File beigelegt ist, ferner [9] und [11]-[13].

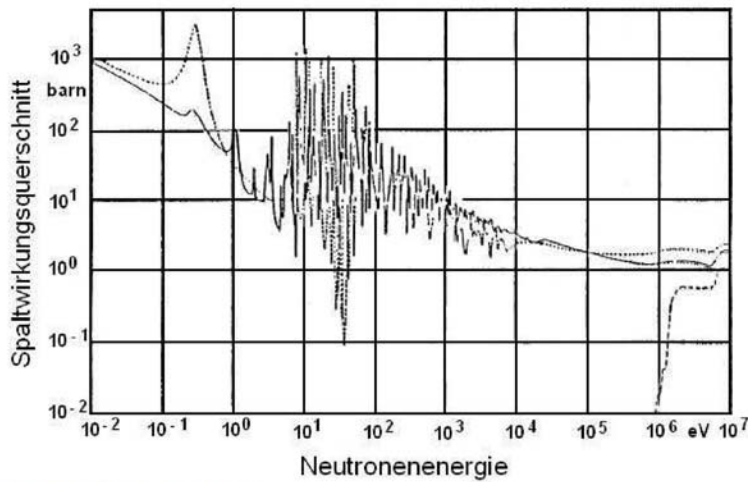
Das Prinzip der Energiegewinnung aus Atomkernen beruht auf der berühmten Einstein-Gleichung  $E = mc^2$ . Bei der Kernspaltung von Uran-Isotopen, Plutonium, Thorium oder entsprechenden Brennstoffgemischen, ist die Gesamtmasse der Spaltprodukte kleiner als die der Ausgangsstoffe. Die Massendifferenz  $\Delta m$  wird vorwiegend als kinetische Energie der Spaltprodukte  $E = \Delta m \cdot c^2$  freigesetzt. Die beim Abbremsen der Spaltprodukte erzeugte Wärme wird schließlich zur Dampferzeugung und via Dampfturbinen zur elektrischen Stromerzeugung ausgenutzt. Bei der Fusion ist es umgekehrt die Verschmelzung von zwei sehr leichten Atomkernen – man verwendet das Wasserstoffisotop Tritium -, die zu einem schwereren Atomkern führt, der leichter als die Gesamtmasse der Ausgangskerne ist, wobei wiederum kinetische Energie frei wird. Ein Fusions-Reaktor liegt aber noch – wenn er sich überhaupt jemals als wirtschaftlich erweisen kann – in weiter Ferne.

Wegen des sehr hohen Zahlenwertes des Quadrats der Lichtgeschwindigkeit  $c^2 \approx 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$  in der Einstein-Gleichung handelt es sich sowohl bei der Kernspaltung als auch bei der Fusion um sehr große Mengen an kinetischer Energie, die aus sehr kleinen Massendifferenzen frei werden. Der tiefere Grund für die hohe Energieeffizienz von Spaltung oder Fusion, verglichen mit der konventionellen Verbrennung von Kohle, Erdöl oder Gas, liegt in der unterschiedlichen Größenordnung der Bindungsenergien. In Atomkernen liegen die Nukleonen-Bindungsenergien im MeV-Bereich, in der Atomhülle dagegen, deren Elektronen-Bindungsenergien für die Energiefreisetzung der konventionellen Verbrennung verantwortlich sind, ist es nur grob 1 Millionstel davon – hier geht es nur noch um eV ( $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Entsprechend verhalten sich die Energiedichten der jeweiligen „Brennstoffe“ zueinander. Die Energieausbeute aus Reaktorbrennstoff ist ungleich höher als aus der konventionellen Kohle-, Erdöl- oder Gasverbrennung.

Kernspaltung in Kernreaktoren wird von freien Neutronen verursacht, die beim Eindringen in den positiv geladenen Zielkern wegen ihrer fehlenden elektrischen Ladung nicht von dessen Coulombwall, dem elektrostatischen Potential der Kernladung aus den positiv geladenen Protonen des Kerns, abgestoßen werden. Die zum kontinuierlichen Betrieb des Reaktors unabdingbare Kettenreaktion, sowie die Eignung der Elemente des Kernbrennstoffs zum Betrieb eines Kernreaktors (reiner Brennstoff oder ein Gemisch) und schlussendlich die evtl. Spaltung des Kernabfalls bereits im Reaktor selber hängen von zwei Schlüsselfaktoren ab

- dem Spaltwirkungsquerschnitt
- und dem hieraus folgenden D-Faktor (Neutronenverbrauch pro Kernspaltung)

Nur bei ausreichend hohem Spaltquerschnitt und einem negativen D-Faktor, der angibt, dass im Spaltprozess ein Neutronenüberschuss entsteht, ist eine Kettenreaktion möglich. Bild 1 zeigt als Beispiel die Spaltwirkungsquerschnitte der Uran-Isotope  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  sowie von  $^{239}\text{Pu}$ . Man erkennt die hohe Energieabhängigkeit der Spaltquerschnitte.

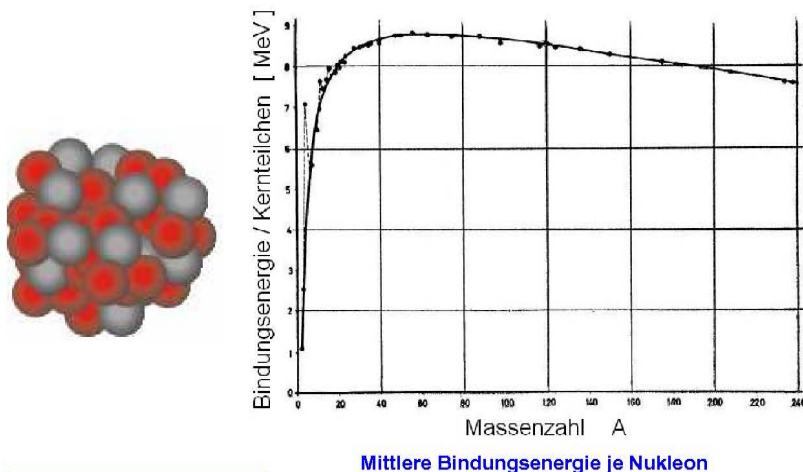


Spaltquerschnitte von

U – 235 (—),  
 U – 238 (---) und  
 Pu – 239 (·····)

Bild 1: Spaltwirkungsquerschnitte von Uran und Plutonium Isotopen,  $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$  (Bildquelle [2])

Bild 2 zeigt die Bindungsenergie eines einzelnen Nukleons gegen die Massenzahl des Atomkerns. Daraus wird deutlich, dass sowohl bei der Fission als auch bei der Fusion kinetische Energie frei wird.



1 eV =  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Bild 2: Bindungsenergie der Kernbausteine in Abhängigkeit von der Kernmassenzahl. Sie nimmt sowohl bei der Fusion von sehr leichten Kernen (Wasserstoff oder Wasserstoffisotope), als auch bei der Kernspaltung von sehr schweren Kernen (z.B. Uran oder Plutonium) zu (Bildquelle [2]).

Die Masse eines Atomkerns ist stets kleiner als die Gesamtmasse seiner Nukleonen. Die dieser Massendifferenz gemäß Einstein-Gleichung entsprechende Energie wird als die totale Bindungsenergie des Atomkerns bezeichnet. Bei der Fusion von zwei sehr leichten Kernen besitzen die Nukleonen des resultierenden Kerns eine höhere Bindungsenergie, man muss dazu in Bild 2 ganz links auf der Kurve etwas weiter nach rechts gehen. Bei der Spaltung/Fission verhält es sich ebenso, allerdings muss man nun in Bild 2 von (weit) rechts nach links gehen. Infolge der höheren Bindungsenergie des Endprodukts bzw. der Endprodukte weisen diese eine geringere Gesamtmasse als die der Ausgangskerne auf. Diese Massendifferenz steht im wes. als kinetische Energie beim Fusions- bzw. Kernspaltungs-Prozess zur Verfügung.

## 2. Das P&T Prinzip

Die Zauberworte des insbesondere in der EU verfolgten neuen Kernkraftwerkskonzeptes der IV. Generation von Kernkraftwerken [4], [14] heißen „**Partitionierung und Transmutation**“ (P&T). Damit werden zukünftig etwa 99% des bisherigen abgebrannten Kernbrennstoffs vermieden. Zur Zeit erzeugen in der EU 145 Reaktoren rd. 2500 Tonnen Kernmüll im Jahr [15], so dass nach Einführung von P&T davon nur noch grob 25 Tonnen übrig bleiben, die dauerhaft untergebracht werden müssen. Wie will man dieses Kunststück fertigbringen?

Im ersten Schritt der **Partitionierung** werden die bisher aufbereiteten, oder in die Endlagerung verbrachten radioaktiven Bestandteile des Kernabfalls abgetrennt (partitioniert). In einem zweiten Schritt, der auf Einschaltung eines speziellen separaten Reaktors basiert, werden sie in Substanzen mit kürzerer Halbwertszeit **transmutiert**. Das Verfahren hat nicht nur den Vorteil, die ursprüngliche Menge des radioaktiven Abfalls um etwa zwei Größenordnungen zu verringern, sondern zugleich nahezu den vollständigen Energieinhalt des ursprünglichen Spaltmaterials auszunutzen, der bei einer Verbringung in Endlagerstätten als nutzlose Wärme verloren geht [16]. Sozusagen als „Nebenprodukt“ ist infolge der hohen Ausnutzung des Kernbrennstoffs mit P&T daher die ohnehin sehr langfristige Verfügbarkeit von Kernbrennstoff nunmehr über nicht mehr überschaubare Zeiträume von vielen tausend Jahren gesichert.

## 3. Das Problem mit den Aktiniden

Die bei der Kernspaltung in den heutigen Reaktoren erzeugten Elemente, die aktuell für die Schwierigkeiten ihrer Beseitigung sorgen, sind die sog. Aktiniden, d.s. Elemente schwerer als der Kernbrennstoff  $^{235}\text{U}$ . Die Reaktionen in den aktuellen Leichtwasserreaktoren (LWR) verlaufen dabei wie folgt: Das im Brennstoff ebenfalls enthaltene  $^{238}\text{U}$  fängt ein Neutron aus der Kettenreaktion ein, wobei  $^{239}\text{U}$  entsteht. Dieses zerfällt innerhalb von wenigen Minuten über zwei hintereinander ablaufende  $\beta$ -Zerfälle [5] in  $^{239}\text{Np}$  (Np = Neptunium) und danach in  $^{239}\text{Pu}$  (Pu = Plutonium). In entsprechenden weiteren Reaktionen entstehen dann die Aktiniden Am (Am = Ameritium) und Cu (Cu = Curium). Zusätzlich entstehen die langlebigen Spaltprodukte Jod und Technetium. Die Halbwertszeiten und die pro Tonne Brennstoff in kg erzeugten Mengen der maßgebenden Isotope zeigt Bild 3:

Isotop	$T_{1/2}$ [Jahr]	Menge [kg]
$^{237}\text{Np}$	$2,1 \cdot 10^6$	0,65
$^{238}\text{Pu}$	87,7	0,23
$^{239}\text{Pu}$	$2,4 \cdot 10^4$	5,9
$^{240}\text{Pu}$	6500	2,6
$^{241}\text{Pu}$	14,35	0,68
$^{242}\text{Pu}$	380.000	0,6
$^{241}\text{Am}$	432	0,77
$^{243}\text{Am}$	7000	0,14
$^{244}\text{Am}$	18	0,03

Bild 3: Halbwertszeit  $T_{1/2}$  und Menge der pro Tonne Kernbrennstoff anfallenden Actiniden (Zahlenwerte aus [7]).

Unter der Halbwertszeit  $T_{1/2}$  versteht man die Zeit, in welcher, unabhängig vom gewählten Anfangszeitpunkt, die aktuell halbe Menge des Ausgangsstoffes  $N_0$  radioaktiv zerfallen ist [6]. Das Zerfallsgesetz lautet  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ , hieraus folgt  $T_{1/2} = \ln(2)/\lambda$ .

Unter Zugrundelegung einer Uranmine als radiotoxischer Referenz dauert es aktuell etwa 1 Mio. Jahre (s. hierzu Bild 4), bis die langlebigen Abfälle auf den Referenzwert abgesunken sind. Diese Zeitspanne sorgt trotz der relativ geringen Radiotoxizität dieses Abfalls für die verständliche Beunruhigung der Öffentlichkeit auf der einen und die Bestrebungen der verantwortlichen Stellen auf der anderen Seite, um diesen Abfalls sicher zu verwahren. Mit P&T dagegen hat man es nur noch mit wenigen hundert Jahren zu tun, bis der Referenzwert erreicht ist und dies auch nur noch mit etwa 1% der ursprünglichen Abfallmenge ohne P&T.

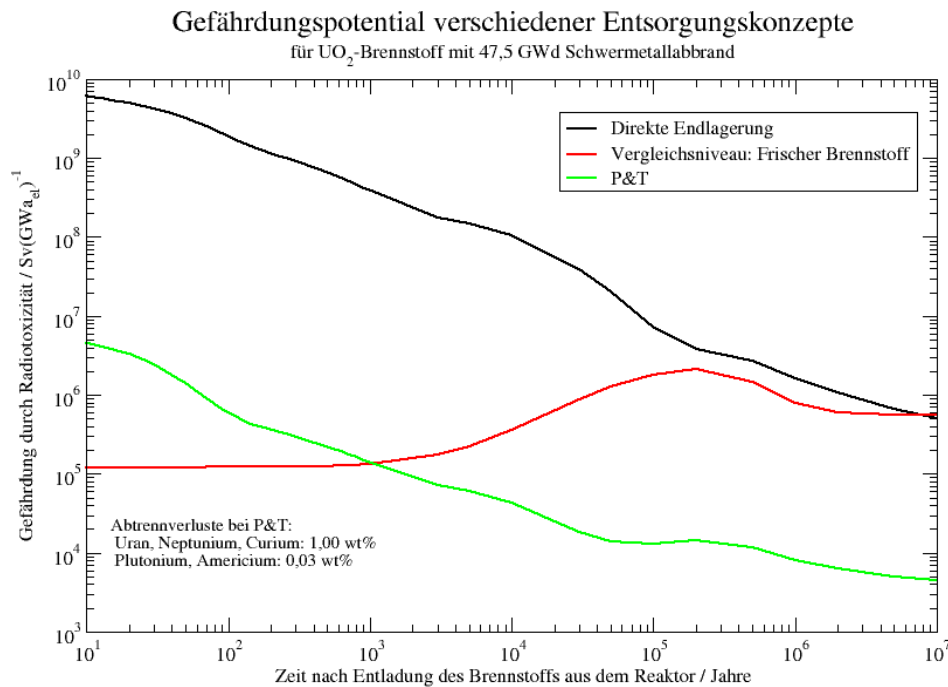
## 4. Transmutation

Die Grundidee der Transmutation ist einfach: Man spaltet die extrem langlebigen und damit unerwünschten Actiniden durch Neutronenbeschuss und wandelt sie somit in schneller zerfallende Isotope um. Damit erledigt sich das Problem der Endlagerung in wenigen 100 Jahren. So einfach dies klingt, die praktische Ausführung ist es natürlich nicht. Das Kernproblem sind dabei die Spaltquerschnitte der erforderlichen Spaltreaktionen. Im konventionellen LWR, der mit moderierten (thermischen) Neutronen arbeitet, sind die Spaltwirkungsquerschnitte der Actiniden bei so tiefen Neutronenenergien für eine Beseitigung zu klein. Insbesondere entstehen bei diesen Prozessen zu wenig neue Neutronen, um den Spaltprozess aufrecht zu erhalten. Als Folge davon läuft die Spaltung der Actiniden im LWR zum einen nicht von alleine ab, und zum zweiten ist die Spaltrate viel zu gering. Die Actiniden häufen sich daher im klassischen LWR an und führen zu den schon genannten, relativ hohen Abfallmengen radiotoxischer Substanzen.

Eine prinzipielle Lösung des Problems der Actinidenbeseitigung bestünde im Einsatz von sog. schnellen Brutreaktoren, d.s. Typen, die mit ausreichend schnellen Neutronen zur Transmutation der Actiniden arbeiten (Generation IV). Solche Reaktoren, die heute noch mit Natrium als Kühlmittel arbeiten, besitzen aber den Nachteil, nicht inhärent sicher zu sein und kommen daher für ein Konzept, das das Sicherheits- und das Entsorgungsproblem gleichermaßen löst, zumindest in Ländern mit höchsten Sicherheitsanforderungen nicht in

Frage. Dies wird sich mit anderen Typen der IV. Generation, auf die hier nicht näher eingegangen wird, einmal ändern. Diese Anlagen werden noch einen größeren Zeitschritt weiter als P&T in der Zukunft liegen.

In Bild 4 ist das Gefährdungspotential der unterschiedlichen Kernabfallentsorgungskonzepte gegen die Zeit aufgetragen, wobei als Referenzwert frischer Brennstoff (rote Linie) gelten kann. Man sieht, dass die grüne Kurve des P&T - Verfahrens die rote Kurve bereits bei etwa 1000 Jahren schneidet. Dies ist beim bisherigen Konzept der Abfallbeseitigung ohne Wiederaufbereitung erst nach 10 Mio. Jahren der Fall.



*Bild 4: Gefährdungspotential in Abhängigkeit von der Zeit für die direkte Endlagerung (schwarze Kurve) und für P & T (grüne Kurve), Bildquelle [8].*

## 5. Die ADS – Methode

Die strategische Grundidee des „Accelerator Driven System“ (ADS) besteht darin, auf den bereits vorhandenen, inhärent sicheren LWR der III. Generation aufbauend eine vorläufige Brücke zu der später kommenden IV. Generation „schneller“ Reaktoren zu schlagen, die dann in weiterer Zukunft den Großteil der Actiniden direkt im Betrieb verbrennen können. Die technische Grundidee von ADS besteht darin, den Actiniden-Abfall der heutigen LWR-Reaktoren in speziellen unterkritischen Reaktoren zu transmutieren. Mit „unterkritisch“ ist gemeint, dass in diesen Transmutations-Reaktoren keine sich selbst tragende Kettenreaktion abläuft. Infolgedessen müssen die zur Transmutation erforderlichen Spaltneutronen von einer externen Quelle erzeugt werden. Es handelt sich dabei um eine sog. Spallations-Neutronenquelle, in welcher ein von einem Beschleuniger erzeugter Protonenstrahl mit einer

kinetischen Energie zwischen 0,6 bis 1 GeV auf einen Targetkern geschossen wird. Als Folge davon „verdampft“ der Targetkern, und es werden rund 15 bis 30 Neutronen pro getroffem Kern frei gesetzt. Das ADS-Konzept erzeugt als „Nebenprodukt“ mehr Energie als es benötigt, denn die aus den Spaltprozessen der Spallationsneutronen freiwerdende Energie übersteigt den Energiebedarf des Beschleunigers (Bild 5).

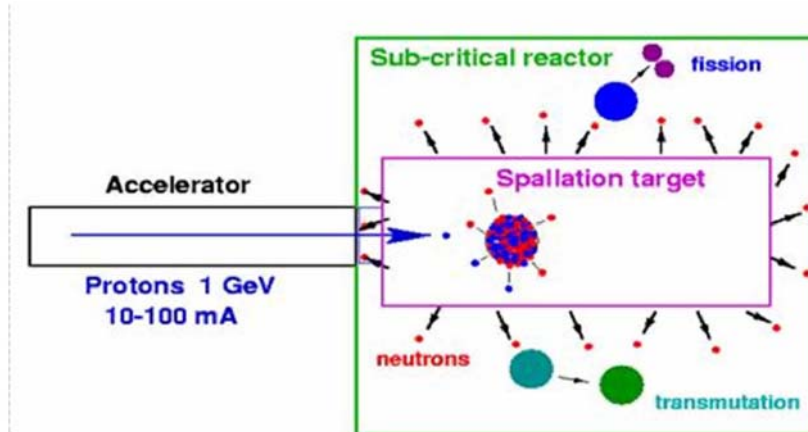


Bild 5: Das ADS-Prinzip (Bildquelle [3])

Das ADS-Konzept im Vergleich mit den heute gebräuchlichen Reaktorkonzepten in der EU zeigt Bild 6.

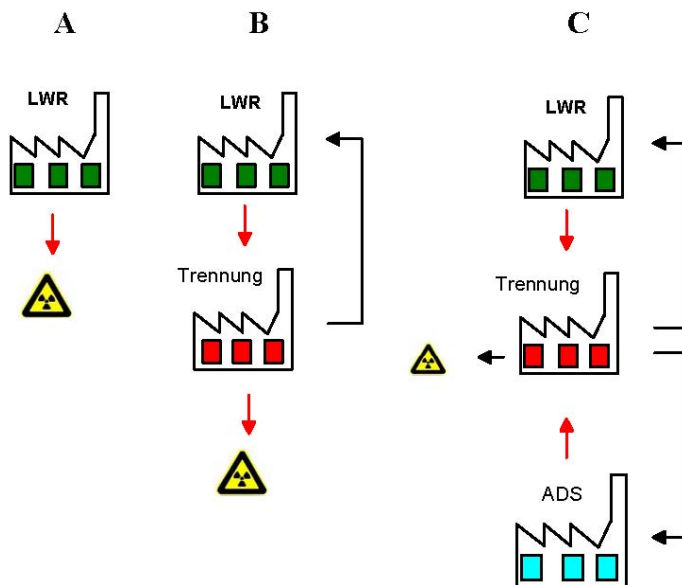


Bild 6: Konzepte der Abfallbeseitigung von Kernreaktoren. A: „offener“ Zyklus, der Abfall wird deponiert. B: Einfaches Recycling (z.Zt. in Frankreich und Belgien), ein Teil des entstandenen (erbrüteten) Plutoniums wird dem frischen Brennstoff beigemischt. C: Die im Prozess B deponierten Actiniden werden in einem ADS-Reaktor „verbrannt“

Die technischen Schwierigkeiten des ADS-Prozesses liegen neben einer Reihe von Materialproblemen vor allem in der unabdingbaren, sehr hohen Ausfallsicherheit der Spallationsquelle [17], [18]. Schon bei einem Ausfall über den Zeitraum von wenigen Sekunden sinkt die Temperatur von Target, Reaktorstruktur und Brennstoffelementen um mehrere 100 Celsiusgrade ab. Solche Vorgänge führen bei zu vielen Ausfällen zu starker thermischer Materialbelastung, die den ADS-Reaktor auf Dauer schädigt, und sie müssen daher auf ein absolutes Minimum reduziert werden. In [7] wird als Richtwert aus ausführlichen thermohydraulischen Simulationen von max. noch zulässigen 3 bis 20 Ausfällen pro Jahr gesprochen. Analoge Simulationen haben indes schon den Nachweis erbracht, dass diese geforderte Zuverlässigkeit tatsächlich erreichbar ist. Um einen anschaulichen Vergleich zu ermöglichen, sei daran erinnert, dass die geforderte Ausfallsicherheit um bis zu 3 Größenordnungen über derjenigen liegen muss, die heute in den Beschleunigern von Großforschungsanlagen erreicht wird.

## 6. Stand der EU-Projekte

In der EU sind zahlreiche Universitäten, Forschungszentren und Unternehmen in „Eurotrans“ zusammengeschlossen, dessen Ziel ein fortgeschrittenes Design einer ADS-Demonstrationsanlage (XT-ADS) und ein generisches Design einer modularen bleigekühlten Transmutationsanlage (EFIT) ist [19]. Bereits im Jahre 1998 wurden im belgischen Kernforschungszentrum SCK-EN Studien für ein vollständiges ADS begonnen. Das Projekt hat die Bezeichnung MYRRHA (Multi purpose hybrid research reactor for high-tech application) [14]. Die “Sustainable Nuclear Energy Technology Platform” (SNETP) der EU klassifizierte MYRRHA/XT-ADS als einen Eckpfeiler der zukünftigen europäischen Forschungsvorhaben [20], [21]. Das gesicherte Gesamtbudget beträgt rd. 1 Milliarde €. In der Planung beginnen Ausschreibungen und Lieferverträge in 2015. Für die Komponentenherstellung und die Baumaßnahmen, die in 2016 beginnen, sind 3 Jahre geplant. Der Bau der Gesamtanlage erfolgt in 2019, danach schließt sich eine dreijährige Testphase mit einem weiteren Jahr zur graduellen Leistungssteigerung an. Ab 2024 soll der Experimentierbetrieb mit den nominellen Kennwerten stattfinden.

## 7. Résumé

Seit vielen Jahrzehnten werden weltweit Kernreaktoren der zivilen Nutzung ohne nennenswerte Zwischenfälle betrieben. Gegenwärtig beläuft sich ihre Zahl auf etwa 440 Anlagen. Unter rationalen Kriterien und im Vergleich mit den Kollateralschäden der Stromerzeugung aus konventioneller Verbrennung, man denke an die Verluste an Menschenleben in Kohlebergwerken, auf explodierenden Ölplattformen usw., ist die Nutzung der Kernenergie das mit Abstand sicherste Verfahren der Stromerzeugung, das bis zum heutigen Tage, von Tschernobyl abgesehen, noch keine Menschenleben gekostet hat. Der gefährliche, regelungstechnisch instabile und graphitmoderierte Tschernobyl-Reaktor (Graphit ist brennbar), dessen Bautyp in Deutschland nicht eingesetzt wird, ist weder zum Vergleich mit den hierzulande betriebenen Anlagen noch als Gefährdungs-Paradebeispiel geeignet. Man kann ein Auto mit defekten Bremsen, das mit Sprengstoff beladen ist, der bei Erschütterung explodiert, auch nicht mit einem modernen PkW ohne Gefahrgut an Bord

vergleichen. Der extrem hohe Sicherheitsstandard unserer gegen einen GAU inhärent sicheren LWR ist aber kein Grund, die Entwicklung noch weitergehender Sicherheitskonzepte zu beenden. Hierzu gehören auch sehr einfach umzusetzende Maßnahmen, die nach Auffassung des Autors die verantwortlichen Unternehmen bisher unverständlicherweise unterlassen haben: Jedes Parkhaus wird heute unterirdisch gebaut. Das Gleiche sollte, ohne den Strompreis maßgebend zu erhöhen, zumindest mit dem Reaktor-Containment bei neuen Anlagen ebenfalls möglich sein, um eine Gefährdung durch Flugzeugabstürze auszuschließen.

Die Verfügbarkeit von preiswerter Energie ist die Überlebensbasis jeder modernen Volkswirtschaft, um im globalen Konkurrenzkampf zu bestehen und einen hohen Lebensstandard zu sichern. Eine politische Partei, die einen nur aus irrationaler Ideologie herleitbaren Ausstieg aus der Kernenergie zu ihrem Gründungsgrundsatz gemacht hat und sich sogar dem Neubau moderner Anlagen, wie sie hier beschrieben wurden, verweigert, schädigt unsere Zukunft. Kernenergie ist keine Brücke zu erneuerbaren Energien, sondern der zukünftige Pfeiler der Weltenergieversorgung. „Erneuerbare“ Energien sind eine wirtschaftlich-technologische Sackgasse. Jeder „Mix“, so auch der hierzulande vielbeschworene „Energimix“, ist grundsätzlich nur dann von Vorteil, wenn einzelne Bestandteile der „Mischung“ neben Nachteilen auch irgendwelche Vorteile gegenüber den anderen Komponenten aufweisen. Bei Windkraftanlagen und Photovoltaik gibt es solche Vorteile nicht.

## Quellen

- [1] <http://www.mb.ruhr-uni-bochum.de/sites/Archiv/pdf/SonderdruckKernenergie.pdf>
- [2] [http://www.ikr.uni-karlsruhe.de/download/GET\\_V03.pdf](http://www.ikr.uni-karlsruhe.de/download/GET_V03.pdf)
- [3] <http://www.ikr.uni-karlsruhe.de/download/ES-II.07.pdf>
- [4] <http://tinyurl.com/2wsmhg8>
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/Betastrahlung>
- [6] [http://de.wikipedia.org/wiki/Lebensdauer\\_%28Physik%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Lebensdauer_%28Physik%29)
- [7] A.C. Mueller, H.A. Abderrahim, Transmutation von radioaktivem Abfall, Physik Journal 9. Jhrg., S. 33 (2010)
- [8] [http://www.fz-juelich.de/ief/ief-6/datapool/page/100/transmutation\\_1\\_big.png](http://www.fz-juelich.de/ief/ief-6/datapool/page/100/transmutation_1_big.png)
- [9] <http://www.nea.fr/ndd/reports/2002/nea3676-externalities.pdf>
- [10] <http://oekoreligion.npage.de/>. Dort die Beiträge „Die Renaissance der Kernenergie“ und „Zukunftskonzepte der „Kernenergie“
- [11] <http://gabe.web.psi.ch/research/lca/>
- [12] [http://www.isa.org.usyd.edu.au/publications/documents//ISA\\_Nuclear\\_Report.pdf](http://www.isa.org.usyd.edu.au/publications/documents//ISA_Nuclear_Report.pdf)
- [13] [http://www.ansto.gov.au/\\_data/assets/pdf\\_file/0005/16763/Owen\\_submission.pdf](http://www.ansto.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/16763/Owen_submission.pdf)
- [14] <http://www.snetp.eu/www/snetp/images/stories/Docs-AboutSNETP/sra2009.pdf>
- [15] [http://www.enea.it/com/ingl/New\\_ingl/publications/ads.html](http://www.enea.it/com/ingl/New_ingl/publications/ads.html)
- [16] <http://www.sckcen.be/pateros/>
- [17] <http://www.nea.fr/science/docs/pubs/nea5421-accelerator.pdf>
- [18] <http://www.iaea.org/inisnkm/nkm/aws/fnss/>
- [19] [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp6-euratom/docs/fisa2006\\_pt\\_eurotrans\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp6-euratom/docs/fisa2006_pt_eurotrans_en.pdf)
- [20] <http://tinyurl.com/2cg4q9o>
- [21] <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/12/33/73/PDF/ThP35.pdf>